

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS Y MITIGACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN URBANA**

PRESENTADO POR:

JORGE ALBERTO LÓPEZ CANO

JAVIER ERNESTO MEJÍA MUÑOZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA.

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PHD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ANÁLISIS Y MITIGACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN URBANA**

Presentado por:

JORGE ALBERTO LÓPEZ CANO
JAVIER ERNESTO MEJÍA MUÑOZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

SAN SALVADOR, JUNIO DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente asesor:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 9 de mayo de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director



Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

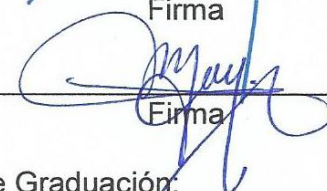
- ING. NUMA POMPILIO JIMENEZ CORTEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE ROBERTO RAMOS


Firma

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación.

ANÁLISIS Y MITIGACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN URBANA

A cargo de los Bachilleres:

- LÓPEZ CANO JORGE ALBERTO

- MEJÍA MUÑOZ JAVIER ERNESTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.2
(ocho punto dos)

AGRADECIMIENTOS

Mi recorrido por la Universidad de El Salvador estuvo en su mayoría lleno de espinas y pocas rosas, por lo tanto, si he llegado hasta acá, no es únicamente por mérito propio debido a que en cada etapa de mi vida siempre he estado rodeado de personas maravillosas que me han brindado apoyo incondicional, a quienes brevemente me tomo el atrevimiento de mencionar en las siguientes líneas.

A Gloria Cano y Jorge López por darme la vida y enseñarme el valor de ésta, por haber estado conmigo en cada momento cuando los he necesitado y cuando no, gracias por apoyar aquellos sueños que tuve de niño, por darme esos ánimos cuando incluso yo decía que no podía, por enseñarme que cada reto y meta se puede lograr cuando se tienen convicciones.

A Rosemary, Elizabeth, Noelia y Anelis hermanitas a quienes hago partícipes de este triunfo por todo el apoyo brindado antes, durante y ahora que estoy culminando esta carrera.

A toda la familia Menjívar Meléndez en especial a María Eugenia y Rene Menjívar, quienes, a pesar de no compartir lazos sanguíneos con mi persona, me hicieron parte de su familia, siendo en su casa donde nació el sueño de convertirme en un Ingeniero Electricista.

A la familia Cano, pero en especial a José y Rigoberto Cano de quienes sin duda habría heredado la pasión por la electricidad, agradecerles en estas pequeñas líneas por el cariño, apoyo y enseñanzas que compartieron conmigo en su casa desde que inicie mi vida universitaria. Así mismo Agradecer a Juan Rodríguez a quien aprecio como a un hermano y a la vez admiro por la excelente calidad humana que posee.

A María Molina quien me apoyó desde el inicio del trabajo de grado, por los ánimos para continuar cuando el cansancio era abrazador producto de las largas jornadas de trabajo.

Agradezco a mi amigo y compañero de tesis Javier Mejía quien me brinda su apoyo desde que cursamos algunas asignaturas en la escuela de ingeniería eléctrica, persona que me ha dejado muchas enseñanzas en todo este tiempo.

A mis amigos Herlinda García, Patricia Sandoval, Ana Galeas, Alex Cortez y Josué Valle; con quienes cursé las primeras asignaturas en la FIA, personas que me ayudaron con sus métodos de estudio para adaptarme a la vida universitaria.

A Miguel Pérez, Samuel Gutiérrez, Rafael Call, Miguel Vásquez, Jorge Rivera; con quienes tuve el honor de compartir aulas y parciales de la carrera, mismos que me brindaron ayuda, información y conocimiento en cada proceso, así mismo agradecer a cada uno de mis compañeros de carrera que de una u otra forma me brindaron su apoyo en este proceso.

A Wilfredo Núñez y todo el grupo de W.N construcciones por abrirme las puertas en el equipo de trabajo convirtiéndose en mi segunda familia y una tercera casa de aprendizaje.

A nuestro asesor Numa Jiménez por todo el apoyo brindado en este proceso junto con todo el personal de la EIE.

A todas esas personas cercanas que no menciono directamente para no volver interminable esta lista, pero que de igual forma valoro y agradezco todo lo que han hecho por mi persona.

Jorge Alberto López Cano.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por supuesto, Profirio Javier Mejía y Ana Silvia Muñoz por su apoyo y cariño brindado a lo largo de mi vida cotidiana y educativa.

A mis hermanos, Silvia Verónica Mejía, Kevin Mejía y Mercedes Mejía, por su apoyo durante este proceso, en especial a Silvia por cuidar de mí como otra madre.

A mis abuelos, María Tomasa Muñoz y Manuel Arévalo, QEPD, por su cariño y todo lo que me enseñaron.

A mis tíos, Raúl, Antonio, Carolina y Carmen por siempre estar dispuestos a ayudarme.

A mis sobrinos, Damary Abigail Paz y Rodrigo Ezequiel Paz

A mi amigo y compañero de tesis, Jorge Alberto López Cano por su esfuerzo, determinación y apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

Al Ing. Numa Pompilio Jiménez, por su apoyo y comprensión a lo largo de este trabajo de graduación.

A mis amigos, Enrique Vázquez y Kevin Vargas por su apoyo y complicidad en muchos de los proyectos que emprendimos a lo largo de estos años.

A Leslie Verónica Martínez, Susana, Miriam y Raquel Rivera, por brindarme su amistad y apoyo en mis años de universidad.

A todos los amigos que hice a lo largo de estos años en las aulas, laboratorios y pasillos de nuestra bella alma mater, por hacer de este viaje único y llevadero.

A Reina Vides, Juancito y Posada, por la ayuda brindada a lo largo de estos años de carrera.

A todos mis docentes que me formaron a lo largo de estos años en la universidad.

Al Ing. Ángel Ramírez, por tenderle la mano a un extraño.

A Amanda, por creer en mí.

«Tarde, pero a tiempo»

Javier Ernesto Mejía Muñoz

Contenido

Tabla de ilustraciones	x
Objetivos	xiv
Objetivo general	xiv
Objetivos específicos.....	xiv
1. Capítulo I. Descripción del perfil del Trabajo de Graduación	1
2. Capítulo II. Marco teórico.....	3
2.1. Definiciones.....	3
2.2. Letras símbolos.....	4
2.3. Distorsión armónica.....	5
2.4. Fuentes de armónicas.....	7
2.4.1. Dispositivos ferromagnéticos.....	6
2.4.2. Convertidores estáticos	7
2.4.3. Dispositivos de arco eléctrico	8
2.5. Efectos de los armónicos en las redes eléctricas	9
2.6. Factor de potencia con presencia de distorsión armónica	10
2.7. Resonancia.....	12
2.8. Transformadores de tierra.....	14
2.8.1. Cálculo de transformador de tierra según IEEE Std. 32-1972 (1990)	15
2.9. Filtros para armónicas	17
2.10. Regulaciones	20
3. Capítulo 3. Análisis de armónicos en una subestación de distribución	24
3.1. Preparación de los datos	24
3.2. Determinación de los niveles iniciales de los indicadores	26
3.2.1. Gráficas CKT 11	26
3.2.2. Gráficas CKT 12	29
3.2.3. Gráficas CKT 13	31
3.2.4. Gráficas CKT 14	33
3.2.5. Gráficas CKT 15	35
3.2.6. Gráficas CKT 16	37
3.2.7. Gráficas CKT 17	39
3.2.8. Gráficas CKT 18	41

3.2.9.	Gráficas CKT 19	43
3.2.10.	Gráficas CKT 21.....	46
3.2.11.	Gráficas CKT 22.....	48
3.3.	Corriente de neutro	49
4.	Capítulo 4. Cálculos y simulación.....	52
4.1.	Cálculo del filtro según IEEE Std. 3002.8-2018	52
4.2.	Simulación con ATP.....	54
5.	Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	64
5.1.	Conclusiones.....	64
5.2.	Recomendaciones	64
	Referencias	66
	Anexos.....	67

Tabla de ilustraciones

Ilustración 2. 1 Señales de corriente de 60 y 180 Hz.	6
Ilustración 2. 2 Suma de ondas sinusoidales.	6
Ilustración 2. 3 secuencia positiva.....	7
Ilustración 2. 4 secuencia negativa.....	7
Ilustración 2. 5 secuencia cero	7
Ilustración 2. 6 Esquema, forma de onda y Fourier de un circuito lineal.	6
Ilustración 2. 7 Características de tensión y de corriente de dispositivos ferromagnéticos. [4]	7
Ilustración 2. 8 Convertidor estático básico (de 4 pulsos).	8
Ilustración 2. 9 Formas de onda del convertidor estático anterior (azul: tensión de fuente, rojo: corriente de fuente, verde: tensión del capacitor.)	8
Ilustración 2. 10 tabla de valores típicos de un horno de arco según IEEE Std. 519 [1]	9
Ilustración 2. 11 Representación gráfica del factor de potencia.	10
Ilustración 2. 12 Representación gráfica del factor de potencia con la presencia de armónicos en la red eléctrica.	11
Ilustración 2. 13 circuito típico de resonancia serie.	13
Ilustración 2. 14 característica de corriente e impedancia del circuito resonante en serie.....	13
Ilustración 2. 15 Circuito típico resonancia paralelo.....	13
Ilustración 2. 16 Característica de impedancia del circuito resonante paralelo.	14
Ilustración 2. 17 diagrama de conexión de un transformador Zig-Zag. [7]	15
Ilustración 2. 18 tabla 2 de IEEE Std. 32-1972 (1990) [8].....	16
Ilustración 2. 19 Imagen tomada del capítulo 11 de “Circuitos microelectrónicos” [7].....	17
Ilustración 2. 20. Características de un filtro paso bajo [7].....	18
Ilustración 2. 21 Características de un filtro paso alto. [7]	18
Ilustración 2. 22 característica de magnitud de un filtro paso banda. [9]	19
Ilustración 2. 23 Circuito y característica de un filtro rechaza banda. [10]	19
Ilustración 2. 24 Tabla 4 de la Norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución, SIGET.....	21
Ilustración 2. 25 Tabla 5 de la Norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución, SIGET.....	21
Ilustración 2. 26 Tabla 10.3 del estándar IEEE 519-1992.	22
Ilustración 2. 27 Tabla 11.1 del estándar IEEE 519-1992.	22
Ilustración 3. 1 diagrama unifilar representativo de la distribución de los circuitos.	25
Ilustración 3. 2 Perfil de carga de circuito 11 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).	27
Ilustración 3. 3 Perfil de carga de circuito 11 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).	27
Ilustración 3. 4 Perfil de carga de circuito 11 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).	28
Ilustración 3. 5 Factores de potencia por fase del circuito 11.	28
Ilustración 3. 6 Comportamiento del tercer armónico por fase del circuito 11.....	28

Ilustración 3. 7 Perfil de carga de circuito 12 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	29
Ilustración 3. 8 Perfil de carga de circuito 12 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	29
Ilustración 3. 9 Perfil de carga de circuito 12 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	30
Ilustración 3. 10 Comportamiento del tercer armónico en todas las fases del circuito 12.....	30
Ilustración 3. 11 Perfil de carga de circuito 13 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	31
Ilustración 3. 12 Perfil de carga de circuito 13 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	31
Ilustración 3. 13 Perfil de carga de circuito 13 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	32
Ilustración 3. 14 Tendencia del tercer armónico en las tres fases del circuito 13.....	32
Ilustración 3. 15 Perfil de carga de circuito 14 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	33
Ilustración 3. 16 Perfil de carga de circuito 14 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	33
Ilustración 3. 17 Perfil de carga de circuito 14 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	34
Ilustración 3. 18 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 14.....	34
Ilustración 3. 19 Comparación de TDD con el perfil de carga de fase A del circuito 14.....	35
Ilustración 3. 20 Perfil de carga de circuito 15 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	35
Ilustración 3. 21 Perfil de carga de circuito 15 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	36
Ilustración 3. 22 Perfil de carga de circuito 15 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	36
Ilustración 3. 23 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 15.....	36
Ilustración 3. 24 Perfil de carga de circuito 16 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	37
Ilustración 3. 25 Perfil de carga de circuito 16 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	37
Ilustración 3. 26 Perfil de carga de circuito 16 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	38
Ilustración 3. 27 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 16.....	38
Ilustración 3. 28 Perfil de carga de circuito 17 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	39
Ilustración 3. 29 Perfil de carga de circuito 17 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	39
Ilustración 3. 30 Perfil de carga de circuito 17 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	40
Ilustración 3. 31 Comportamiento del tercer armónico de las fases A, B y C del circuito 17.....	40

Ilustración 3. 32 Comportamiento del factor de potencia en las fases A, B y C del circuito 17....	41
Ilustración 3. 33 Perfil de carga de circuito 18 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	41
Ilustración 3. 34 Perfil de carga de circuito 18 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	42
Ilustración 3. 35 Perfil de carga de circuito 18 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	42
Ilustración 3. 36 Comportamiento del tercer armónico de las tres fases del circuito 18.....	43
Ilustración 3. 37 Perfil de carga de circuito 19 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	43
Ilustración 3. 38 Perfil de carga de circuito 19 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	44
Ilustración 3. 39 Perfil de carga de circuito 19 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	44
Ilustración 3. 40 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 19.....	45
Ilustración 3. 41 Comportamiento del factor en las tres fases del circuito 19.	45
Ilustración 3. 42 Perfil de carga de circuito 21 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	46
Ilustración 3. 43 Perfil de carga de circuito 21 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	46
Ilustración 3. 44 Perfil de carga de circuito 21 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	47
Ilustración 3. 45 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 21.....	47
Ilustración 3. 46 Perfil de carga de circuito 22 fase A (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	48
Ilustración 3. 47 Perfil de carga de circuito 22 fase B (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	48
Ilustración 3. 48 Perfil de carga de circuito 22 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul grafica derecha) TDD (trazo naranja grafica derecha).....	49
Ilustración 3. 49 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 22.....	49
Ilustración 3. 50 mediciones de corriente de neutro del año 2018.....	50
Ilustración 3. 51 Tendencia de corriente de neutro en transformador de tierra 1.	50
Ilustración 3. 52 tendencia de corriente de neutro en transformador de tierra 2.	51
Ilustración 4. 1 Especificación de fuente de tensión.	54
Ilustración 4. 2 Elemento resistivo de la impedancia Thévenin.....	55
Ilustración 4. 3 Elemento reactivo de la impedancia Thévenin.	56
Ilustración 4. 4 Elemento resistivo de la impedancia de carga.	56
Ilustración 4. 5 Elemento reactivo de carga.	57
Ilustración 4. 6 Circuito equivalente para simulación.....	57
Ilustración 4. 7 onda de tensión y corriente que reproduce la corriente de carga y el factor de potencia del circuito de manera aproximada.....	58
Ilustración 4. 8 Transformada rápida de Fourier para el circuito equivalente.	58

Ilustración 4. 9 Impedancia de la red eléctrica en estudio con respecto a la frecuencia.	59
Ilustración 4. 10 Circuito con distorsión armónica.	59
Ilustración 4. 11 valores configurados en la fuente armónica para la simulación.	60
Ilustración 4. 12 resultados de simulacion de circuito con distorsion armonica.	61
Ilustración 4. 13 señal de tensión y su análisis de Fourier para circuito con fuente armónica.	61
Ilustración 4. 14 circuito con la implementación del filtro.	62
Ilustración 4. 15 valores del filtro para tercer armónico.	62
Ilustración 4. 16 resultados de la simulación de la implementación del filtro.	63
Tabla 3. 1 Potencia máxima de circuitos de Bus 1.....	25
Tabla 3. 2 Potencia máxima de circuitos de Bus 2.....	25
Tabla 3. 3 Resumen de cálculo de corrientes y relación de corto circuito.....	26

Objetivos

Objetivo general

Analizar y mitigar los efectos de las corrientes armónicas en redes de media tensión circulando en las líneas alimentadas por una subestación urbana de 150 MVA.

Objetivos específicos

- Investigar el contenido armónico en las corrientes de carga de los circuitos de una subestación de distribución de capacidad de 150 MVA y su impacto en la calidad del voltaje de 23 kV.
- Realizar la simulación de las corrientes armónicas en circuitos de distribución de media tensión usando un software como ATP o similar.
- Analizar los efectos de las corrientes armónicas en los sistemas de distribución de media tensión (corrientes de 3era armónica y otros): pérdidas y calentamiento en los transformadores de tierra y líneas eléctricas de la distribuidora.
- Evaluar los mecanismos de control de la corriente de tercera armónica en las normas IEEE y normativa de calidad de SIGET, entre ellos el adecuado dimensionamiento de transformadores de tierra y cable de neutro.
- Diseñar y simular un filtro de armónicos para mitigar los efectos de las corrientes de tercera armónica en el transformador de tierra, proponiendo la ubicación adecuada y su factibilidad técnica.
- Recomendaciones para reducir la producción de corrientes de tercera armónica para zonas urbanas del AMSS.

1. Capítulo I. Descripción del perfil del Trabajo de Graduación

Esta investigación está tomada de la necesidad de mitigar el efecto de las corrientes armónicas en las redes de distribución eléctrica, esto debido al creciente uso de tecnologías que generan cantidades considerables de distorsión armónica (TV, lavadoras, refrigeradoras, aires acondicionados con tecnología inverter); debido a esto, se deben buscar soluciones a esta creciente problemática, ya sea con un mejor dimensionamiento de los elementos de la red; tomando en cuenta la distorsión armónica; o bien, encontrando métodos para mitigar (reducir) dicha distorsión; logrando así mejorar el desempeño de dichas redes y así tener una mejor calidad de energía; además de reducir las pérdidas que estas ocasionan.

Una de las razones del por qué el tema es relevante, es por la presencia de valores significativos de distorsión armónica en una subestación de 150 MVA del área metropolitana de San Salvador, los niveles de distorsión armónica en esta subestación pueden ser una de las causas de la falla de uno de los transformadores de tierra.

Uno de los principales efectos de las corrientes armónicas en los circuitos eléctricos es el aumento de las pérdidas eléctricas, que se deja ver en el aumento de temperatura de los elementos del circuito; debido a esto, uno de los elementos más afectados por dichas corrientes es el transformador de tierra, por el hecho de que las corrientes armónicas múltiplos de tres son las que viajan por el conductor neutro, siendo estas unas de las más predominantes.

Otro de los puntos relevantes por el cual esta investigación resulta de interés, es el aspecto económico que representa, ya que la distorsión armónica puede ocasionar pérdidas monetarias tanto a las compañías distribuidoras, así como a los usuarios finales, esto puede darse por el deterioro de elementos eléctricos llegando en ciertas ocasiones hasta el fallo; así como también, por multas impuestas a los usuarios debido a la violación de los límites establecidos en las normas vigentes de cada región.

Uno de los objetivos que persigue esta investigación es lograr mitigar los valores de distorsión a niveles que no causen problemas graves a la red de distribución; dando así, una mejor calidad del servicio eléctrico y evitando las pérdidas económicas que conlleva los problemas ocasionados por la distorsión (fallos de elementos, costos por energía no servida, multas, etc.)

Una de las soluciones más utilizadas en la mitigación de corrientes armónicas, es la implementación de filtros pasivos; el cual es ideal en sistemas de potencia con carga poco dinámica y que necesiten compensación de energía reactiva; su popularidad se debe a la simpleza de su cálculo e implementación, así como también a su bajo costo en comparación con otras soluciones; debido a esto, se escogió como la solución a implementar en esta investigación.

En ingeniería es importante la simulación de los sistemas antes de la puesta en operación de manera física, debido a que mediante esta se pueden evaluar posibles errores que podrían ocasionar algún fallo; gracias al avance de la tecnología, las computadoras y el surgimiento de programas que permiten la simulación de sistemas de manera fiel, han surgido muchos programas que permiten la simulación de sistemas eléctricos tales como EMTP/ATP, ETAP, PSPICE, los cuales facilitan la

evaluación del comportamiento del sistemas y la toma de decisiones para posibles soluciones; en lo que respecta a esta investigación se estará utilizando EMTP/ATP el cual está diseñado para simular transitorios en sistemas eléctricos.

2. Capítulo II. Marco teórico

2.1. Definiciones

Armónico: Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. NOTA: Por ejemplo, en una componente, cuando la frecuencia es el doble de la fundamental es llamada segundo armónico.

Armónico característico: Aquellos armónicos producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de tres, por ejemplo, los 5 th, 7 th, 11 th, 13 th, etc. $h = kq \pm 1$; k = algún entero, q = número de pulso del convertidor. [1]

Armónico no característico: Armónicos que no son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. Estos pueden ser el resultado de frecuencias oscilatorias; una demodulación de armónicos característicos y la fundamental; o un desbalance en los sistemas de potencia AC, el ángulo de retardo asimétrico, o el funcionamiento del ciclo convertidor. [1]

Carga no lineal: Una carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es alimentada por una fuente de voltaje sinusoidal.

Distorsión armónica total (THD): este término se ha vuelto de uso común para definir el "factor de distorsión" de voltaje o corriente. Ver **factor de distorsión**. [1]

$$THD_i = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots + i_n^2}}{i_1}$$

Distorsión de demanda total (TDD): es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la distorsión armónica de corriente, en porcentaje de la corriente máxima de carga (de 15 a 30 minutos de demanda)

$$TDD = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots + i_n^2}}{i_{max}}$$

Factor de calidad: es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo de la señal.

Factor de distorsión (factor armónico): Se refiere a la relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico al valor de la raíz cuadrada media de la cantidad fundamental, expresada como un porcentaje de la fundamental. [1]

$$DF = \sqrt{\frac{\text{suma del cuadrado de las amplitudes de todo el contenido armónico}}{\text{cuadrado de la amplitud de la componente fundamental}}} \times 100$$

Filtro. Término genérico utilizado para describir aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir la corriente o voltaje armónico que fluye o se imprime en partes específicas de un sistema eléctrico.

Saturación magnética: La saturación magnética es un efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo H no provoca un aumento en la magnetización del material.

Sistema homopolar: Es un sistema trifásico que puede representarse por tres fasores de igual módulo y en fase.

Razón de corto circuito: Para un convertidor semiconductor, la relación de la capacidad de cortocircuito de la barra, en MVA, en el punto de conexión del convertidor al valor del convertidor, en MW. [1]

Redes de secuencia: Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas de energía trifásicos no balanceados, pues permite escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas simétricos aplicando el principio de superposición, siempre y cuando las corrientes y tensiones del sistema se relacionen con impedancias lineales.

RMS: conocido también como valor eficaz, es la medida estadística de la magnitud de una cantidad variable.

$$I_{RMS} = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_n^2}$$

Aislamiento galvánico: arreglo dentro del equipo que permite la transferencia de señales o potencia entre dos circuitos sin ninguna conexión eléctrica directa entre los dos. [2]

2.2. Letras símbolos

φ o θ : ángulo de desplazamiento entre tensión y corriente sin presencia de distorsión armónica.

B: densidad de flujo magnético.

C: capacitancia.

f : frecuencia eléctrica.

f_r : frecuencia de resonancia.

F_t : factor de porcentaje de falla

H: intensidad de campo magnético

h : orden armonico.

I: intensidad de corriente eléctrica.

I_0 : intensidad de corriente de secuencia cero.

I_{3f} : intensidad de corriente de falla trifásica.

L: inductancia.

V: tensión eléctrica.

V_L : tensión de línea.

P: potencia eléctrica activa.

R: resistencia eléctrica.

S: potencia eléctrica aparente sin armónicos.

S_{max} : potencia aparente máxima del transformador de tierra.

S_{nom} : potencia nominal del transformador de tierra.

U: potencia aparente en presencia de armónicos.

Q: potencia eléctrica reactiva.

Q_q : factor de calidad.

D: potencia de distorsión.

X_l : reactancia inductiva.

X_c : reactancia capacitiva.

Z: impedancia.

Z_F : impedancia de falla trifásica.

Z_{Th} : impedancia de equivalente Thévenin.

Z_{Tot} : impedancia de corto circuito.

Z_0 : impedancia de secuencia cero

2.3. Distorsión armónica

Toda onda periódica puede ser representada como la suma infinita de ondas sinusoidales cuya frecuencia son enteros múltiplos de la frecuencia fundamental.

La distorsión armónica en redes eléctricas se refiere a componentes sinusoidales de una señal o cantidad periódica que oscilan a frecuencias que son múltiplos enteros de una frecuencia designada como fundamental o frecuencia de trabajo, de esta manera en los sistemas de potencia eléctrica de El Salvador se tiene una frecuencia de trabajo de 60 Hz, entonces, al hablar de una tercera (3ª) armónica, se hace referencia a una señal eléctrica que oscila a una frecuencia de 180 Hz (60 x 3). En la Ilustración 2. 1 se muestra una señal de 60 Hz (trazo azul) y una de 180 Hz (trazo rojo).

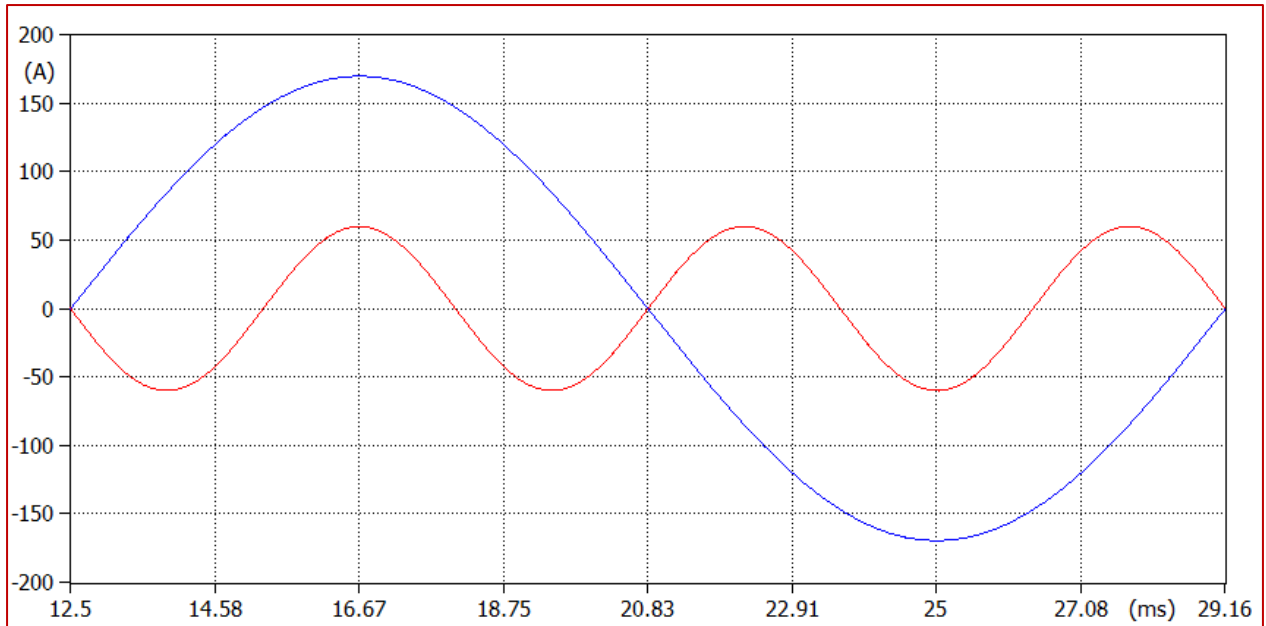


Ilustración 2. 1 Señales de corriente de 60 y 180 Hz.

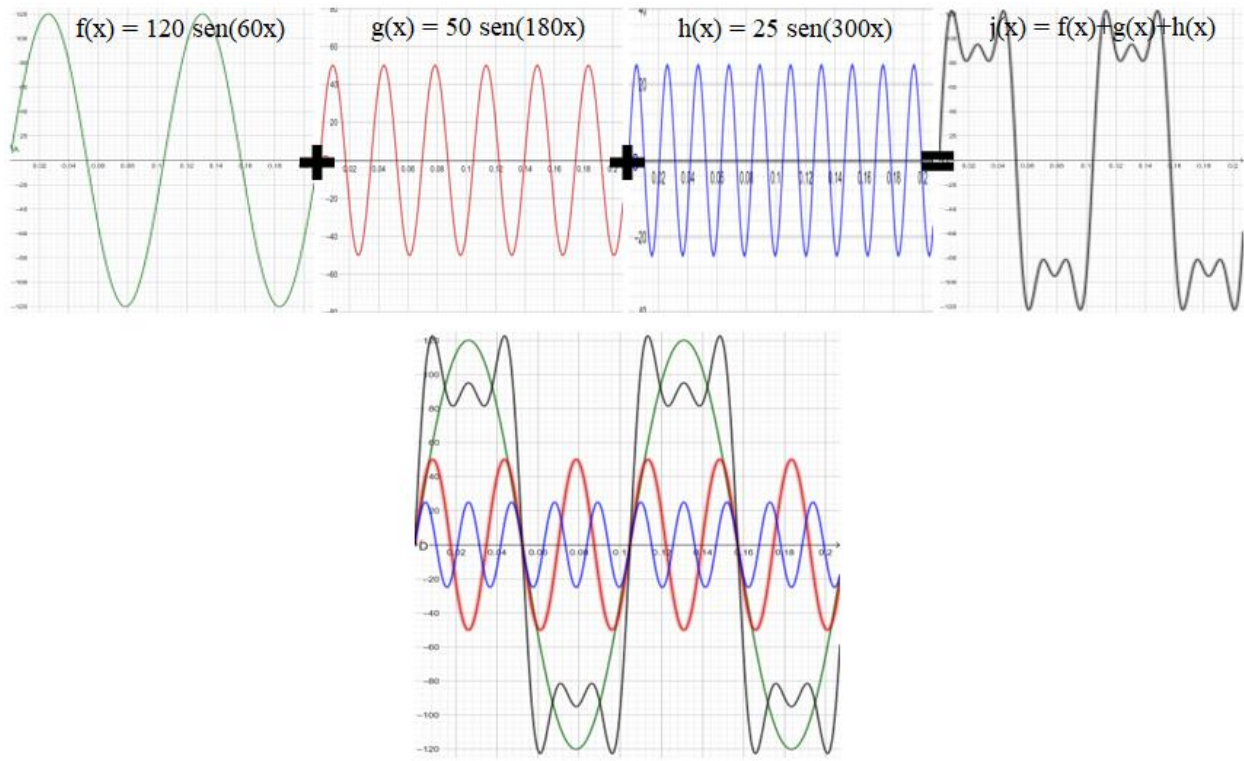


Ilustración 2. 2 Suma de ondas sinusoidales.

En redes eléctricas se puede tener armónicos de tensión y de corriente, estas últimas provocadas por cargas no lineales, es decir, cargas que consumen corriente no sinusoidal al ser alimentada por una tensión sinusoidal, cada componente armónica tiene un orden, una frecuencia y una secuencia. La secuencia se refiere al giro del fasor con respecto a la fundamental [3], de esta manera la

secuencia de las componentes armónicas puede ser: positiva, negativa y cero. Se muestran en la Ilustración 2. 3, Ilustración 2. 4 e Ilustración 2. 5 respectivamente.

Los armónicos de secuencia cero u homopolares son los armónicos múltiplos de tres y se caracterizan por no poseer sentido de giro, más bien son corrientes parasitas que buscan circular siguiendo la trayectoria del neutro.

Los armónicos múltiplos de tres menos uno (2, 5, 8, 11...) son catalogados como armónicos de secuencia negativa, debido que el sentido de giro de estos es contrario al sentido de giro del armónico uno (o fundamental), generando una oposición o frenado en el funcionamiento original de las maquinas rotativas.

Los armónicos múltiplos de tres más uno (4, 7, 10, 13...) son descritos como armónicos de secuencia positiva estos giran en el mismo sentido del armónico uno, pero buscan acelerar de manera desmedida a las maquinas eléctricas rotativas, lo que también genera pérdidas, sin causar algún beneficio.

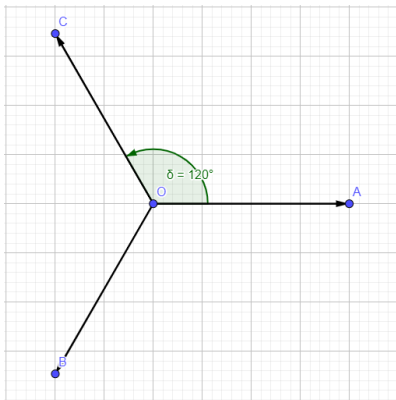


Ilustración 2. 3 secuencia positiva.

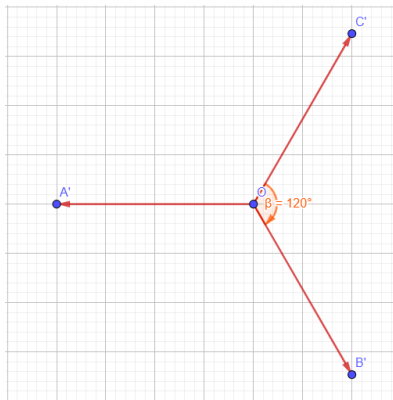


Ilustración 2. 4 secuencia negativa

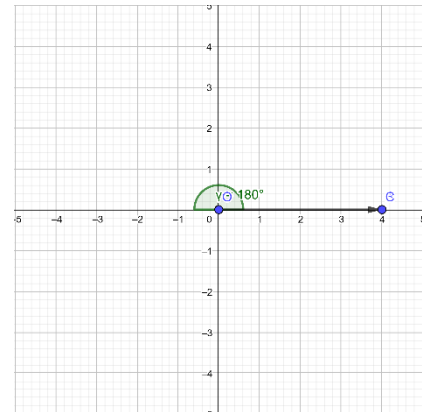


Ilustración 2. 5 secuencia cero

Es necesario especificar que los armónicos en diferentes fuentes bibliográficas, suelen clasificarse como armónicos característicos (armónicos impares) y armónicos no característicos (armónicos pares, Inter-armónicos, sub-armónicos), estos últimos quedando fuera del alcance de análisis para este documento, debido a que los armónicos pares se hacen presentes cuando en las instalaciones eléctricas se ha perdido la simetría de la forma de onda.

Por su parte el orden y la frecuencia de los armónicos están relacionados entre sí, debido a que el orden armónico depende de la frecuencia de este, es decir un armónico de orden 2 es aquel que tiene el doble de la frecuencia fundamental, por su parte, como para cualquier señal, en este caso la frecuencia se refiere a la velocidad de oscilación, es decir, el número de periodos completos (ciclos) que se realizan por unidad de tiempo (segundos).

2.4. Fuentes de armónicas

La generación de los armónicos está dada por las cargas que se conectan a la red, partiendo de esto las cargas se pueden clasificar como, cargas lineales y cargas no lineales.

Cargas lineales: La característica principal de estos es que si se alimentan con una fuente sinusoidal demandan una corriente sinusoidal (libre de contenido armónico), en este grupo se pueden mencionar, resistencias, inductancias y capacitores, en el caso de capacitores e inductores no generan contenido armónico; pero, debido a su propiedad de guardar energía y ser alimentados con corrientes armónicas, estos, podrían llegar a amplificarla.

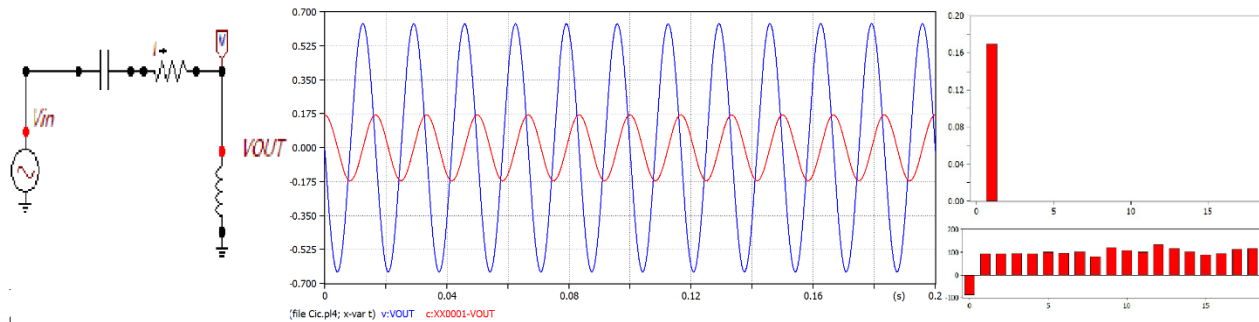


Ilustración 2. 6 Esquema, forma de onda y Fourier de un circuito lineal.

Cargas no lineales: La generación de armónicos se encuentra inmerso en este grupo, debido a que, al alimentar este tipo de carga con una fuente de tensión sinusoidal, no demandan una corriente con el mismo tipo de onda.

Cuando hablamos de fuentes generadoras de armónicos, podemos separarlas en tres grupos; dispositivos ferromagnéticos, convertidores estáticos y dispositivos de arco eléctrico; los dispositivos pertenecientes a cada uno de estos grupos pueden generar corrientes armónicas, a continuación, se ampliará sobre las características de los dispositivos pertenecientes a estos grupos.

2.4.1. Dispositivos ferromagnéticos

Este tipo de dispositivos (transformadores, motores, generadores, reactores) son inductores y generan corrientes armónicas debido a la naturaleza de funcionamiento, ya que, al poseer núcleos de materiales saturables, se requiere un gran cambio en su flujo magnético H para tener un pequeño cambio en B dándose ahí el fenómeno de multiplicación de armónicos, generando así cantidades mayores de corrientes armónicas, predominando en estas la de tercer orden. En la Ilustración 2. 7 se representa gráficamente lo antes descrito.

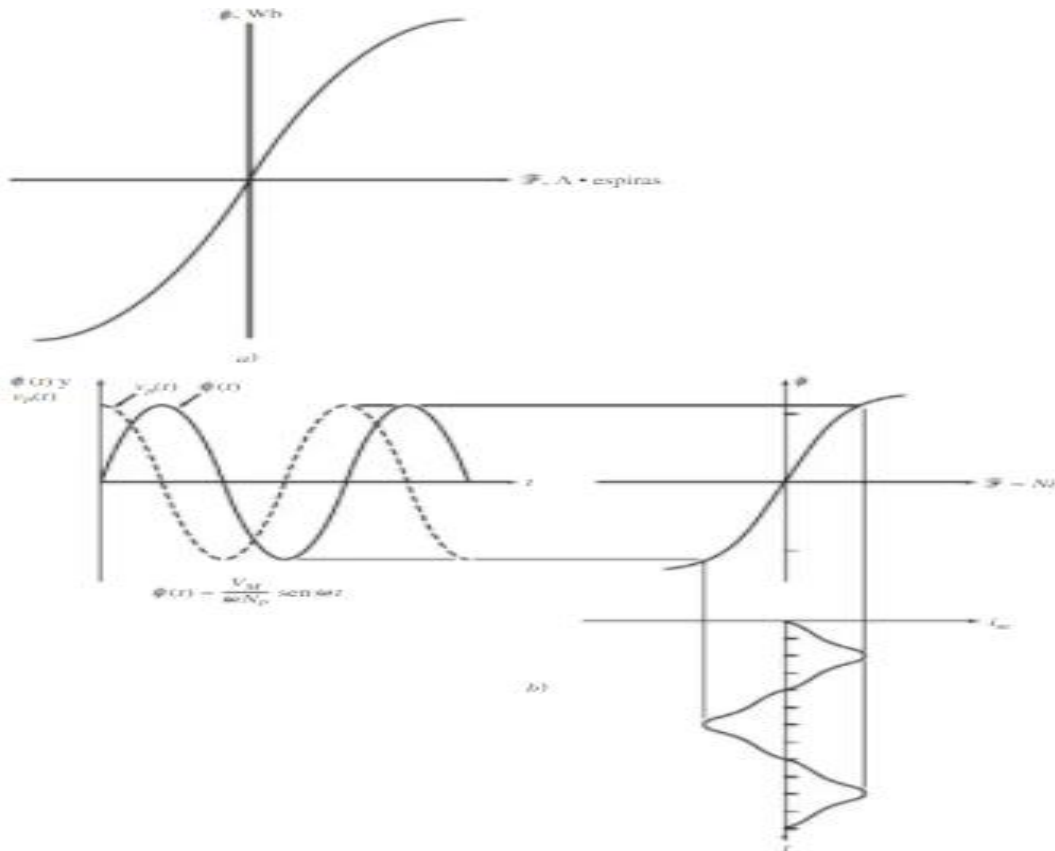


Ilustración 2.7 Características de tensión y de corriente de dispositivos ferromagnéticos. [4]

2.4.2. Convertidores estáticos

Estos tipos de dispositivos al no consumir corriente de manera constante, da como resultado la generación de corrientes armónicas, esto debido a que al ser alimentados por una tensión sinusoidal estos consumen una corriente con una forma de onda que dista de ser sinusoidal.

Los convertidores estáticos son la mayor fuente de armónicos que existen en el mundo, ya que son utilizados tanto en la industria como en la vida cotidiana, entre algunos de estos dispositivos tenemos variadores de velocidad de motores, así como los sistemas ininterrumpidos de potencia (UPS); también tenemos las luminarias LED, televisores, lavadoras de última generación, sistemas de enfriamiento inverter y muchos otros electrodomésticos muy utilizados.

Cuanto más cerca se encuentre la frecuencia de un armónico de la frecuencia fundamental (en la mayoría de los casos) mayor será su magnitud, debido a esto los convertidores monofásicos de cuatro pulsos generan armónicos de orden 3, los convertidores de 6 pulsos generan armónicos de orden 5, los convertidores de orden 12 generan armónicos de orden 11, notándose con esto que cuantos más pulsos tenga un convertidor menor será su contenido armónico cerca de la frecuencia fundamental, la desventaja, es que requieren más electrónica de potencia (mayor costo).

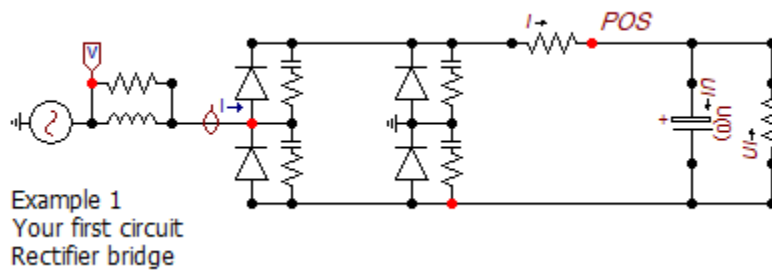


Ilustración 2. 8 Convertidor estático básico (de 4 pulsos).

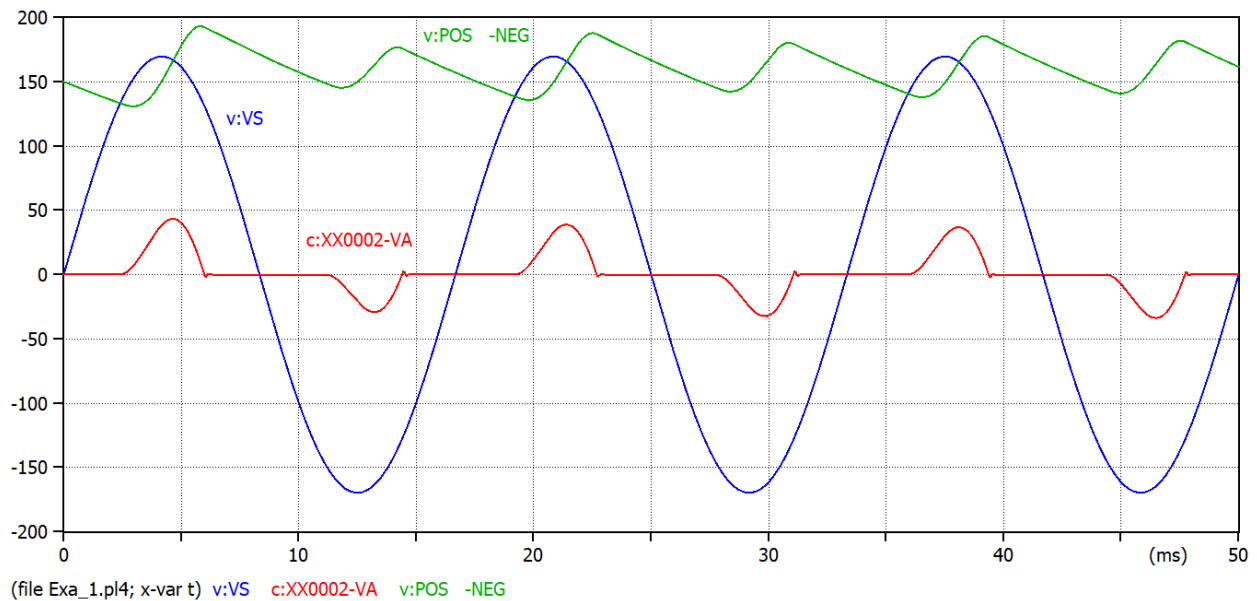


Ilustración 2. 9 Formas de onda del convertidor estático anterior (azul: tensión de fuente, rojo: corriente de fuente, verde: tensión del capacitor.)

2.4.3. Dispositivos de arco eléctrico

Los dispositivos de arco eléctrico presentan la característica de ser muy difícil de predecir su corriente de funcionamiento, debido en que cada periodo de funcionamiento, demandan cantidades de corrientes distinta generando un amplio espectro de armónicos en cada operación.

Para los hornos de arco estos presentan una gran distorsión al inicio del proceso de fundición, teniendo un amplio espectro de armónicos característicos como no característicos, pero, al fundirse el metal, la corriente se hace más estable reduciendo así su distorsión y desapareciendo los harmónicos no característicos, en la Ilustración 2. 10 se muestra una tabla de valores de porcentaje típicos de estos dispositivos.

Table 4.1
Harmonic Content of Arc Furnace Current
at Two Stages of the Melting Cycle

Furnace condition	Harmonic Current % of Fundamental				
	Harmonic Order				
	2	3	4	5	7
Initial melting (active arc)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refining (stable arc)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

Ilustración 2. 10 tabla de valores típicos de un horno de arco según IEEE Std. 519 [1]

2.5. Efectos de los armónicos en las redes eléctricas

Los armónicos en redes eléctricas tienen diversos efectos, entre los cuales podemos tener, calentamiento de conductores (sobrecarga de conductores neutros), motores y transformadores, entre otros elementos, también se tiene, pérdida de eficiencia, falsa activación de protecciones, falla en los bancos de capacitores, resonancia, sobre tensiones, parpadeos en iluminación (flickers) y reducción de vida útil de los equipos.

Ampliando más sobre el efecto del calentamiento de elementos, esto es consecuencia del aumento de la corriente RMS, lo cual genera el aumento del efecto joule, provocando pérdidas a través de la disipación en forma de calor, esto a su vez, puede traer otros inconvenientes, como lo son el desgaste del aislamiento de conductores, ya sea, los pertenecientes a la instalación eléctrica o los pertenecientes a los equipos (motores y transformadores) conectados a la instalación eléctrica. Existe una regla aproximada, llamada regla de Montsinger, conocida como la ley de los 10 °C, lo cual significa que, por cada diez grados que se supere la temperatura de diseño de la clase de aislamiento, éste se degrada un 50%, y viceversa [5].

Sobre pérdidas de eficiencia podemos mencionar, la pérdida de capacidad de suministrar potencia de los transformadores, debido a que, al existir corrientes armónicas este solo podrá cargarse a cierto porcentaje de su capacidad nominal, ya que el resto deberá soportar las corrientes, múltiplos de la fundamental; también se tiene el aumento de la vibración y el ruido acústico debido a que el transformador no ha sido diseñado para soportar corrientes de alta frecuencia. Para las maquinas rotativas tenemos la pérdida de torque debido a las corrientes de secuencia negativa que se oponen al sentido de giro deseado del eje de la maquina; también tenemos desgaste de los rodamientos debido a vibración y calentamiento de la máquina.

Al referirnos a la falsa activación de protecciones, tenemos la activación por el aumento de temperatura debido al aumento de la corriente RMS por presencia de corrientes distorsionantes,

esto puede causar el disparo de protecciones a base de lámina bimetálica debido al efecto piel que aumenta la temperatura de esta sin haber sobrepasado su corriente de diseño, para los interruptores magnéticos tenemos falsos disparos debido a el excesivo valor pico de la corriente.

Resonancia, debido a la presencia de corrientes de distintas frecuencias y la presencia tanto de inductores como capacitores en el sistema, este puede llegar a resonar, teniendo efectos nocivos en el sistema, entre estos podemos mencionar, sobretensiones debido a resonancia paralelo y sobre corrientes debido a la resonancia serie, también podemos tener el fallo de los bancos de capacitores llegando hasta destrucción física de estos, así como un incremento de la distorsión en tensión.

2.6. Factor de potencia con presencia de distorsión armónica

En condiciones donde la carga se considera lineal, sin presencia de armónicos, se sabe que el factor de potencia equivale a la razón de la potencia activa y la potencia aparente, lo que también coincide con el coseno del ángulo de desplazamiento entre la tensión y la corriente como se describe en la siguiente ilustración.

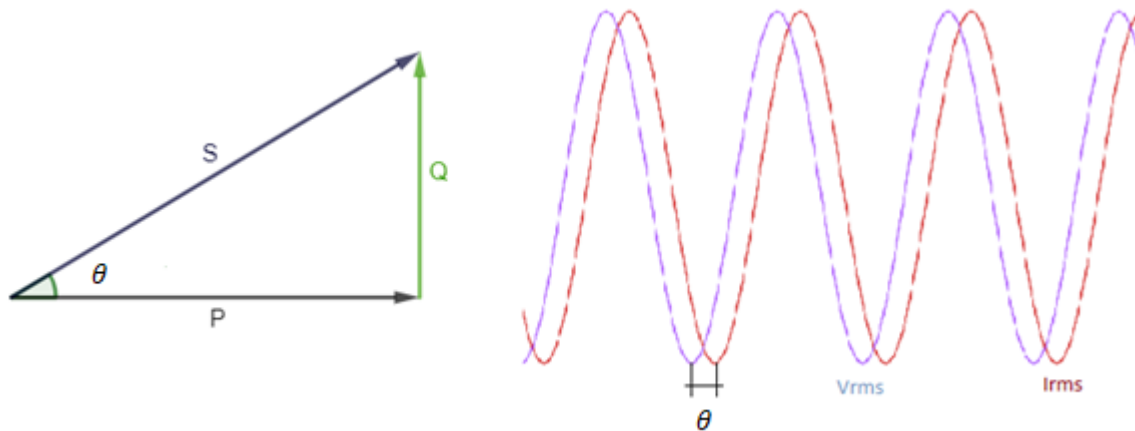


Ilustración 2.11 Representación gráfica del factor de potencia.

$$Fp = \cos(\theta) = \frac{P}{S}$$

Sin embargo, cuando pasamos a condiciones reales donde no toda la carga conectada es lineal, y la corriente empieza adoptar características no lineales generadoras de armónicas aparece un nuevo concepto de potencia a la cual denotaremos con la letra “D” y se le llamará potencia de distorsión, que corresponde a la potencia de los armónicos, esta no genera ningún beneficio para la red eléctrica; en la siguiente ilustración se muestra la representación gráfica de las potencias del sistema.

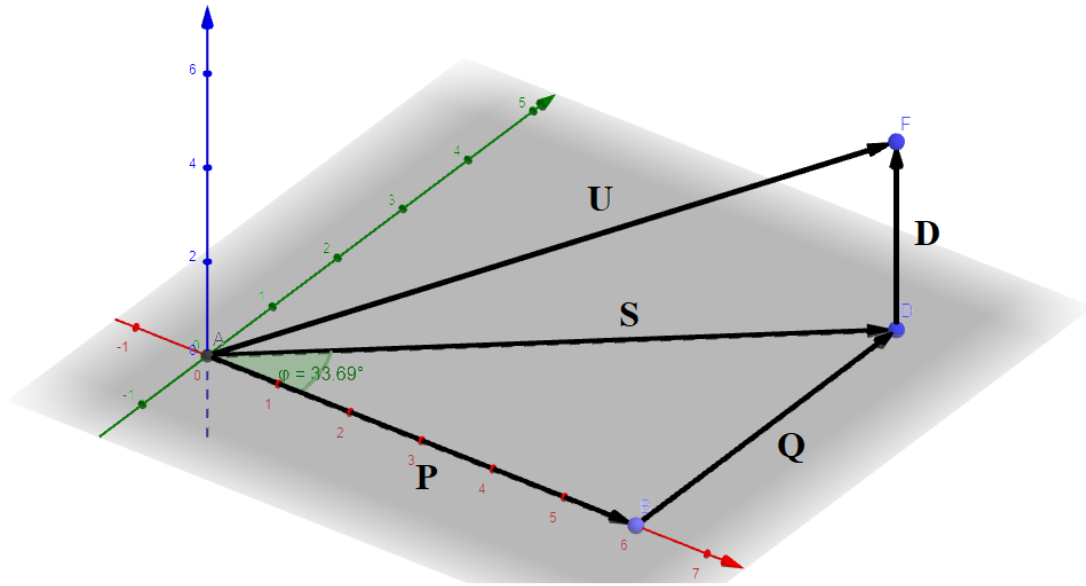


Ilustración 2. 12 Representación gráfica del factor de potencia con la presencia de armónicos en la red eléctrica.

Como apreciamos en la Ilustración 2. 12 al desarrollar la suma geométrica se obtiene [6]:

$$U = \sqrt{S^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Donde:

U : Potencia aparente del sistema

P : Potencia real

Q : Potencia reactiva

Para el desarrollo del calculo del factor de potencia bajo estas condiciones tenemos:

$$I_{RMS} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}$$

$$V_{RMS} = V_1 \sqrt{1 + THD_v^2}$$

$$P = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varphi$$

$$U = \sqrt{3} V_{RMS} I_{RMS}$$

$$fp = \frac{P}{U}$$

$$fp = \frac{\sqrt{3}V_1 I_1 \cos \varphi}{\sqrt{3}V_{RMS} I_{RMS}}$$

$$fp = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

Se debe entender muy bien la diferencia que existe entre factor de potencia y factor de potencia de desplazamiento, debido a que si no se atiende este detalle, se podría caer en la equivocación de creer que el sistema necesita ser compensado mediante la instalación de capacitores, cuando en realidad no es así, este pequeño traspié pudiese provocar que el banco de capacitores instalados; que no son necesarios, entren en resonancia con el resto de la red, provocando una serie de consecuencias nada gratas, llegando a la conclusión que la medicina se convierte en algo peor a la enfermedad.

2.7. Resonancia.

Este fenómeno eléctrico se vuelve de interés en el momentos que se intenta analizar los efectos que se producen en los bancos de capacitores debido a la presencia de distorsión armónica en la red; debido a que es común utilizar banco de condensadores en el bus principal de un sistema de distribución; así como, verlos en cualquier dispositivo que incluya electrónica, lo que produce que la corriente armónica interactúe con estos y con la impedancia del sistema (normalmente inductiva), lo que propicia las condiciones para la aparición de un fenómeno conocido como resonancia paralela lo que provoca calentamiento, disparos de protecciones y como consecuencia máxima daño de los materiales y equipos.

La resonancia se hace presente cuando la frecuencia armónica producida por una carga no lineal coincide con la frecuencia natural del sistema de potencia, es decir, cuando la reactancia inductiva del sistema es igual a la reactancia capacitiva que existe en el sistema.

$$X_L = X_C$$

$$f_r = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

En el caso de una red eléctrica de distribución donde existen múltiples bancos de capacitores instalados existen frecuencias de resonancias múltiples

Resonancia serie: Esta ocurre cuando la reactancia inductiva y capacitiva son iguales, de modo que el circuito consta únicamente con la parte resistiva, lo que provoca el incremento de la corriente (si la resistencia es pequeña).

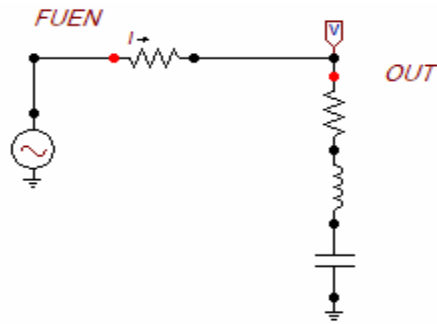


Ilustración 2. 13 circuito típico de resonancia serie.

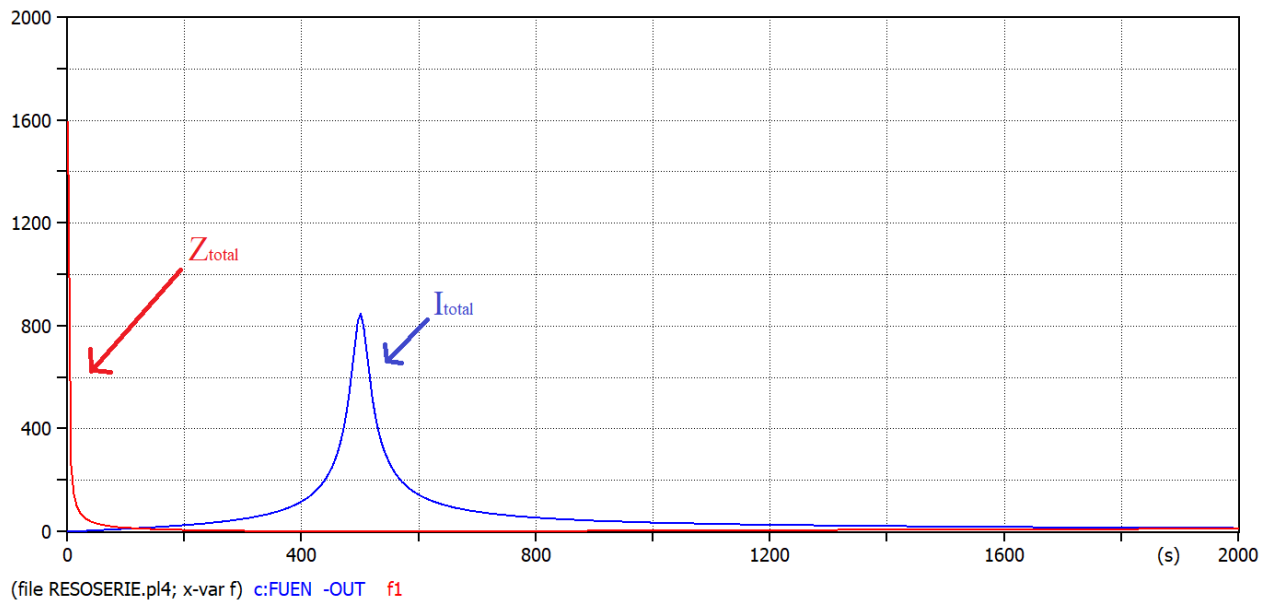


Ilustración 2. 14 característica de corriente e impedancia del circuito resonante en serie.

La resonancia serie genera corrientes desmedidamente grandes; dependiendo de la frecuencia domina la componente capacitiva o la componente inductiva.

Resonancia paralela: Ocurre cuando las impedancias de los elementos reactivos se igualan, estando estos en paralelo, lo que puede llegar a causar un aumento en la tensión del sistema.

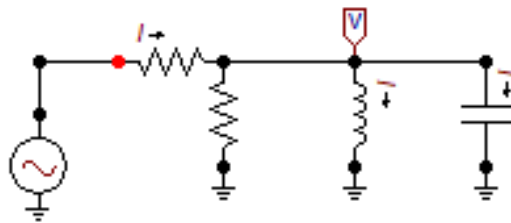


Ilustración 2. 15 Circuito típico resonancia paralelo.

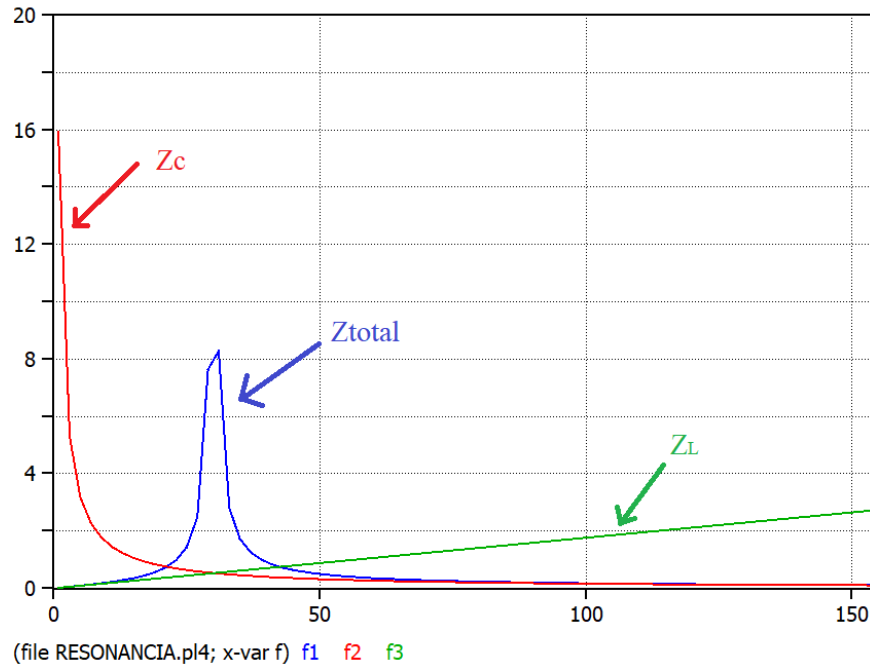


Ilustración 2. 16 Característica de impedancia del circuito resonante paralelo.

2.8. Transformadores de tierra

Un transformador de puesta a tierra es un transformador destinado principalmente a proporcionar un punto neutro para fines de puesta a tierra en sistemas trifásicos sin conexión a tierra, proporcionar una ruta de retorno para las corrientes de falla y para soportar una fase en falla a tierra. Las conexiones más comunes utilizadas son Wye-Delta o Zig-Zag (estrella interconectada). Un transformador de puesta a tierra generalmente está clasificado para soportar una corriente de cortocircuito específica durante un período de tiempo específico sin exceder los límites de temperatura específicos. [7]

Estos equipos cobran importancia, debido a que se está usando conexión estrella aterrizada de lado de la fuente para proteger a los generadores; quedando la conexión delta de lado de la carga (distribución, transmisión), lo que provoca que la línea se vea sin una referencia efectiva a tierra trayendo como consecuencia sobretensiones además de que las fallas línea-tierra no sean percibidas por las protecciones generando lo que se conoce como falla sostenida, tampoco se puede hablar de una conexión estrella-estrella porque este permite la filtración de armónicos.

En condiciones ideales de operación (sin que ocurra una falla, condiciones balanceadas y sin armónicos) el transformador de tierra no debería conducir corriente ya que está trabajando en vacío, no así en el instante que ocurre una falla, el equipo dirige la corriente al neutro del sistema para posteriormente ser drenadas a tierra y provocar la apertura de las protecciones si la falla lo amerita.

Conexión zigzag

Un transformador con conexión zig-zag está formado con una relación 1:1 con el primario y secundario conectados entre sí, la conexión zigzag provee un camino fácil hacia el neutro para las

corrientes en fase (de secuencia cero) pero no permite el flujo de corrientes que tengan un desfase de 120° entre sí, por tales razones esta conexión se utiliza para aterrizar una red eléctrica.

La impedancia del transformador para corrientes de secuencia positiva y negativa corresponde con su impedancia de excitación y puede ser considerada infinita con relación a las impedancias del resto del sistema.

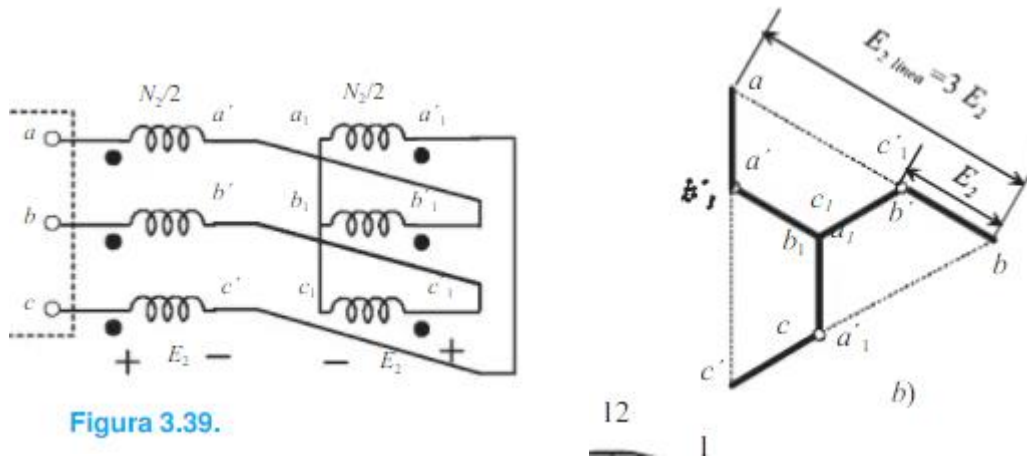


Figura 3.39.

Ilustración 2. 17 diagrama de conexión de un transformador Zig-Zag. [8]

Los valores nominales de los transformadores de tierra se basan en condiciones de funcionamiento estándar y deben incluir lo siguiente:

- a) Corriente térmica nominal
- b) Corriente continua nominal
- c) Voltaje
- d) Frecuencia
- e) Nivel de aislamiento de impulso básico (BIL) y clase de aislamiento
- f) Voltaje del circuito del sistema
- g) Servicio (interior o exterior)
- h) Tiempo (duración)
- i) Impedancia

2.8.1. Cálculo de transformador de tierra según IEEE Std. 32-1972 (1990)

Datos a ingresar para el cálculo:

Tensión de operación (V_L).

Nivel de falla trifásica. (I_{3f})

Nivel de falla monofásica ($3I_0$).

Continuous Duty Current in Percent of Thermal Current Rating		
Rated Time of Device	Reactors, Ground-Fault Neutralizers, and Transformers Used For Grounding	Resistors
	10 s	3
1 min	7	0
10 min	30	0
Extended Time	30	0

NOTE — Where there is a third harmonic component of current, it shall not exceed 15 percent of the rated continuous duty current.

Ilustración 2. 18 tabla 2 de IEEE Std. 32-1972 (1990) [9]

Como primer paso se calcula la potencia máxima o potencia de corta duración; esta se calcula con la tensión de operación y la corriente de falla máxima como sigue:

$$S_{max} = \frac{3I_0}{3} \times V_L$$

Luego para la potencia nominal del transformador, se debe multiplicar la potencia de corta duración por el factor de porcentaje de falla que aparece en la Ilustración 2. 18 dependiendo del tiempo de ajuste de los elementos de protección.

$$S_{nom} = F_t \times S_{max}$$

F_t : factor en porcentaje tomado de la tabla 2 de IEEE Std. 32-1972 (1990) mostrado en la Ilustración 2. 18.

También se debe especificar la impedancia de secuencia del transformador, como se indica a continuación.

Se calcula la impedancia de falla del sistema, con el nivel de falla trifásico.

$$Z_F = \frac{V_{LN}}{I_{3f}}$$

Luego se calcula la impedancia total del sistema como sigue.

$$Z_{Tot} = \frac{V_{LN}}{I_0}$$

Con los resultados anteriores se calcula la impedancia de secuencia a continuación.

$$Z_0 = Z_{Tot} - 2 \times Z_F$$

2.9. Filtros para armónicas

De manera extensa un filtro es un dispositivo que deja pasar ciertos elementos deseados y rechaza los demás; como algunos ejemplos podemos tener: coladores, zarandas, redes de pesca, mascarillas entre otros.

En el ámbito de nuestro interés, un filtro es un circuito que se diseña para dejar pasar señales con frecuencias deseadas y rechazar o atenuar otras no deseadas. Por definición, un filtro exhibe una pequeña impedancia a la frecuencia de sintonización, mientras que, a las demás frecuencias su impedancia es alta.

Un filtro para armónicas es un circuito RLC que sirve de camino de baja impedancia para las frecuencias armónicas que se desean mitigar o eliminar; mientras que, a la frecuencia fundamental, su impedancia es capacitiva, suministrando potencia reactiva a la red eléctrica.

Tipos:

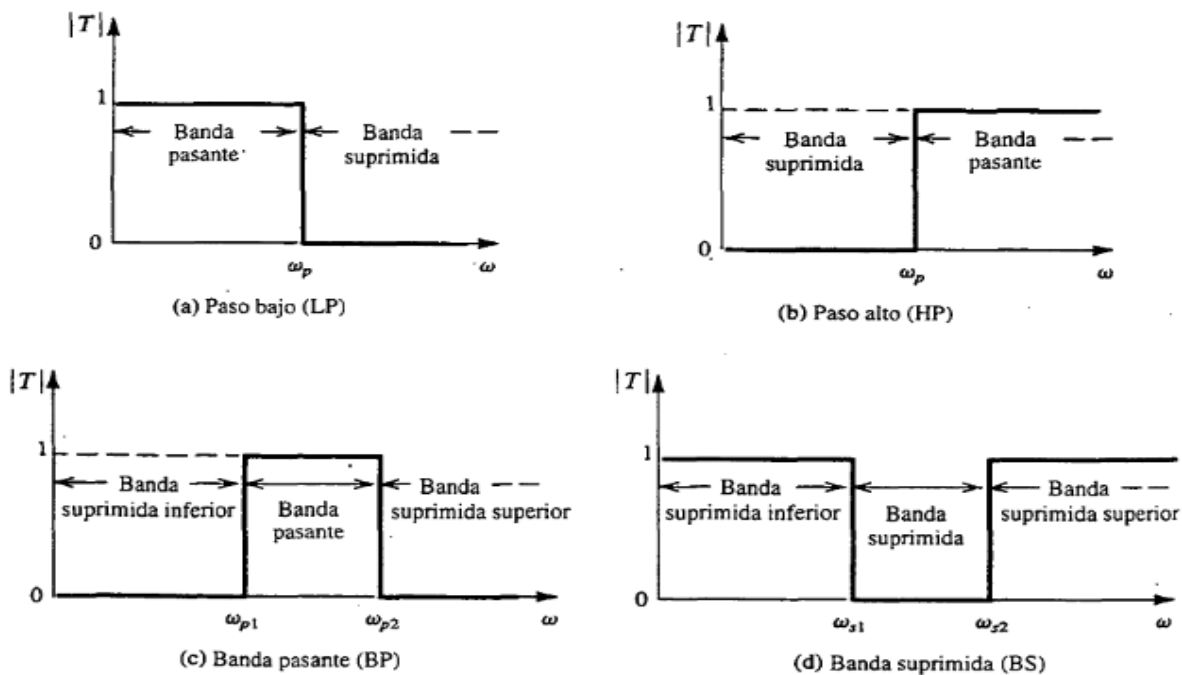


Fig. 11.2 Curvas características de transmisión ideales de los cuatro tipos principales de filtros: (a) de paso bajo (LP); (b) de paso alto (HP), (c) de banda pasante (BP), y (d) de banda suprimida (BS).

Ilustración 2. 19 Imagen tomada del capítulo 11 de "Circuitos microelectrónicos" [10]

Existen cuatro tipos de filtros pasivos, los cuales son paso bajo, paso alto, pasa banda y rechaza banda.

Filtros paso bajo permite la circulación de frecuencias que estén por debajo de su frecuencia de corte o sintonización y se vuelve una barrera para frecuencias que estén por encima de esta, lo cual es el comportamiento inverso al del filtro paso alto; el cual muestra baja impedancia para

frecuencias que superen a su frecuencia de corte y se vuelve una barrera para las que estén por debajo.

Un filtro paso banda posee dos frecuencias de corte entre las cuales se encuentra la llamada banda de paso, cualquier señal por abajo o arriba de estas frecuencias será amortiguada significativamente; por su parte, el filtro rechaza banda, poseen dos frecuencias de corte entre las cuales se encuentra la banda de rechazo, en la cual cualquier señal que este dentro de estas frecuencias, será atenuada.

Existe también un tipo de filtro especial conocido como filtro pasa todo, el cual no afecta la magnitud de la señal que lo atraviesa, pero si a su fase.

Funcionamiento:

Paso bajo: deja pasar las frecuencias por debajo de una frecuencia determinada y rechaza las frecuencias por encima de esta, esto se da debido a que, el arreglo de sus elementos presenta una baja impedancia a frecuencias bajas la cual va aumentando a medida que la frecuencia aumenta.

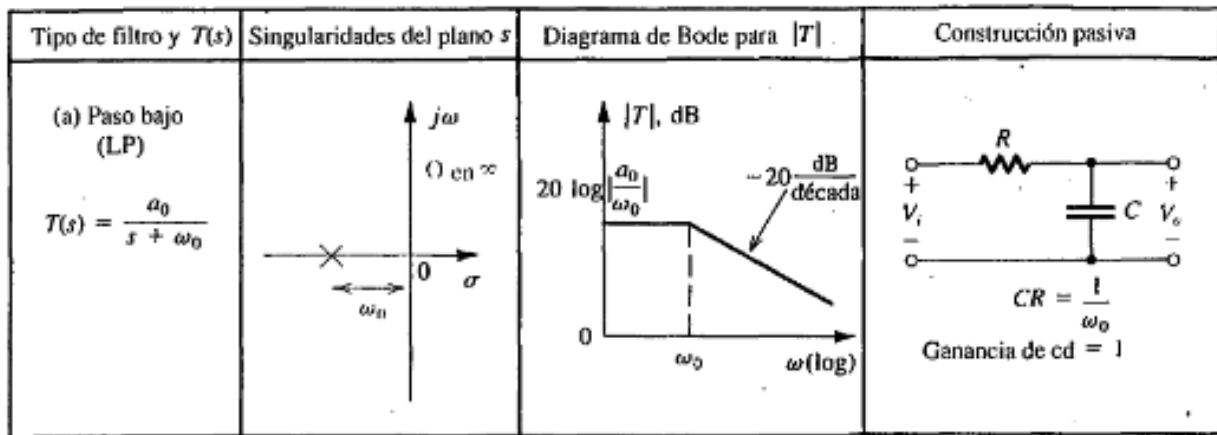


Ilustración 2. 20. Características de un filtro paso bajo [10]

Paso alto: deja pasar las frecuencias arriba del umbral de una frecuencia especificada y rechaza las frecuencias por debajo de esta, de manera similar al filtro paso bajo, este exhibe una impedancia alta a bajas frecuencias y va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta.

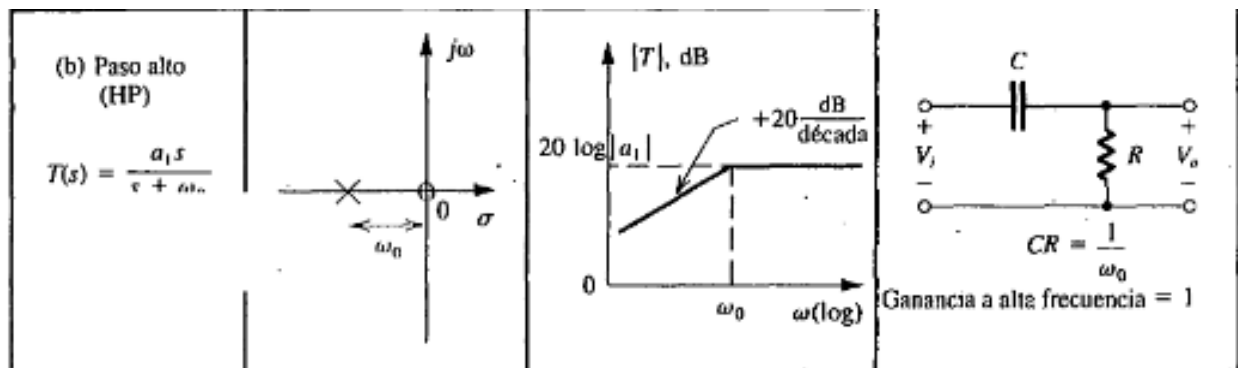


Ilustración 2. 21 Características de un filtro paso alto. [10]

Pasa banda: deja pasar las frecuencias de una banda determinada y rechaza todas aquellas fuera de esta, al igual que en los filtros anteriores, este también presenta una baja impedancia para las frecuencias deseadas y una alta impedancia para aquellas que están fuera del rango de frecuencias de la banda de paso.

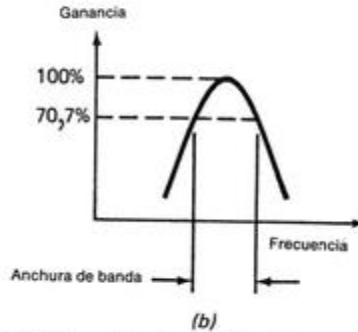


Fig. 9-26 Filtro activo de paso de banda.

Ilustración 2. 22 característica de magnitud de un filtro paso banda. [11]

Rechaza banda: deja pasar todas las frecuencias excepto las de una banda determinada, al contrario del filtro pasa banda este exhibe una alta impedancia entre las frecuencias de la banda de rechazo y presenta una impedancia menor para las frecuencias fuera de esta.

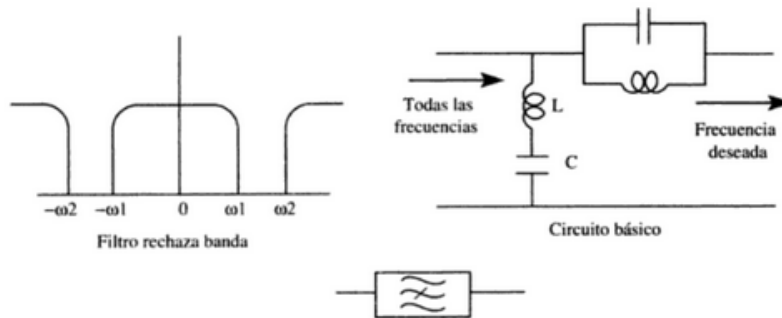


Figura 3.18. Símbolo para el filtro rechaza banda

Ilustración 2. 23 Circuito y característica de un filtro rechaza banda. [12]

Los filtros más comúnmente usados para la mitigación de armónicos se muestran en la siguiente Ilustración.

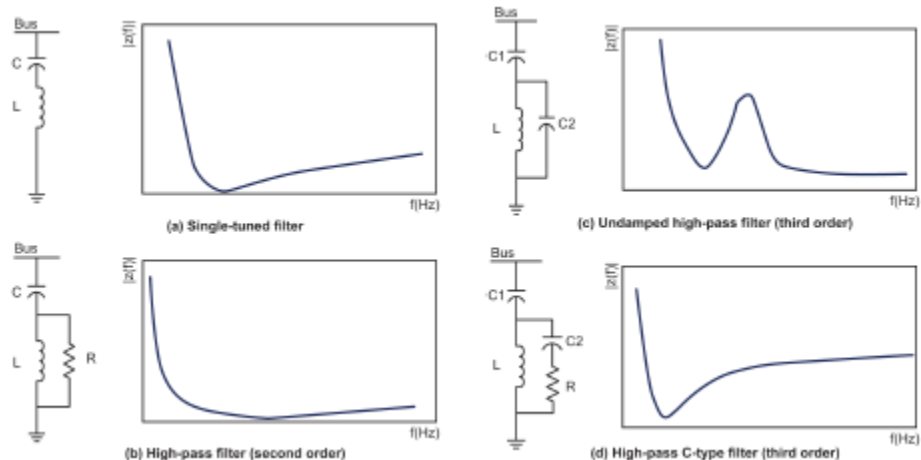


Ilustración 2. 24 filtros comúnmente utilizados para la mitigación de armónicos [13]

2.10. Regulaciones

Regulación:

El término suele utilizarse como sinónimo de normativa. La regulación, por lo tanto, consiste en el establecimiento de normas, reglas o leyes dentro de un determinado ámbito.

Para el caso en estudio, las regulaciones dictan los niveles que se consideran aceptables o no, para determinado indicador como lo pueden ser: THD, TDD, Fp, entre otros. El establecimiento de estos límites ayuda al correcto funcionamiento de las redes de distribución, así como también ayudan a establecer una referencia para evaluar el estado de una red en específico.

Regulaciones para distorsión armónica vigentes:

Existen varias regulaciones y recomendaciones a nivel internacional con respecto al tema de armónicos, entre algunas podemos mencionar

IEEE 519 “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”

IEC 61000-3-6 “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems”;

IEEE 3002.8 “IEEE Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems”

IEC 61000-3-14 “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems”

Regulaciones en curso en el salvador:

La regulación que rige los límites armónicos permisibles en la red eléctrica en El Salvador es el acuerdo de SIGET 192-E-2004 “Normas de calidad del servicio de los sistemas de distribución”

en el cual se establecen los límites permisibles de distorsión en tensión y corriente; así como los indicadores que sirven para medir estos límites y la manera en que deben ser medidos.

En las siguientes tablas se presentan los límites permisibles en dichas regulaciones, así como también los límites dictados por el estándar 519-1992 de IEEE para tener un punto de comparación entre estas.

Tabla No. 4 – Límites de distorsión armónica de voltaje en redes de media y baja tensión

Órdenes impares no múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes impares múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes pares (n)	Tasa de distorsión individual (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/n$				
LÍMITE DE LA TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL = 8 %					

Ilustración 2. 25 Tabla 4 de la Norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución, SIGET.

Tabla 5 – Límites de distorsión armónica de la corriente de carga en media y baja tensión

Orden de la armónica (n)	Potencia < 3.5 kW	Potencia ≥ 3.5 kW
	Intensidad de la Componente Armónica (amperios)	Distorsión Armónica Individual de Corriente (%)
Órdenes impares no múltiplos de 3	5	2.28
	7	1.54
	11	0.66
	13	0.42
	17	0.26
	19	0.24
	23	0.20
	25	0.18
>25	$4.5/n$	$0.2+0.8*25/n$
Órdenes impares múltiplos de 3	3	4.60
	9	0.80
	15	0.30
	21	0.21
	>21	$4.5/n$
Órdenes pares	2	2.16
	4	0.86
	6	0.60
	8	0.46
	10	0.37
	12	0.31
	>12	$3.68/n$
Distorsión Armónica Total de Corriente (%)		20

Ilustración 2. 26 Tabla 5 de la Norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución, SIGET.

Table 10.3
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	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	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

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Ilustración 2. 27 Tabla 10.3 del estándar IEEE 519-1992.

Table 11.1
Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

Ilustración 2. 28 Tabla 11.1 del estándar IEEE 519-1992.

Con respecto a los límites mencionados en la tabla de valores permitidos por IEEE 519.

- Las armónicas pares no pueden exceder el 25% de los valores citados en la tabla
- Para tensiones superiores a 69 kV son la mitad de los valores citados en la tabla para tensiones menores a 69 kV
- Independientemente de la relación $\frac{I_{sc}}{I_L}$, todos los equipos de generación de armónicos tienen como límite, los valores dados en el primer renglón de la tabla, es decir, los valores de la fila de $\frac{I_{sc}}{I_L} < 20$

- No se permite existencia de componente de CD
- Los valores mostrados en las tablas, son los máximos permitidos bajo condiciones de operación normal. Durante la puesta en marcha o condiciones de operación inusuales o anormales que duren menos de una hora, estos límites pueden excederse un 50%

3. Capítulo 3. Análisis de armónicos en una subestación de distribución

Para efectos prácticos de este documento analizaremos una subestación eléctrica de 150 MVA ubicada en el área metropolitana, la cual presenta cierta anomalía en su funcionamiento, como es el tema de una corriente de tamaño considerable circulando por el neutro, una de las posibles causas es el efecto de la circulación de corrientes armónicas múltiplos del orden tres (triplens).

Es por ello que este capítulo tiene como propósito principal analizar cada uno de estos circuitos, comparar sus datos con los límites establecidos por el acuerdo SIGET 192-E-2004 "Normas de calidad del servicio de los sistemas de distribución", así como también verificar estos resultados de acuerdo al estándar IEEE 519-1992 "Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas de potencia", con esto se pretende encontrar el circuito de esta subestación que más problemas de nivel armónico presenta, para en apartados posteriores encontrar un modelo eléctrico simplificado que reproduzca en una simulación y de manera fiel el comportamiento del sistema, para con esto formular una serie de soluciones que ayuden a mitigar y solventar las contrariedades encontradas.

Para llevar a cabo el trabajo de este capítulo, se facilitaron ciertas mediciones eléctricas de los circuitos de la subestación, mediciones que fueron obtenidas en intervalos de quince minutos durante una semana, reproduciendo de forma muy fiable las condiciones que reza el acuerdo SIGET 192-E-2004; también, las mediciones hechas en el transformador de tierra correspondientes a la corriente de neutro.

Los datos ofrecidos por cada fase (A, B, C) fueron: tensión rms, corriente rms, THD de tensión, THD de corriente, factor de potencia (en ocasiones), magnitud del armónico de tensión y corriente del uno al veinticinco.

Un dato que no se nos facilitó es el TDD, sin embargo se obtuvo utilizando los datos proporcionados y la respectiva ecuación, esto porque el dato que representa el THD tiende a ser incompleto, inclusive a veces engañoso esto se debe a que en algún momento del análisis el THD podría tener valores exageradamente grandes, que claramente rompen las reglas impuestas por la norma sobre calidad de energía, sin embargo estos momentos podrían darse en momentos que la demanda de potencia sea muy pequeña, lo que provocaría que el contenido armónico no sea tan perjudicial.

Otro dato que es importante analizar es el factor de potencia, ya que la solución que se pretende plantear en este documento es el diseño de filtro pasivo para armónicos, los cuales se calculan en base a cierta potencia reactiva que se intenta compensar, esto indica que para aplicar correctamente el diseño de un filtro pasivo a un circuito, este debe poseer un factor de potencia que permita corrección, para al aplicar el filtro se compense y quede con un valor que cumpla lo establecido por la normativa, ya que si se tiene un valor de factor de potencia mayor a la unidad, se pueden generar efectos dañinos en la red eléctrica.

3.1. Preparación de los datos

En las siguientes tablas se muestra un pequeño resumen de los circuitos y sus niveles de potencia.

Tabla 3. 1 Potencia máxima de circuitos de Bus 1

CKT	Potencia máxima diaria [MW]
11	13.6
12	10.1
14	4.0
15	5.4
18	4.4
19	7.3
22	20
Total	64.8

Tabla 3. 2 Potencia máxima de circuitos de Bus 2

CKT	Potencia máxima diaria [MW]
13	21.3
16	10.6
17	13.9
21	13.2
Total	59.0

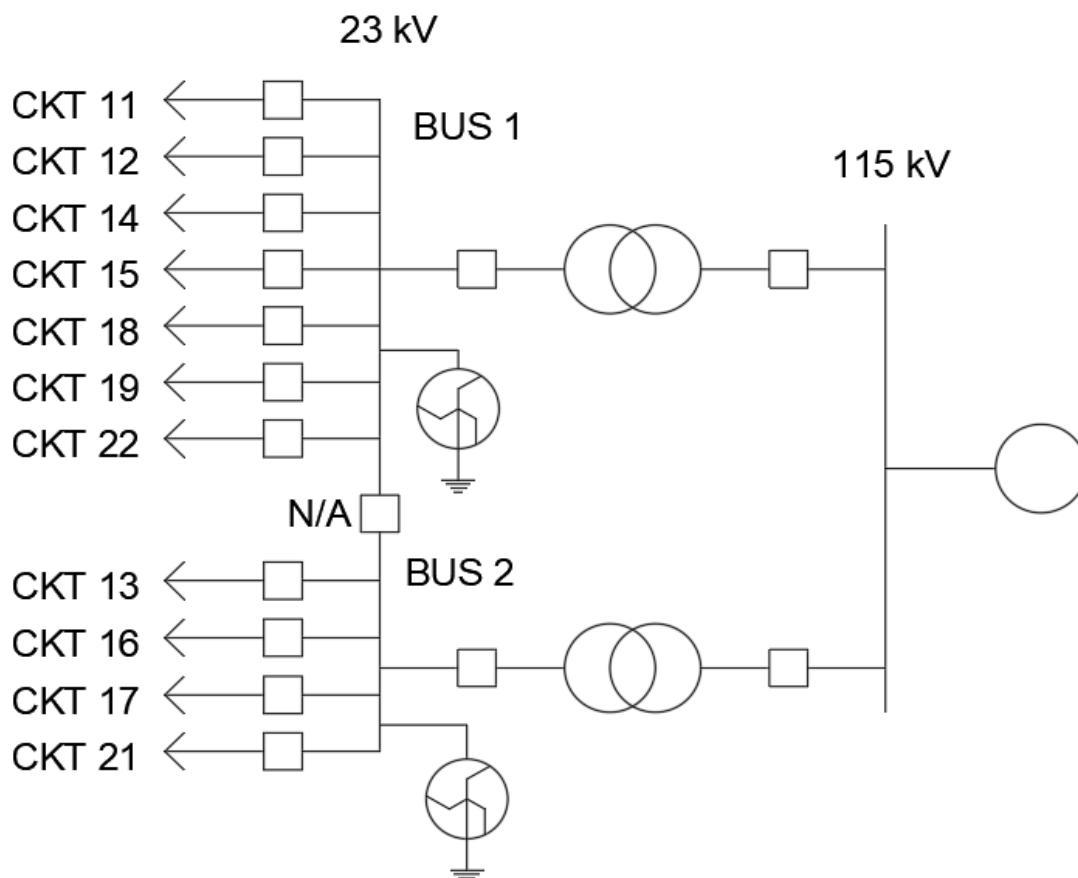


Ilustración 3. 1 diagrama unifilar representativo de la distribución de los circuitos.

3.2. Determinación de los niveles iniciales de los indicadores

Para propósitos de comparación de ciertos parámetros y con los datos mostrados anteriormente se procederá a calcular la corriente máxima que puede entregar cada circuito y la razón entre la corriente de corto circuito y la corriente máxima. Para el circuito 11 tenemos:

$$I_L = \frac{13.6 \text{ MW}}{\sqrt{3} \times 23 \text{ kV}} = 341.39 \text{ A} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{13.5 \text{ kA}}{341.39 \text{ A}} = 22.69 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Tabla 3. 3 Resumen de cálculo de corrientes y relación de corto circuito.

CKT	I_L	$\frac{I_{sc}}{I_L}$
11	341.39	39.54
12	253.53	53.25
13	534.68	25.25
14	100.41	134.45
15	135.55	99.59
16	266.08	50.74
17	348.92	38.69
18	110.45	122.23
19	183.25	73.67
21	331.35	40.74
22	502.04	26.89

A continuación, se presentarán las gráficas de los datos de interés en cada circuito, con el propósito de comparar y seleccionar el circuito que posea las características más críticas.

Para cada una de las gráficas se hará los comentarios necesarios

3.2.1. Gráficas CKT 11

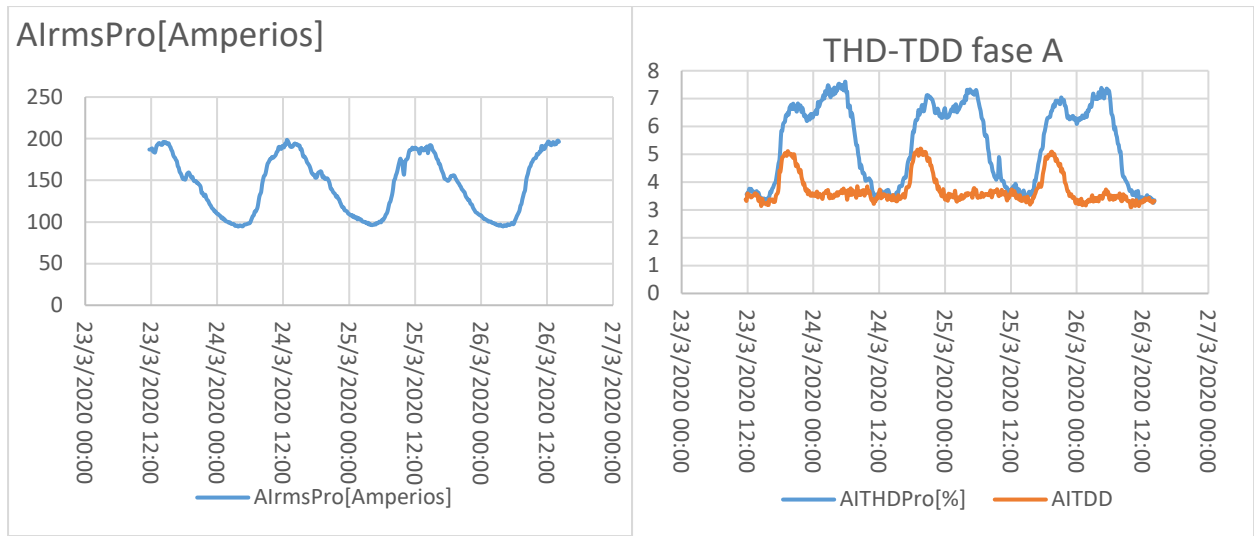


Ilustración 3. 2 Perfil de carga de circuito 11 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

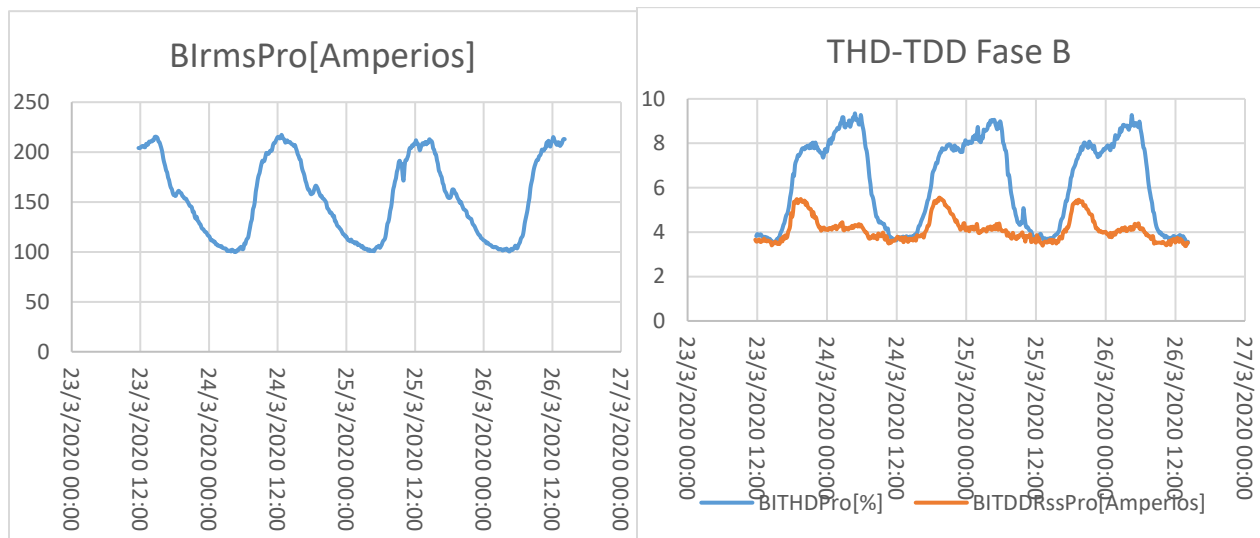


Ilustración 3. 3 Perfil de carga de circuito 11 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

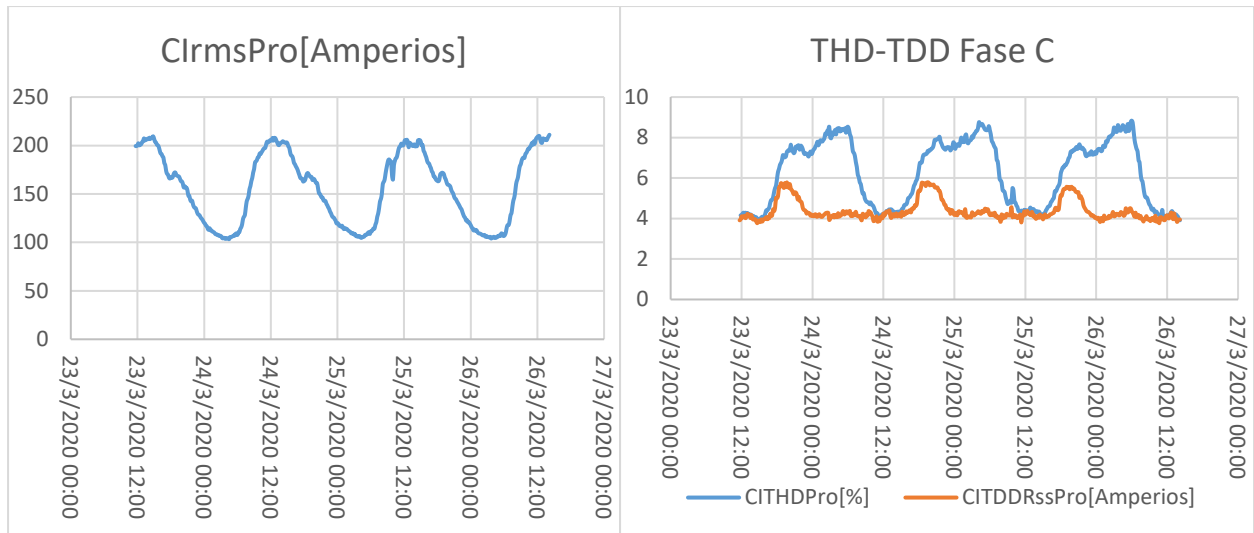


Ilustración 3. 4 Perfil de carga de circuito 11 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

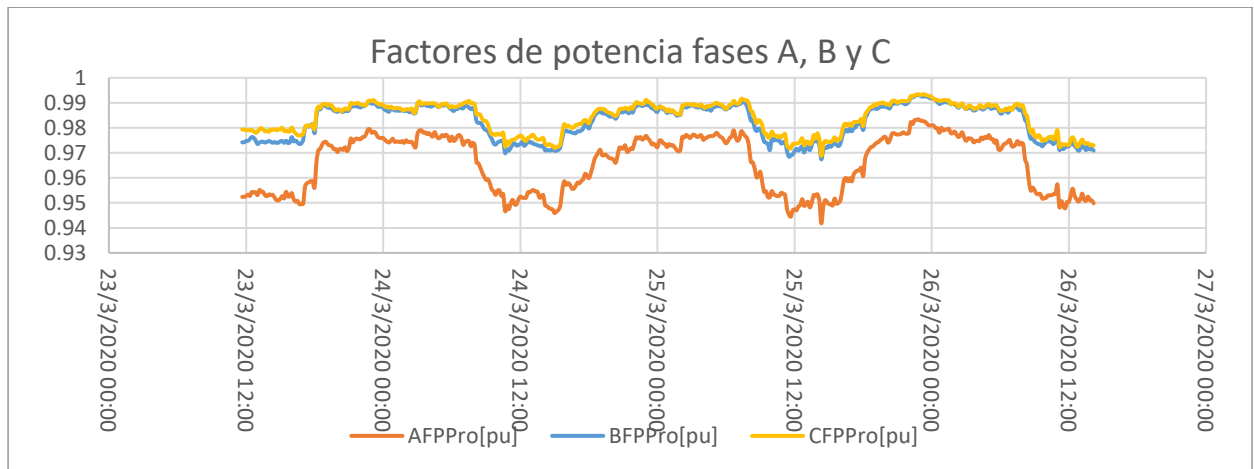


Ilustración 3. 5 Factores de potencia por fase del circuito 11.

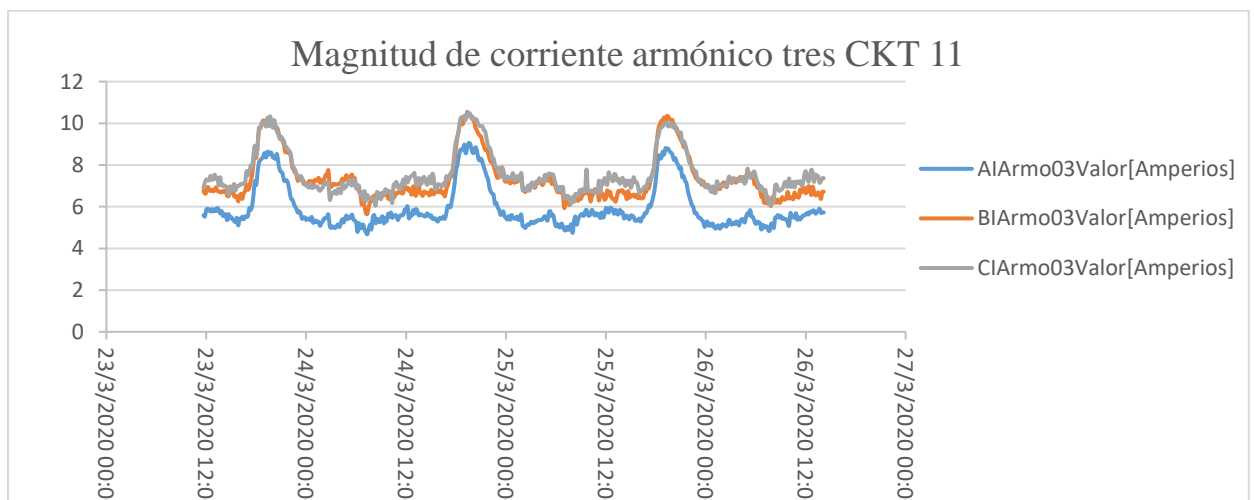


Ilustración 3. 6 Comportamiento del tercer armónico por fase del circuito 11.

El circuito 11 no presenta valores fuera de lo establecido en las regulaciones, ya que si bien es cierto presenta pequeños intervalos con porcentajes de THD elevados, lo cual lo podría hacer causa de análisis; sin embargo, al prestar atención al perfil de carga mediante I_{RMS} , podemos salvar el detalle, que los valores más elevados de THD, están perfectamente sincronizados con los valores más pequeños de consumo de corriente; lo que permite expresar que, ante esta situación el THD no es perjudicial, debido a que no ocurre en el momento de máxima carga; también, al observar el factor de potencia de este circuito, este se encuentre dentro de un rango aceptable de valores.

3.2.2. Gráficas CKT 12

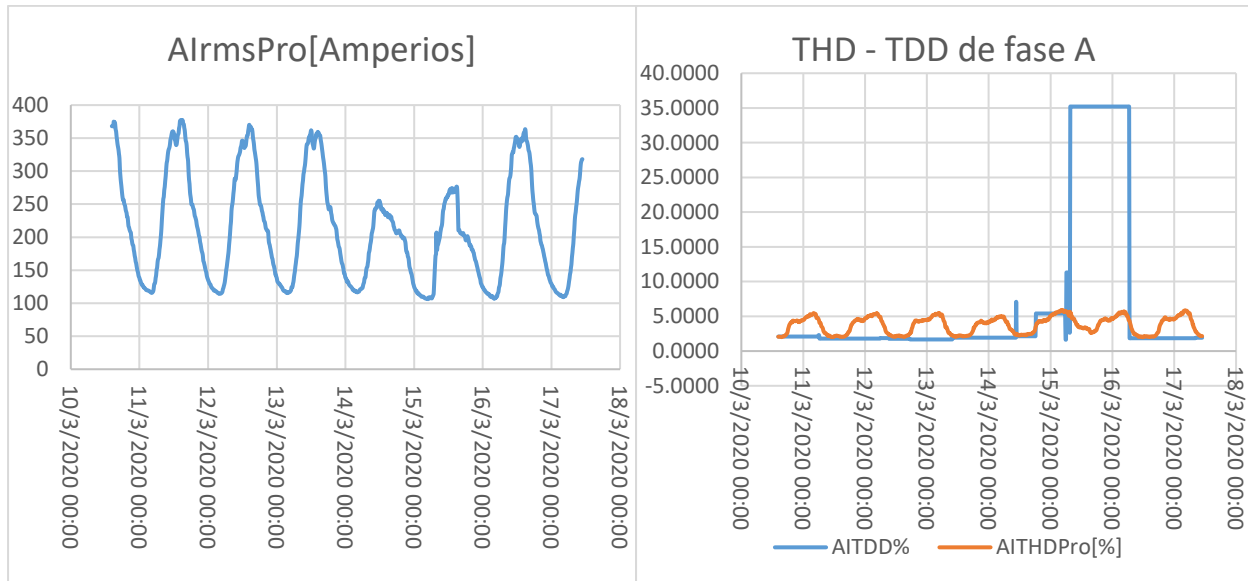


Ilustración 3. 7 Perfil de carga de circuito 12 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

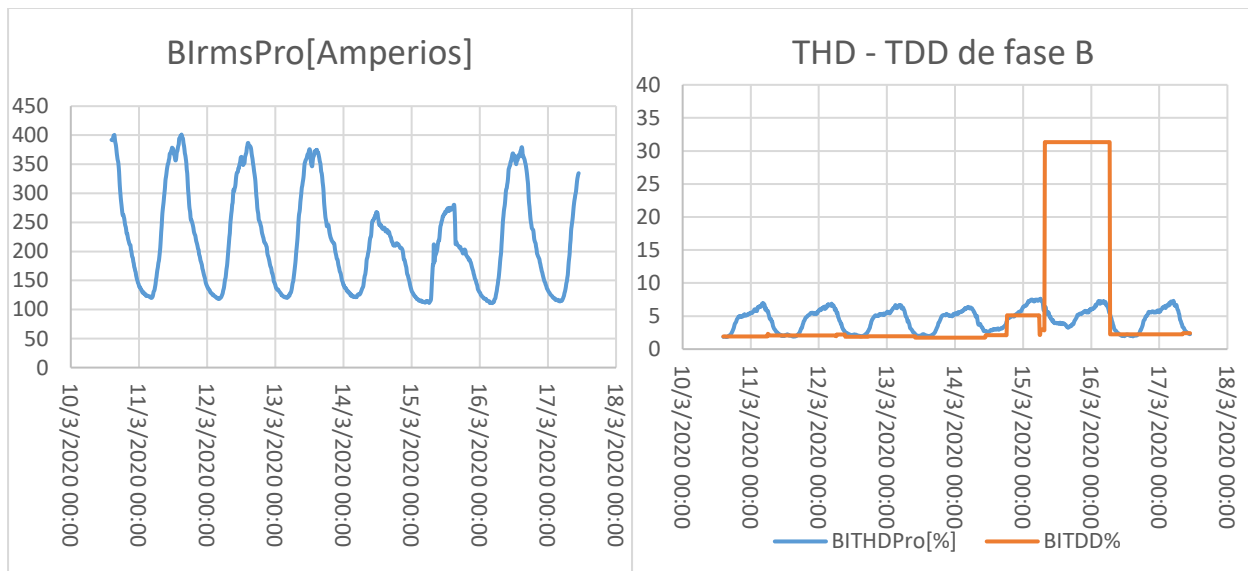


Ilustración 3. 8 Perfil de carga de circuito 12 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

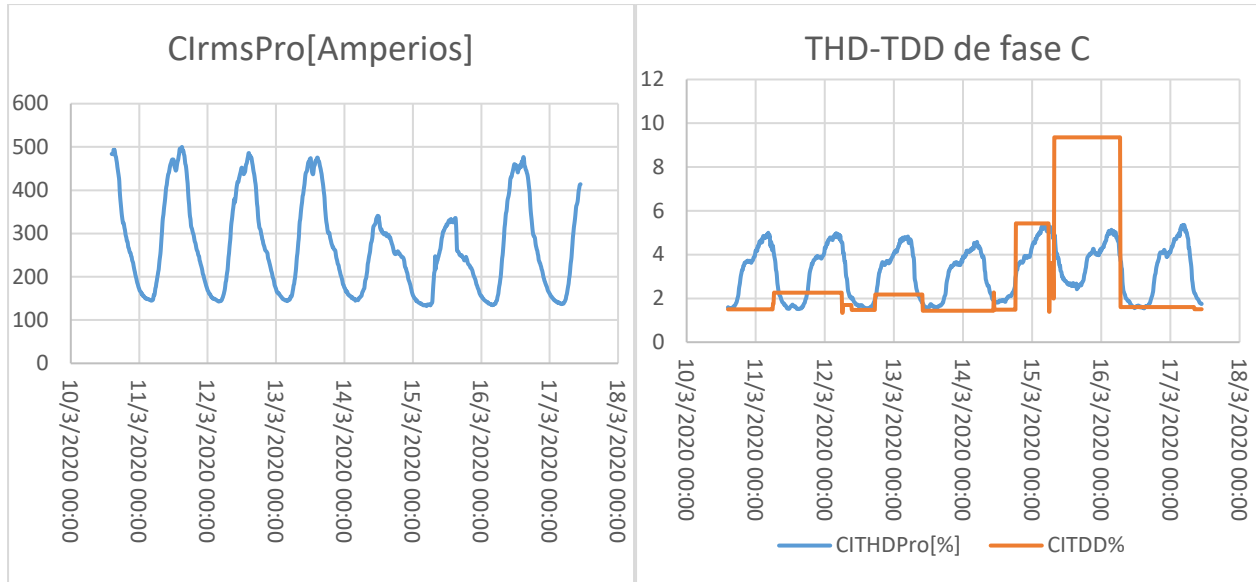


Ilustración 3. 9 Perfil de carga de circuito 12 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

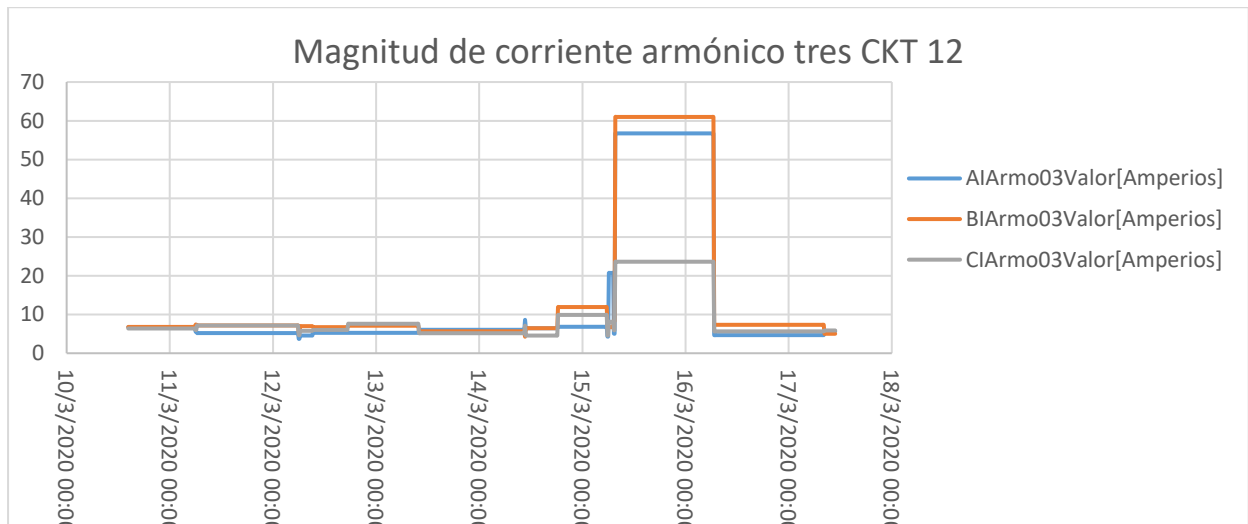


Ilustración 3. 10 Comportamiento del tercer armónico en todas las fases del circuito 12.

El circuito 12 presenta cierta peculiaridad dentro de sus valores de TDD los cuales rebasan los límites permitidos por las regulaciones; sin embargo, esto pudo deberse a un error en la medición, ya que al ver la tendencia del perfil de carga este no presenta algún evento inusual en el periodo en que el TDD rebasa los límites; además, el THD tampoco presenta anomalías en ese intervalo y más bien presenta una tendencia regular.

3.2.3. Gráficas CKT 13

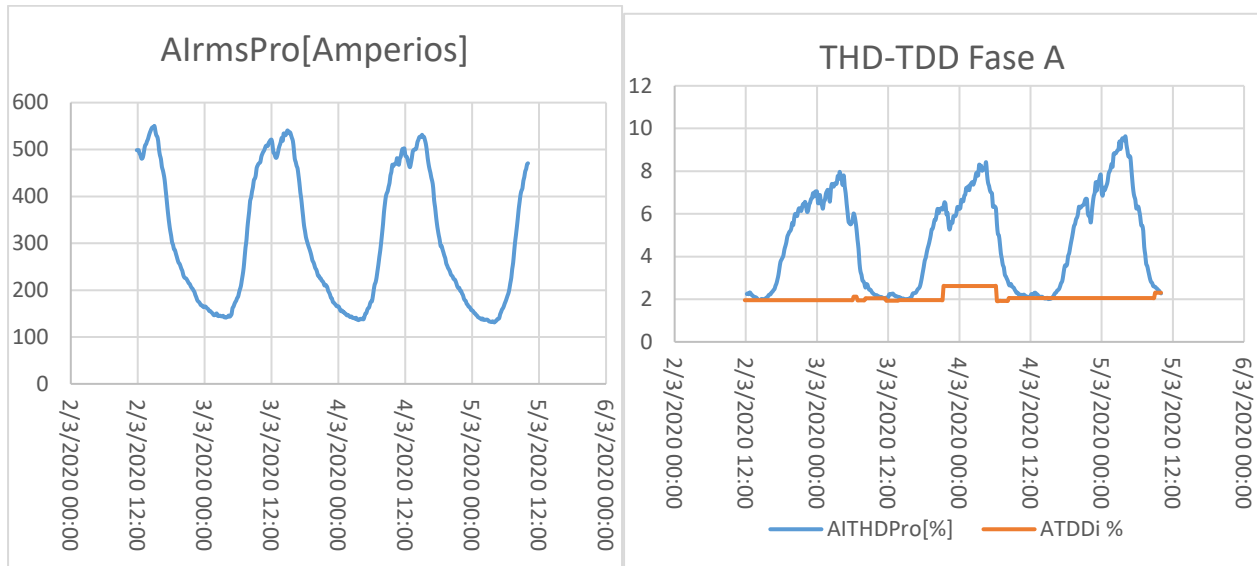


Ilustración 3. 11 Perfil de carga de circuito 13 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

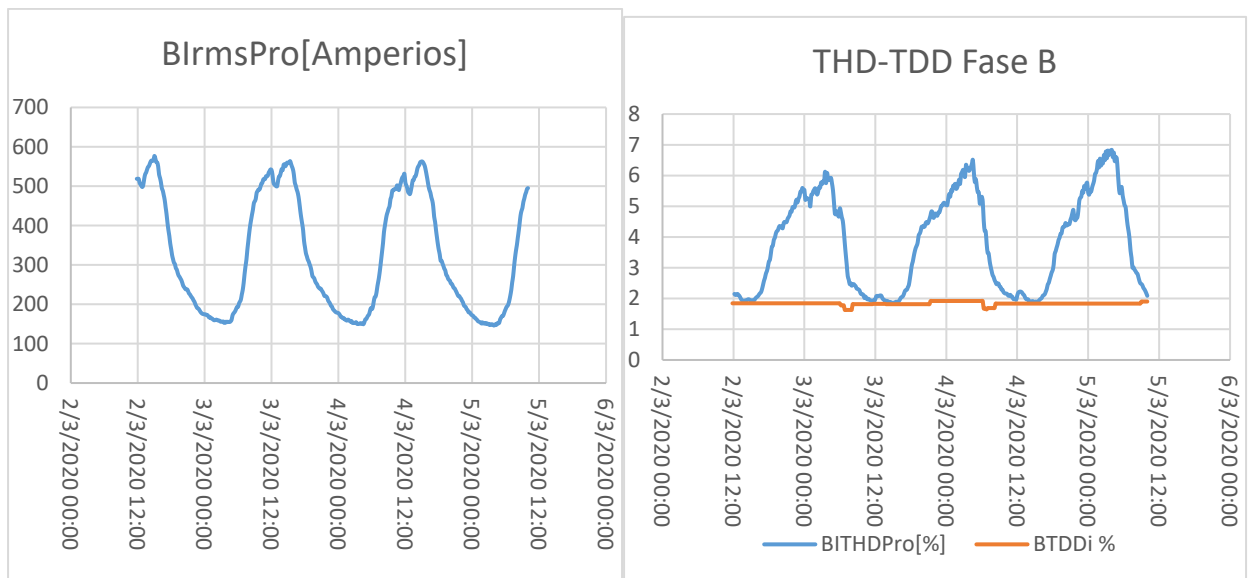


Ilustración 3. 12 Perfil de carga de circuito 13 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

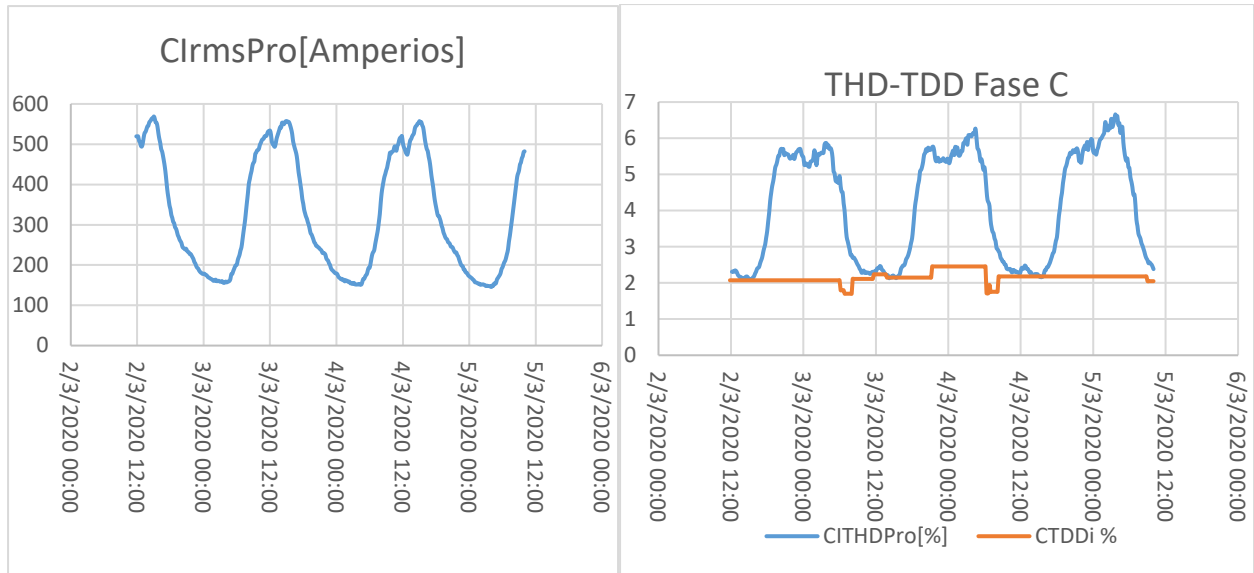


Ilustración 3. 13 Perfil de carga de circuito 13 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

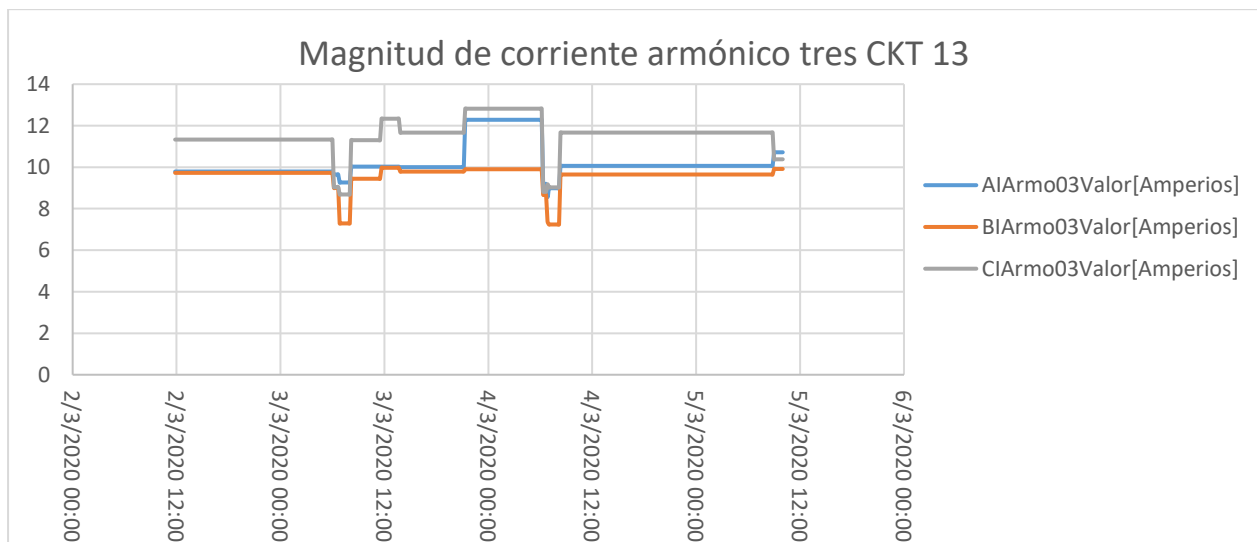


Ilustración 3. 14 Tendencia del tercer armónico en las tres fases del circuito 13.

Para el circuito 13 en este no se observa valores que hagan considerarlo para análisis, ya que su THD y TDD se encuentran en valores que no sobrepasan los límites que dictan las regulaciones, para el armónico tres se observan valores que sobrepasan los aceptados por IEEE pero estos ocurren en un valle de la tendencia de la gráfica del perfil de carga, lo cual los descarta como datos relevantes.

3.2.4. Gráficas CKT 14

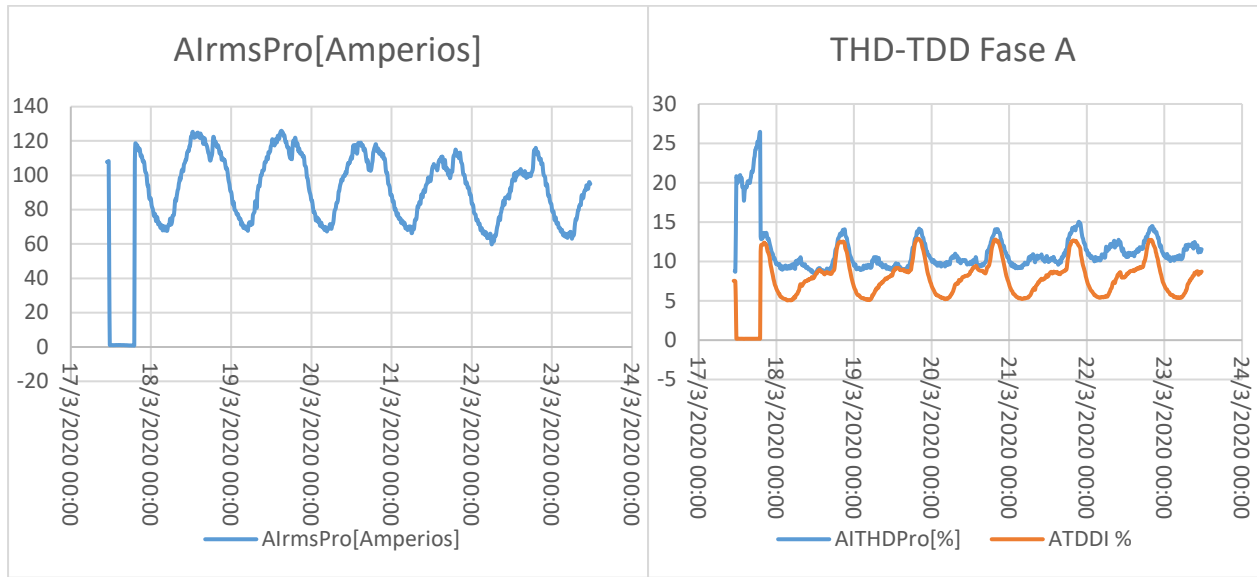


Ilustración 3. 15 Perfil de carga de circuito 14 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

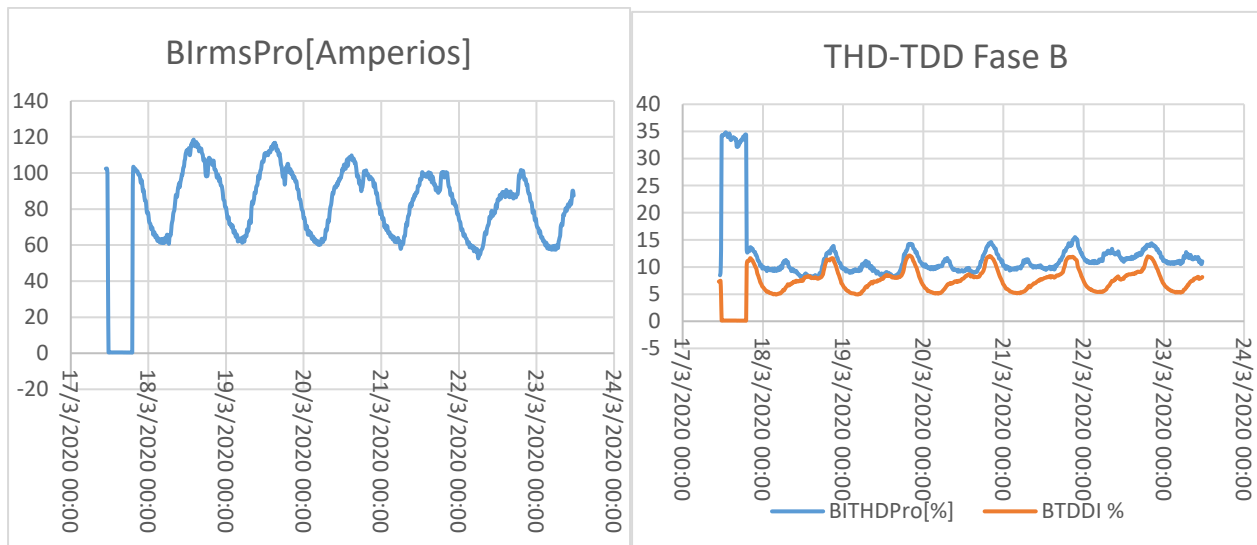


Ilustración 3. 16 Perfil de carga de circuito 14 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

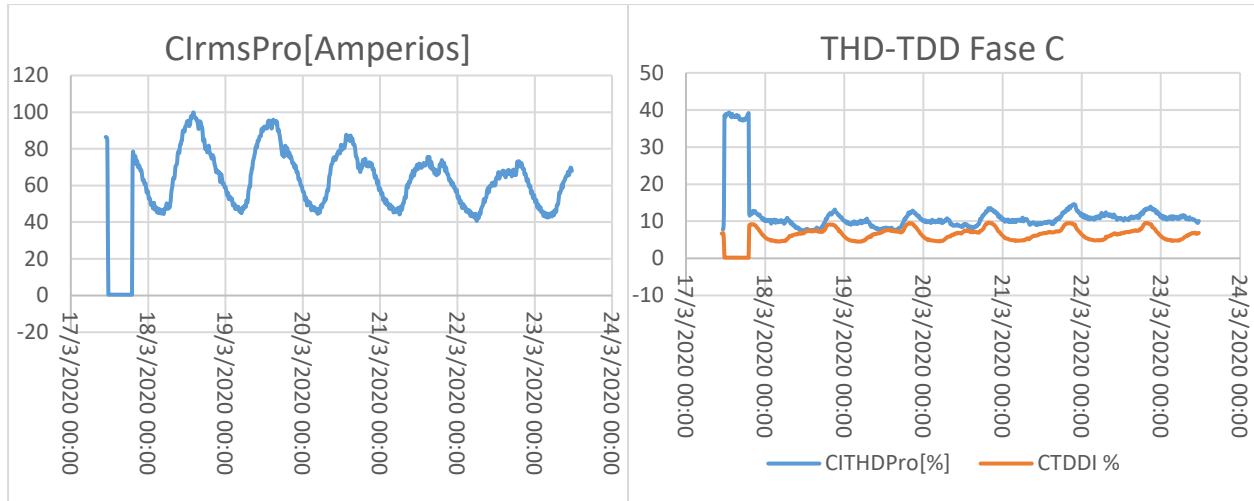


Ilustración 3. 17 Perfil de carga de circuito 14 fase C (grafica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

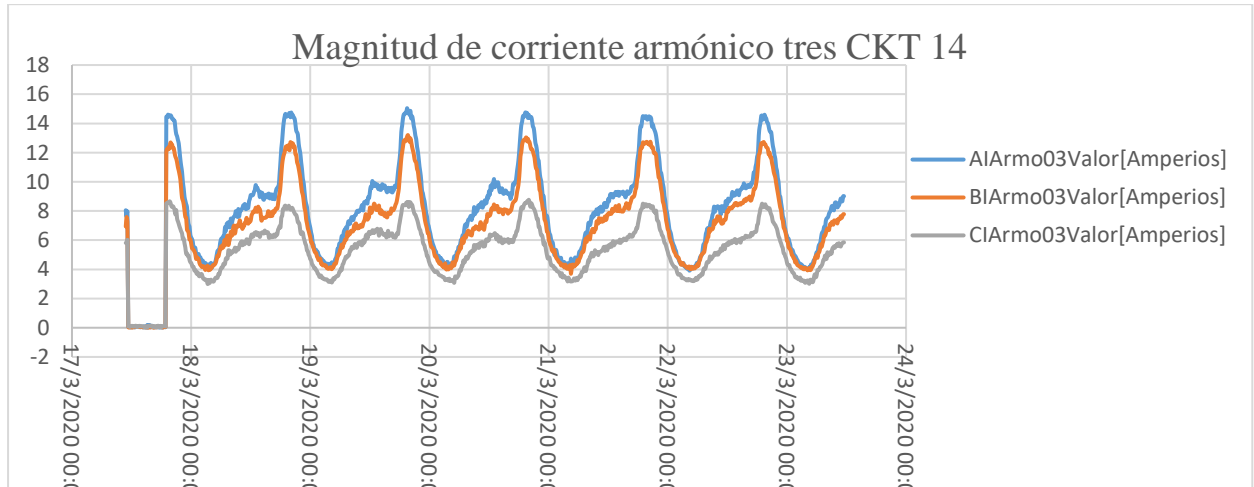


Ilustración 3. 18 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 14.

En el circuito 14 se notó que, en ciertos intervalos, el TDD sobrepasaba lo establecido en IEEE, esto lo hace en periodos de alrededor de dos horas y la condición de carga donde sucede, es de un valor considerable, ya que está cerca de la de mayor consumo; para notar esto se presenta las gráficas de la fase A de TDD e I_{RMS} a continuación (Ilustración 3. 19), los valores del eje secundario (derecha) corresponden a la corriente y el eje principal (izquierda) es el porcentaje de TDD; como se aprecia en el trazo azul la condición de carga en el momento del pico de TDD está muy cerca de la cresta, lo que indica que esta distorsión si es significativa.

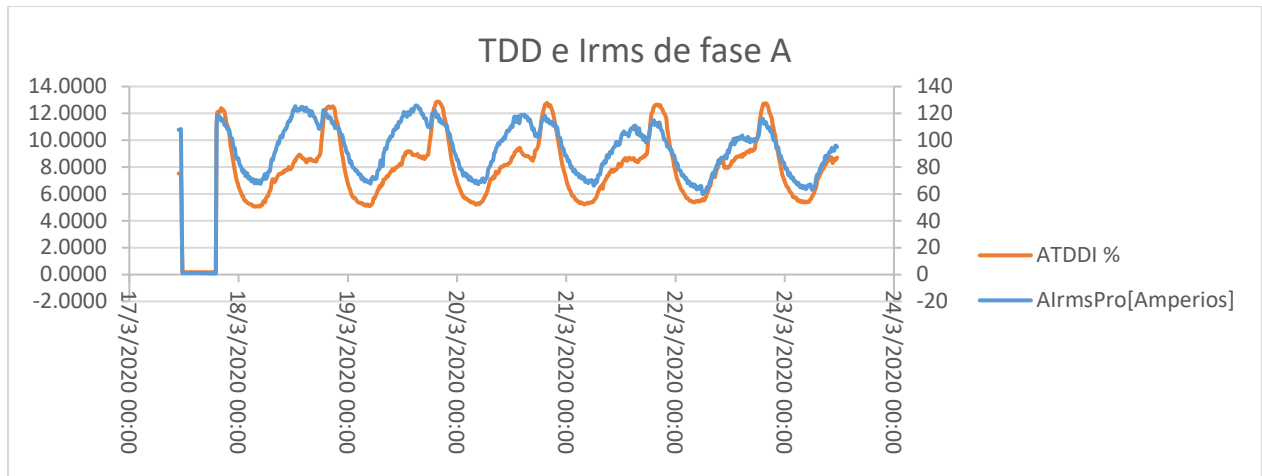


Ilustración 3. 19 Comparación de TDD con el perfil de carga de fase A del circuito 14.

3.2.5. Gráficas CKT 15

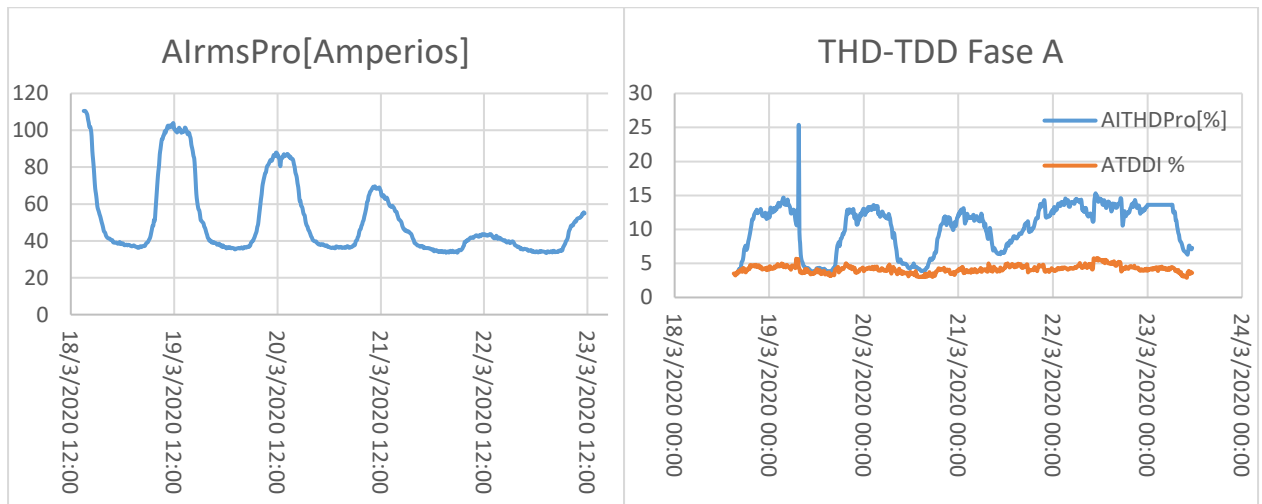


Ilustración 3. 20 Perfil de carga de circuito 15 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

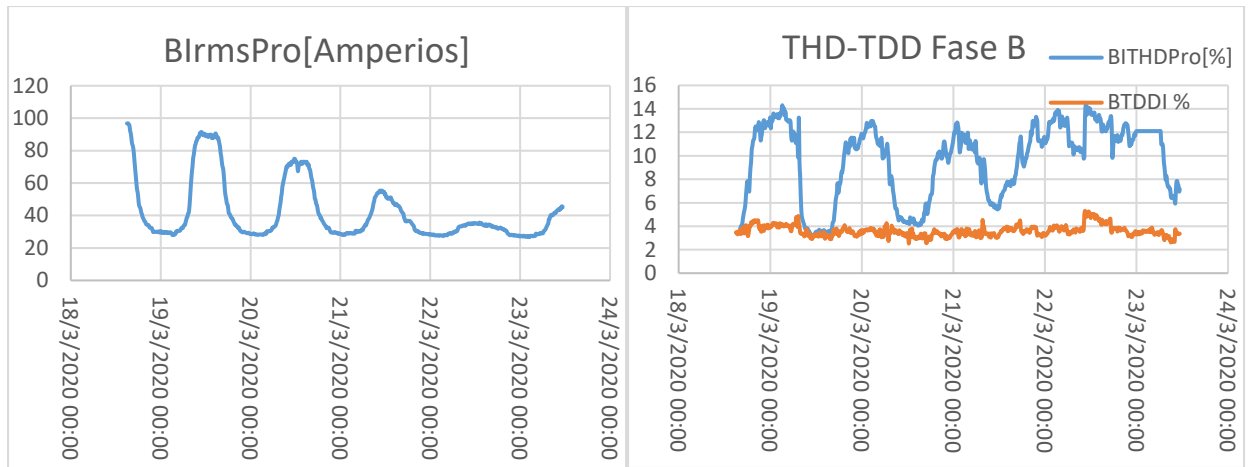


Ilustración 3. 21 Perfil de carga de circuito 15 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

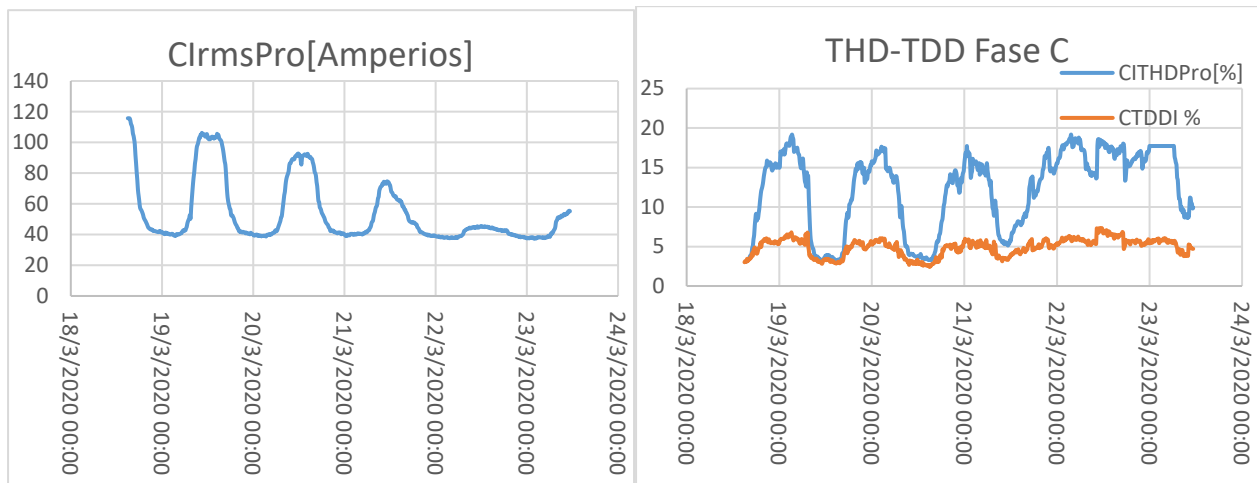


Ilustración 3. 22 Perfil de carga de circuito 15 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

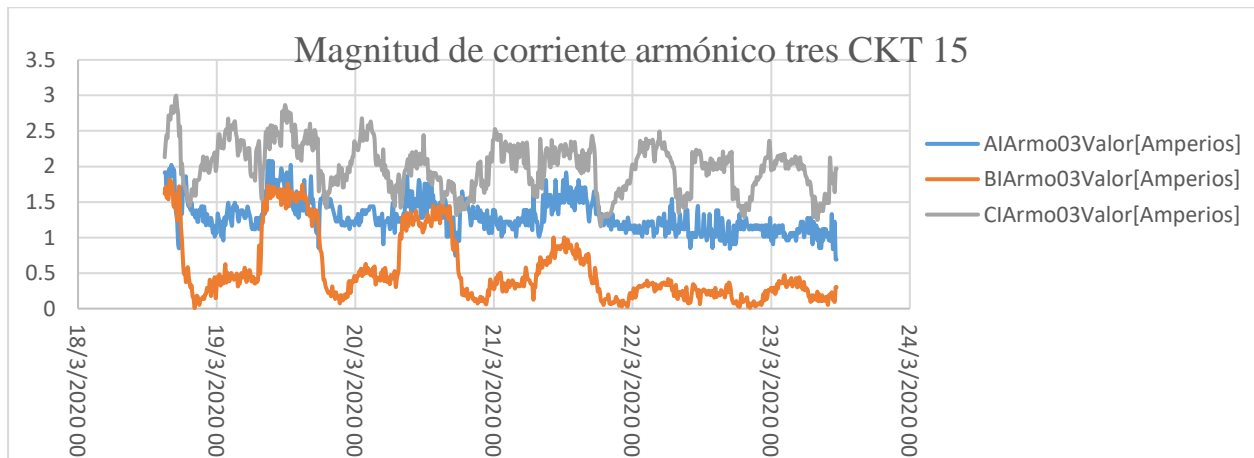


Ilustración 3. 23 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 15.

Como en algunos circuitos anteriores, las condiciones del circuito 15 no parecen ser críticas.

3.2.6. Gráficas CKT 16

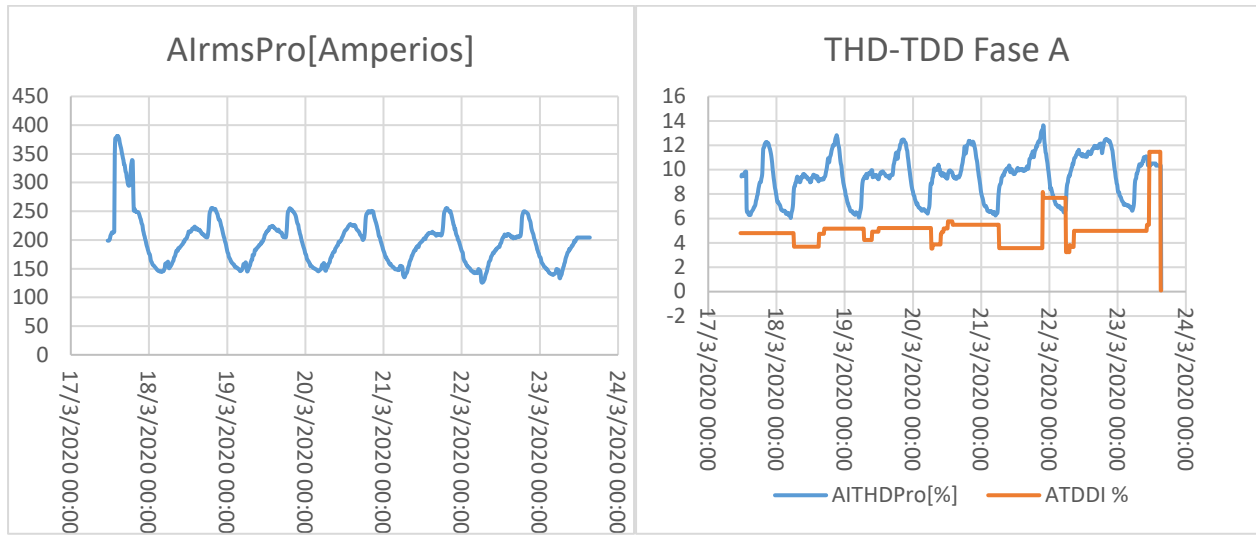


Ilustración 3. 24 Perfil de carga de circuito 16 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

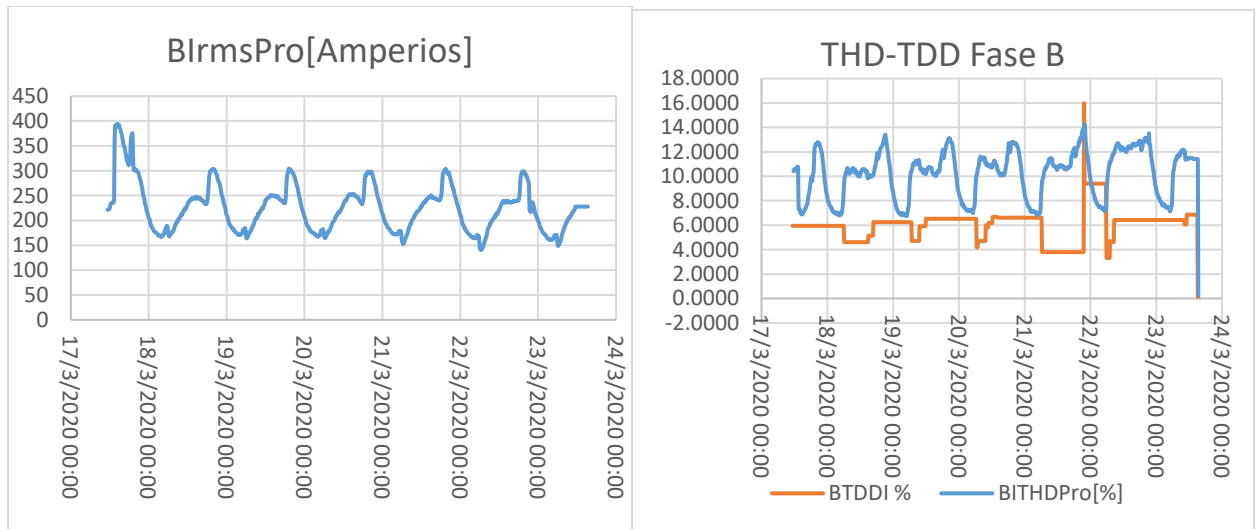


Ilustración 3. 25 Perfil de carga de circuito 16 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

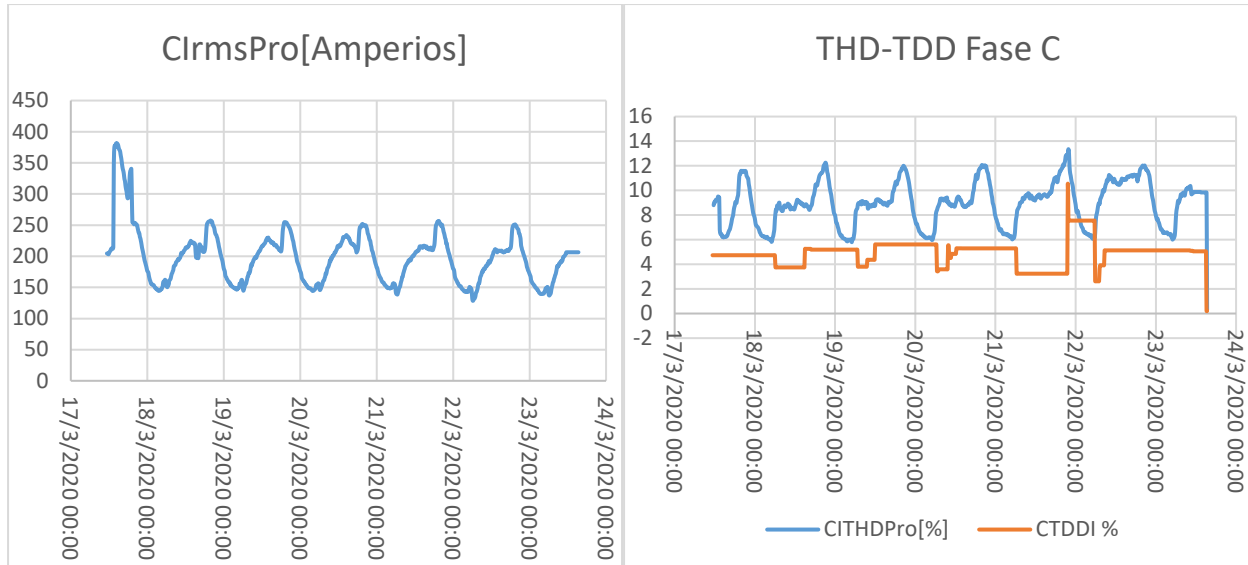


Ilustración 3. 26 Perfil de carga de circuito 16 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

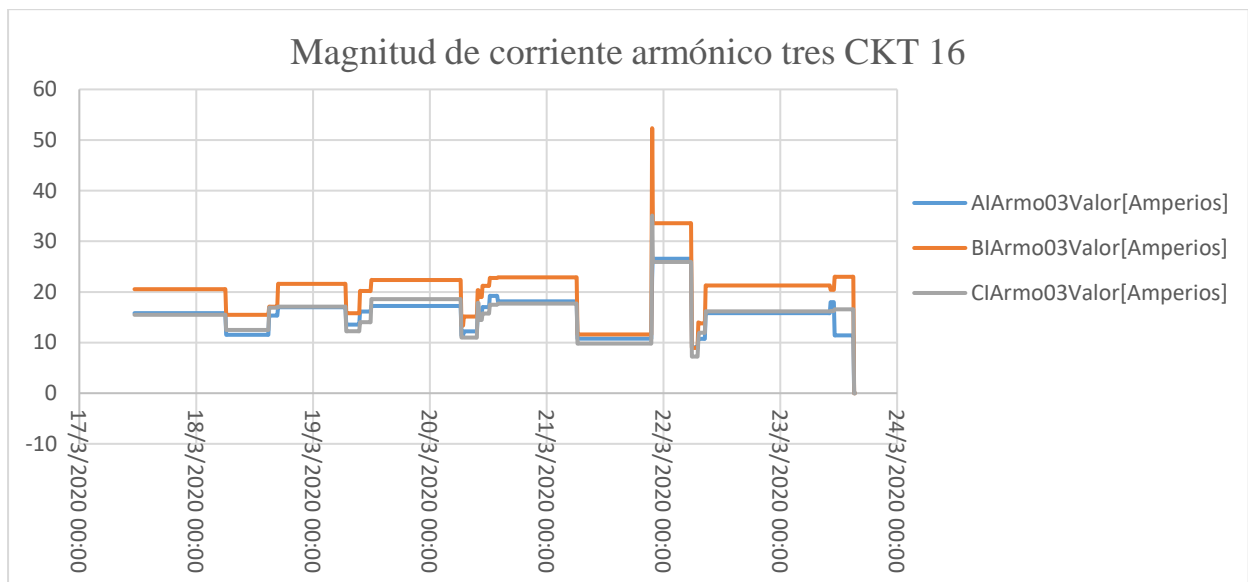


Ilustración 3. 27 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 16.

3.2.7. Gráficas CKT 17

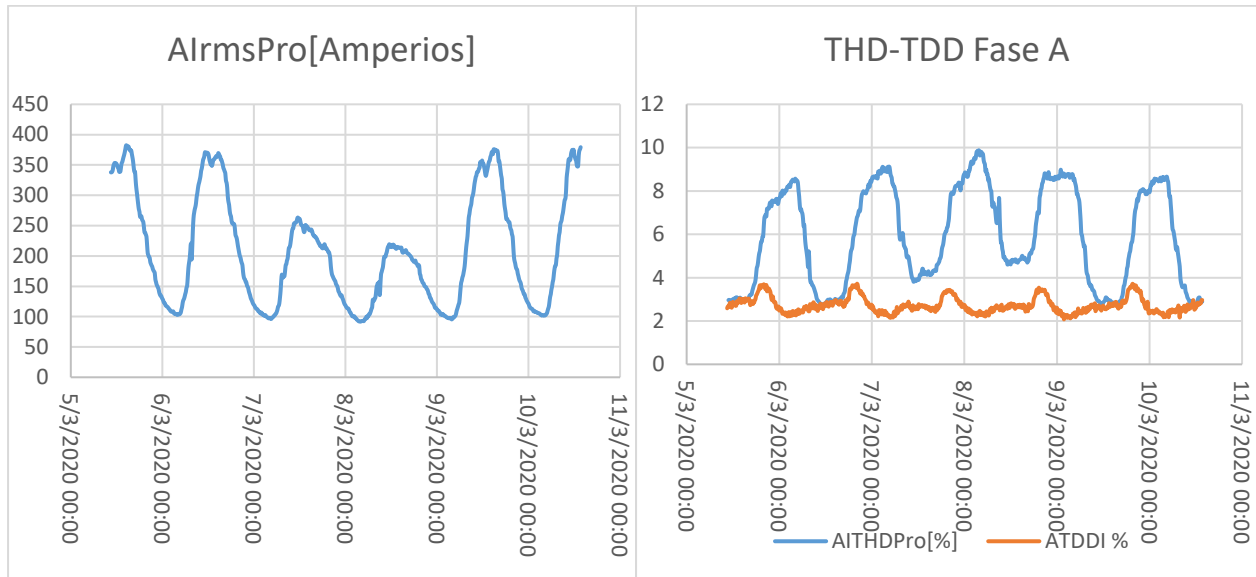


Ilustración 3. 28 Perfil de carga de circuito 17 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

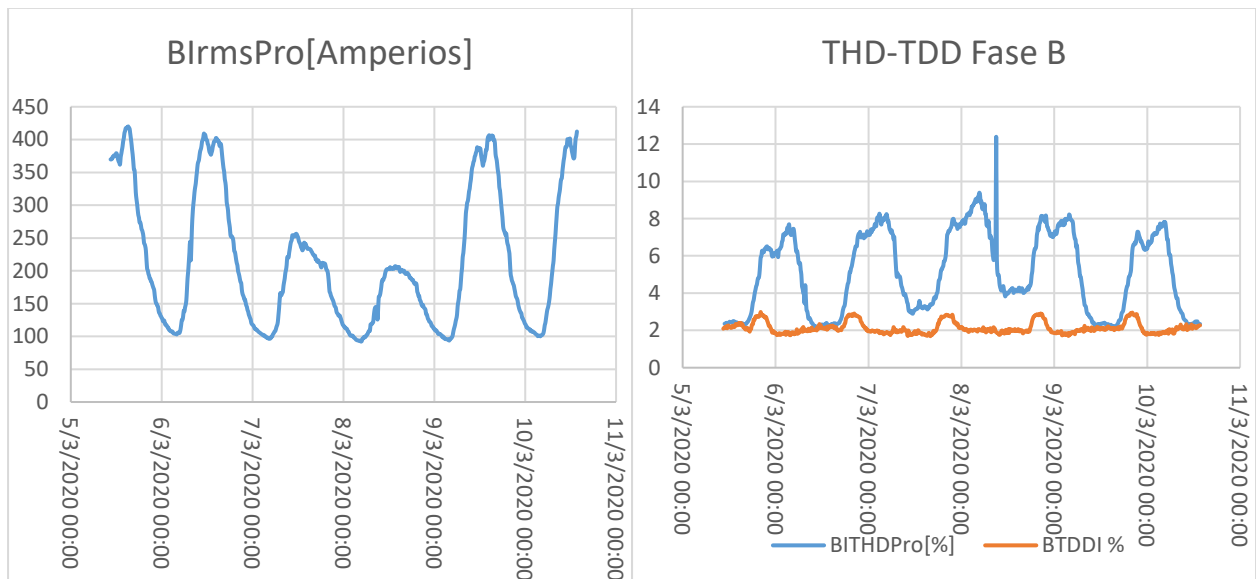


Ilustración 3. 29 Perfil de carga de circuito 17 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

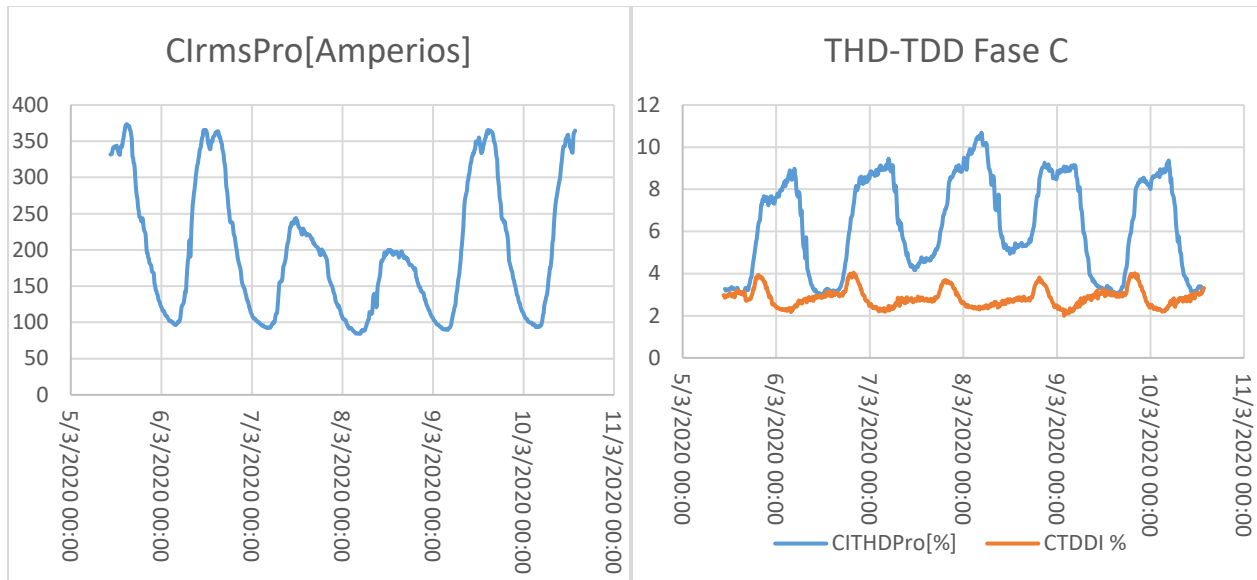


Ilustración 3. 30 Perfil de carga de circuito 17 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

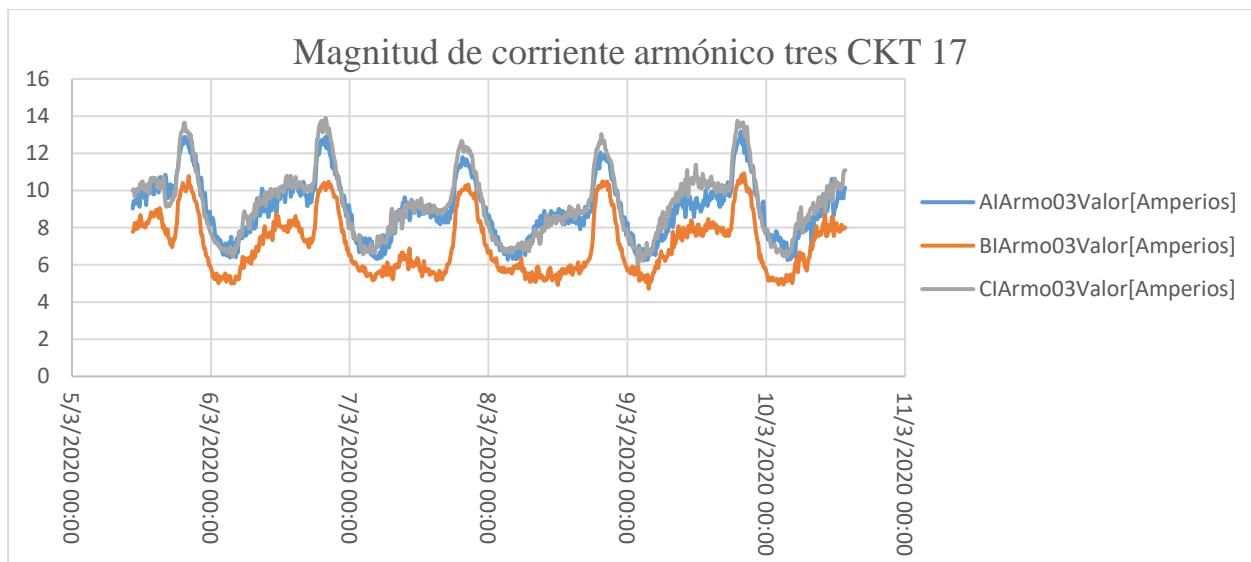


Ilustración 3. 31 Comportamiento del tercer armónico de las fases A, B y C del circuito 17.

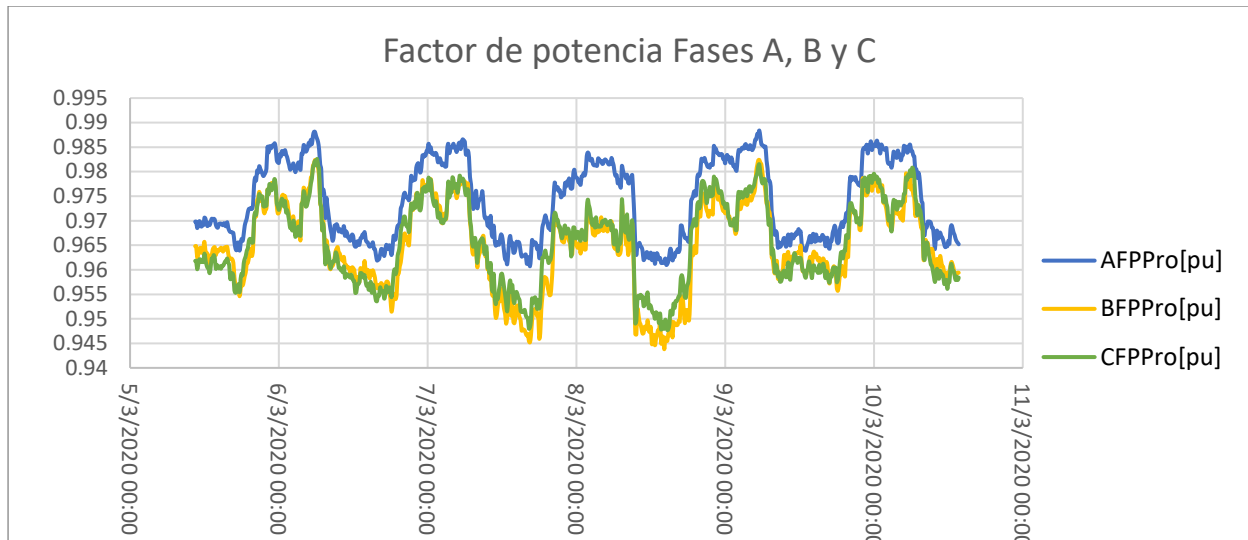


Ilustración 3. 32 Comportamiento del factor de potencia en las fases A, B y C del circuito 17.

3.2.8. Gráficas CKT 18

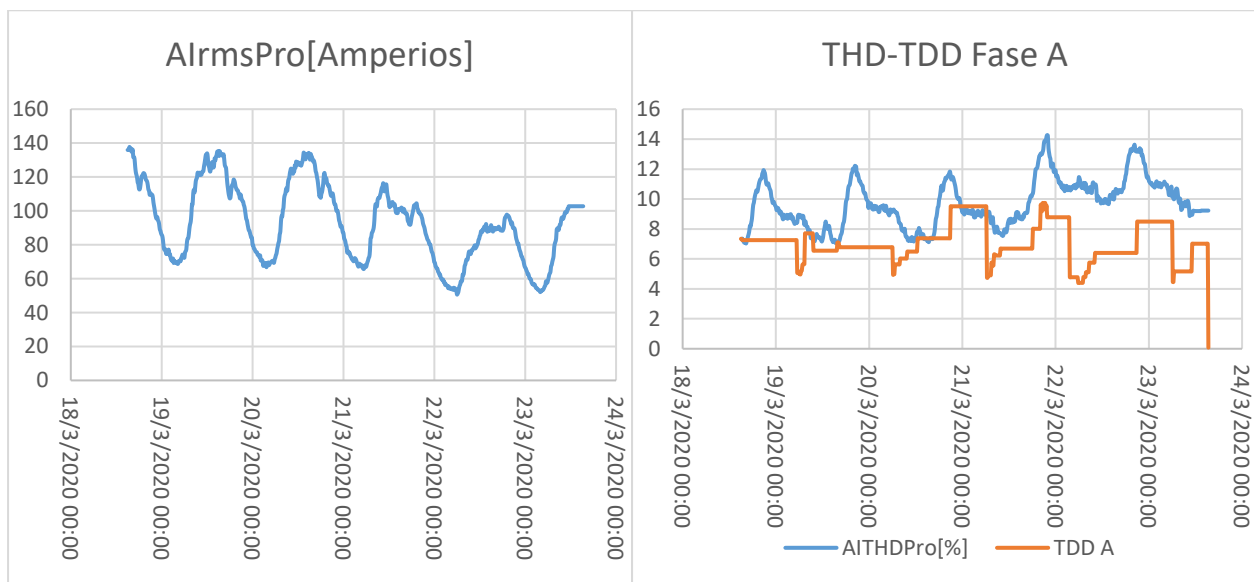


Ilustración 3. 33 Perfil de carga de circuito 18 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

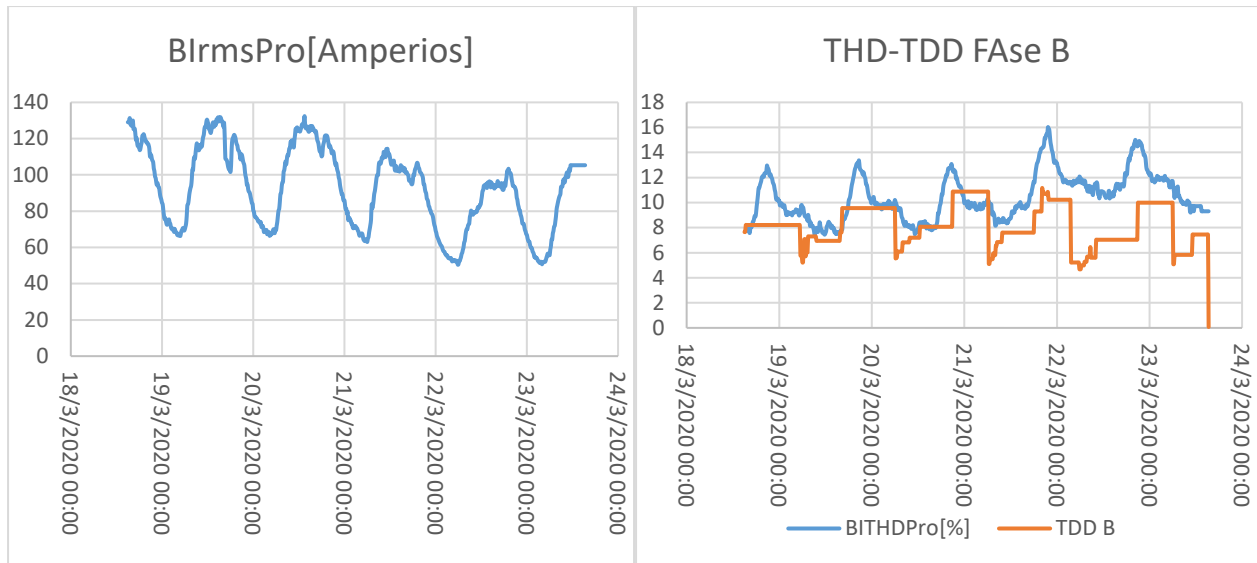


Ilustración 3. 34 Perfil de carga de circuito 18 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

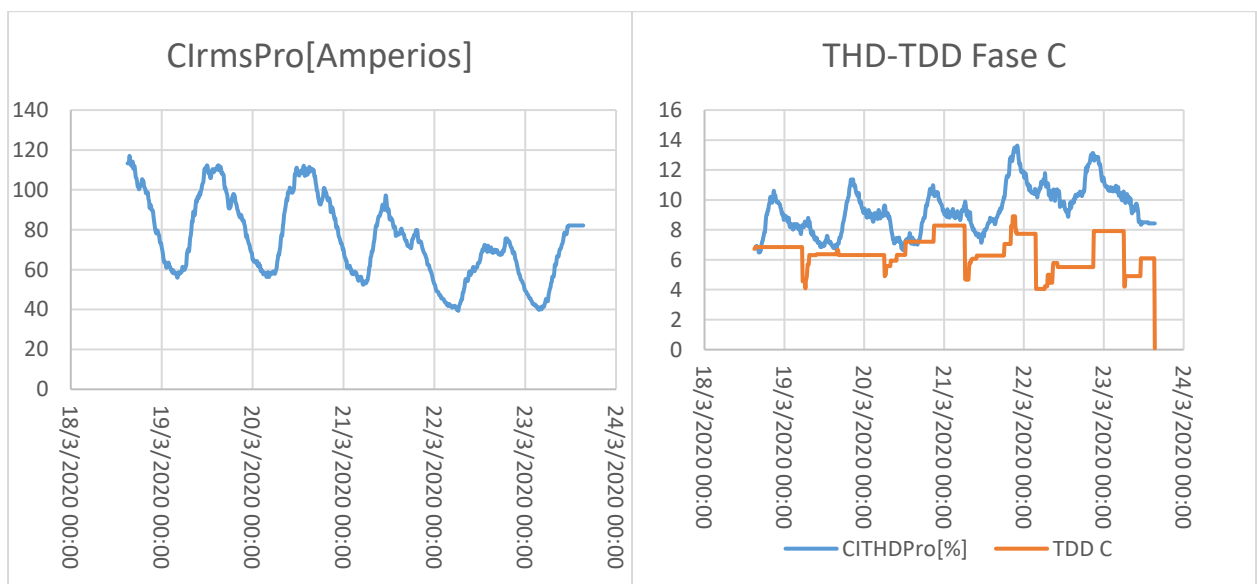


Ilustración 3. 35 Perfil de carga de circuito 18 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

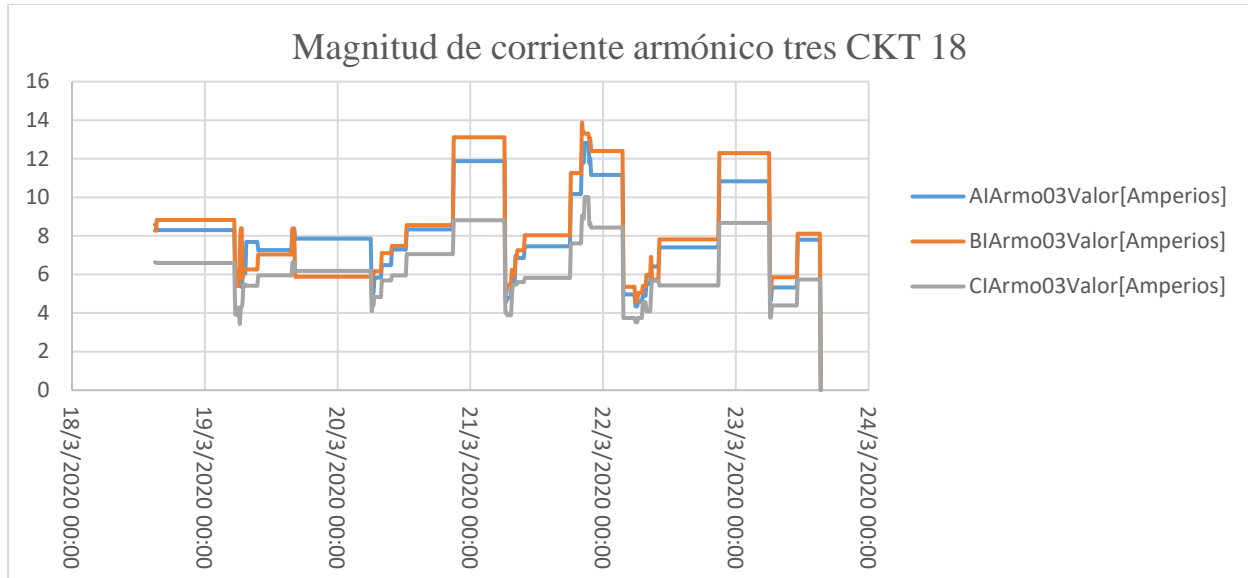


Ilustración 3. 36 Comportamiento del tercer armónico de las tres fases del circuito 18.

3.2.9. Gráficas CKT 19

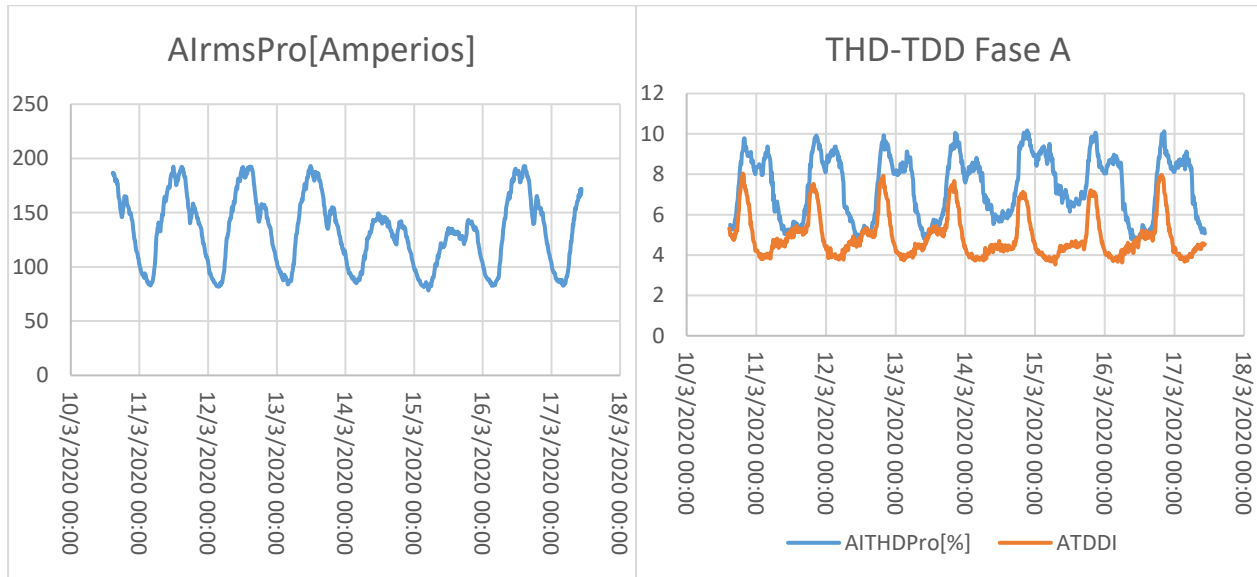


Ilustración 3. 37 Perfil de carga de circuito 19 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

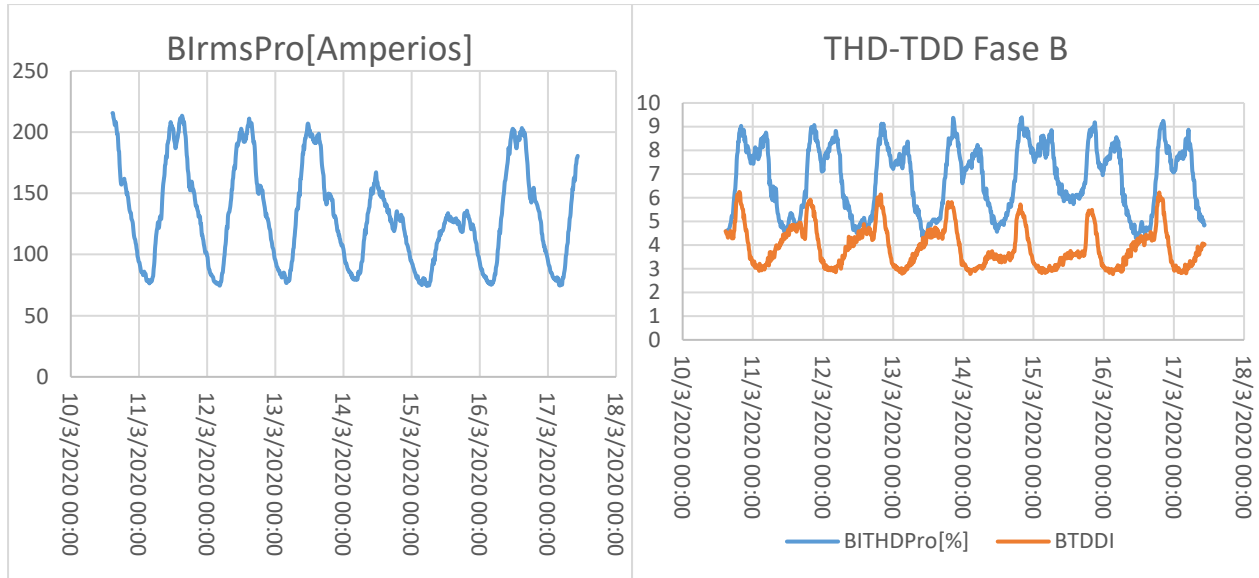


Ilustración 3. 38 Perfil de carga de circuito 19 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

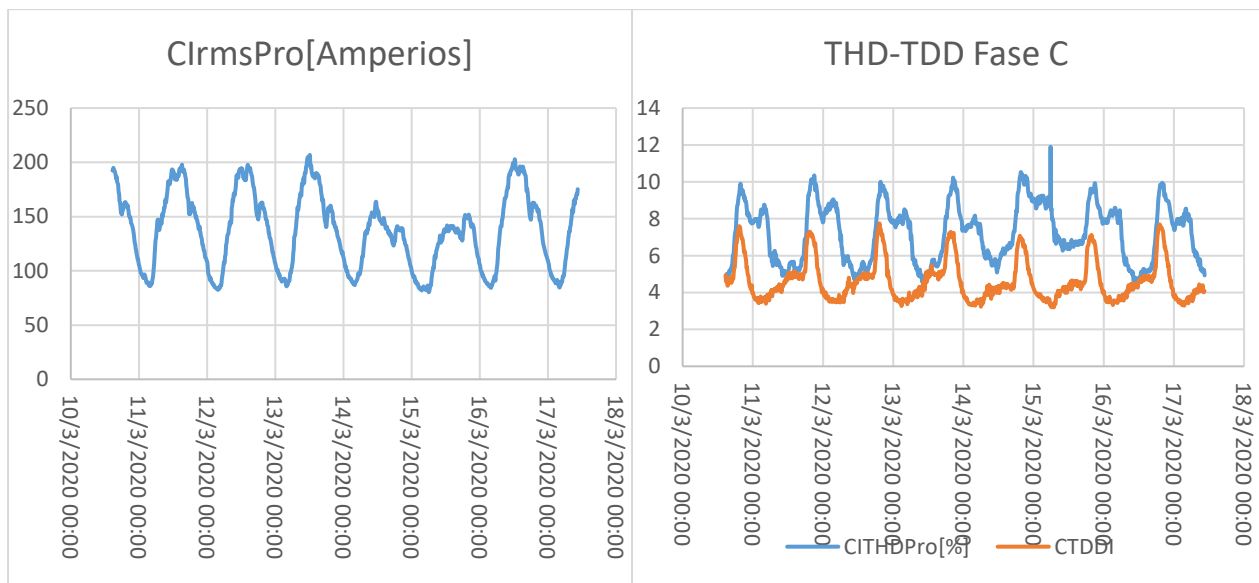


Ilustración 3. 39 Perfil de carga de circuito 19 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

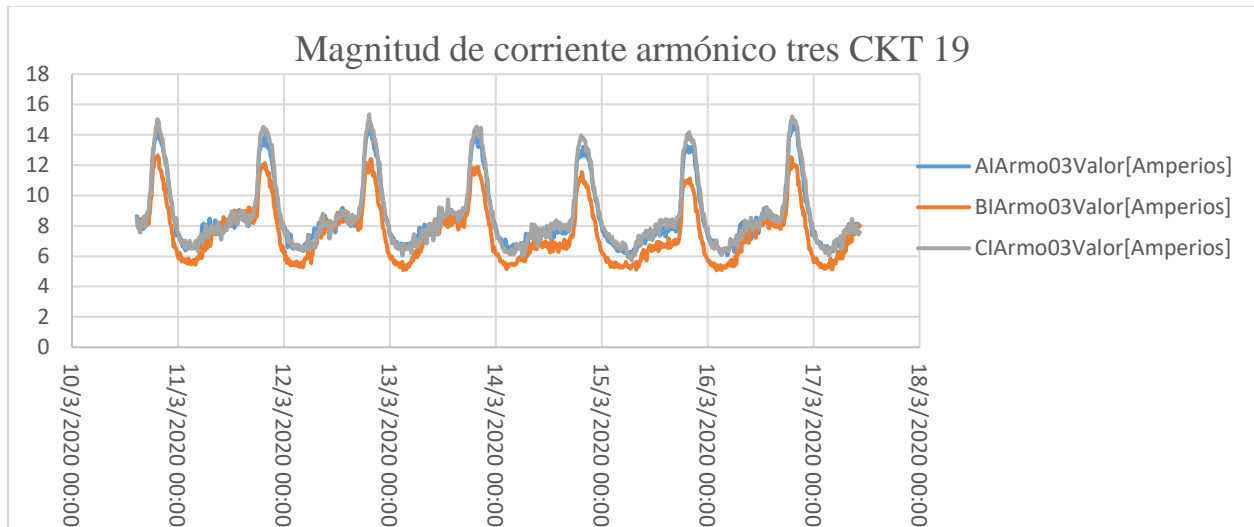


Ilustración 3. 40 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 19.

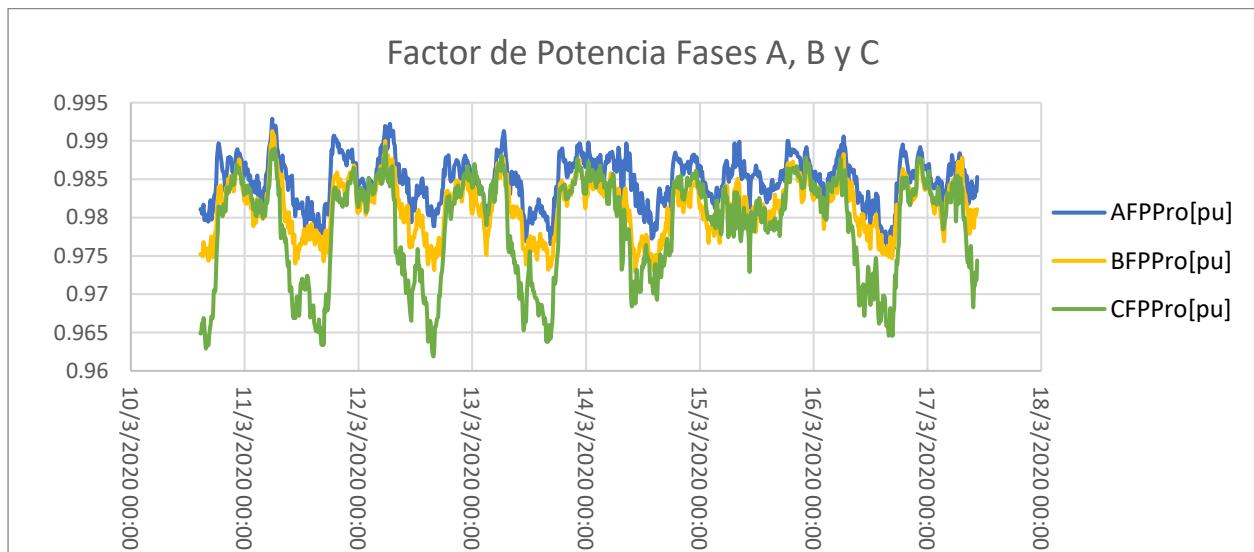


Ilustración 3. 41 Comportamiento del factor en las tres fases del circuito 19.

3.2.10. Gráficas CKT 21

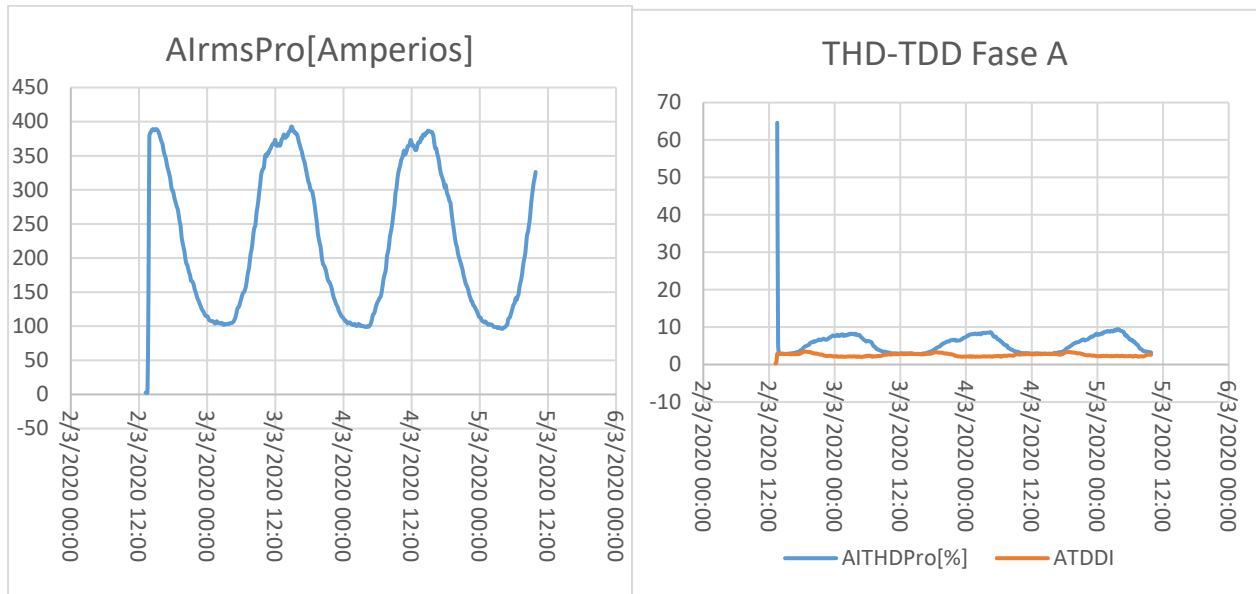


Ilustración 3. 42 Perfil de carga de circuito 21 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

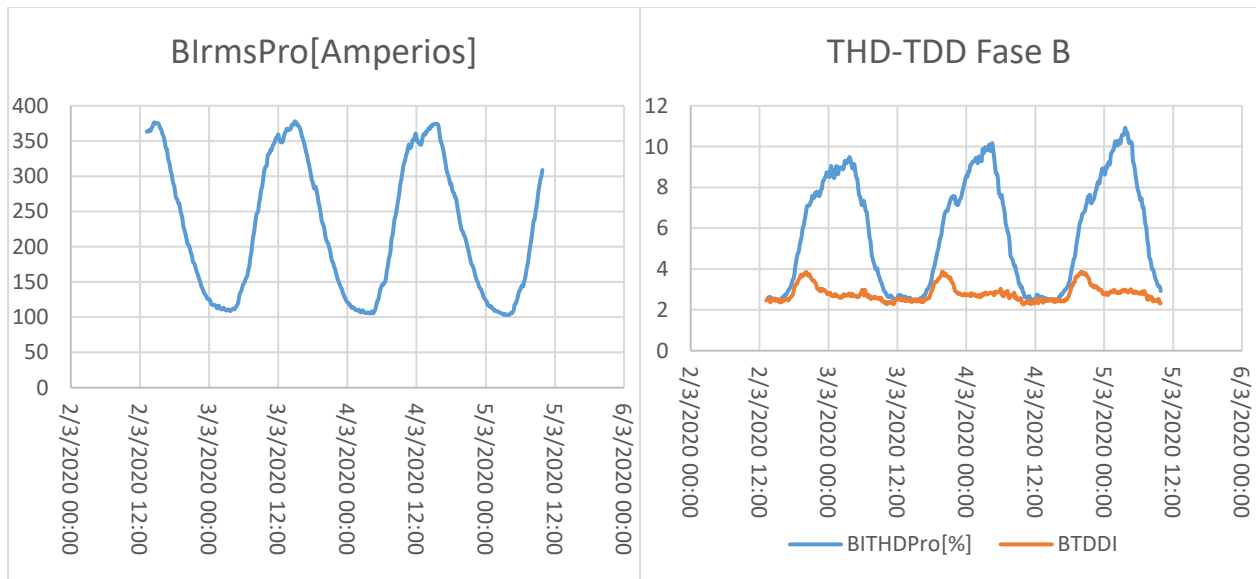


Ilustración 3. 43 Perfil de carga de circuito 21 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

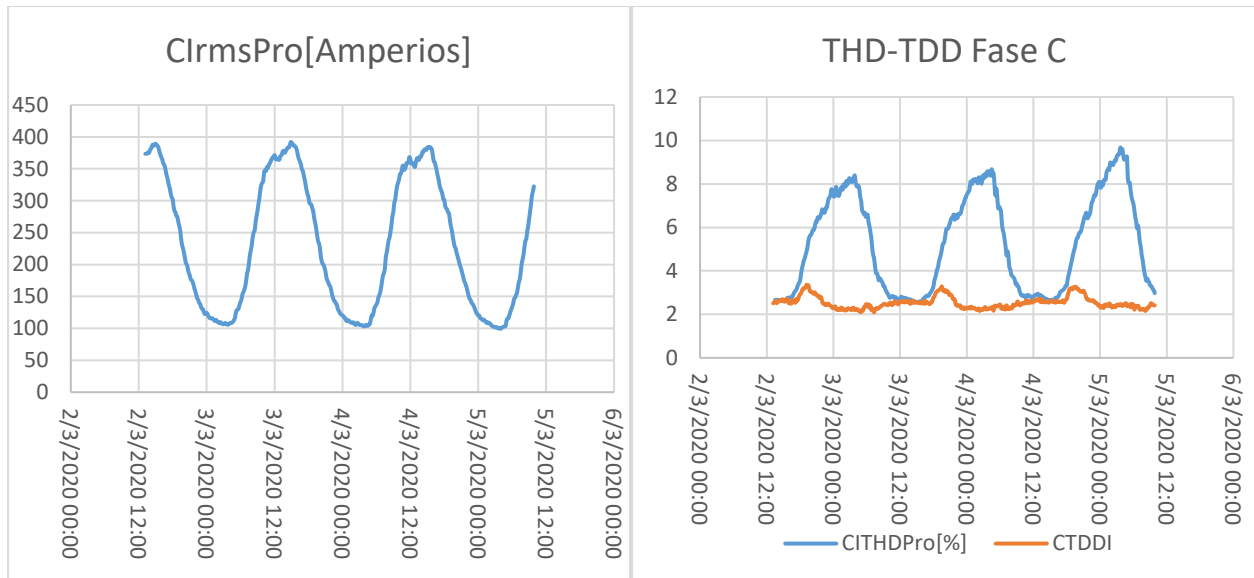


Ilustración 3. 44 Perfil de carga de circuito 21 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

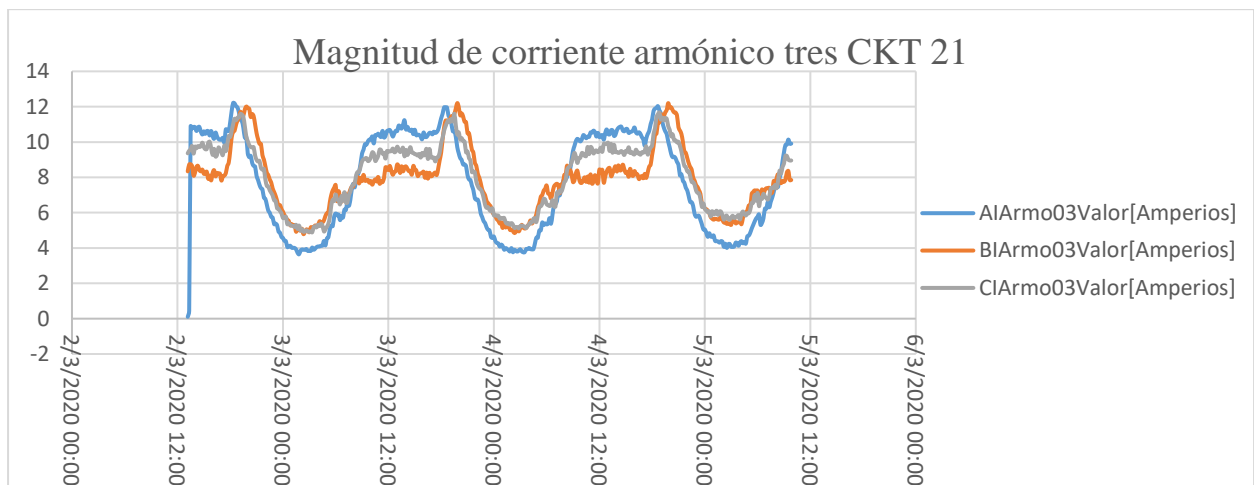


Ilustración 3. 45 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 21.

3.2.11. Gráficas CKT 22

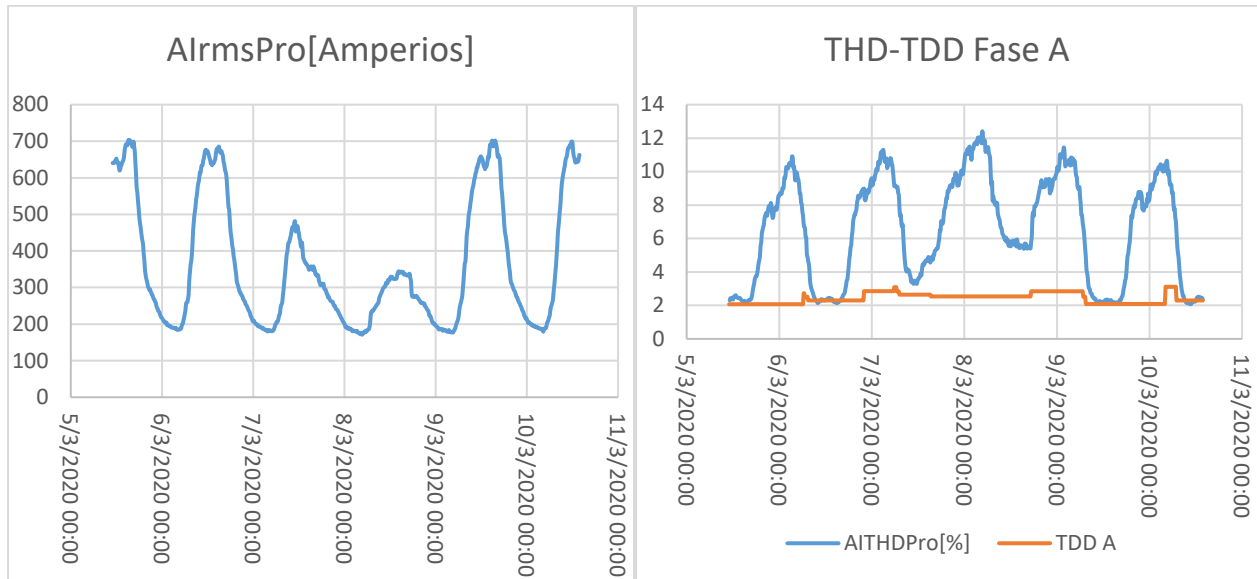


Ilustración 3. 46 Perfil de carga de circuito 22 fase A (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

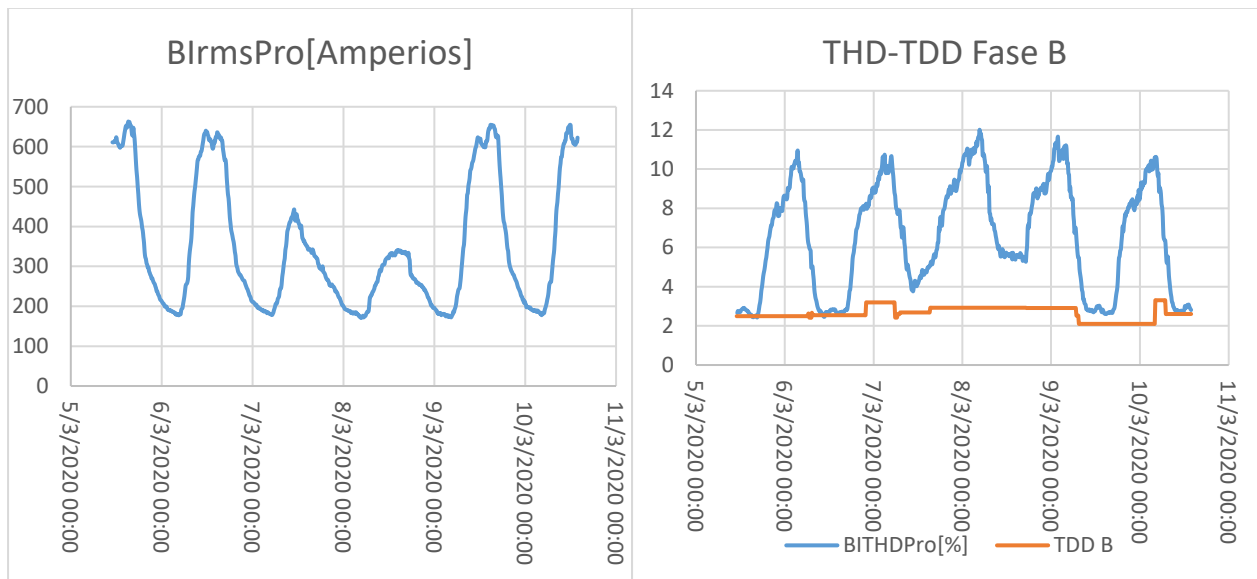


Ilustración 3. 47 Perfil de carga de circuito 22 fase B (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

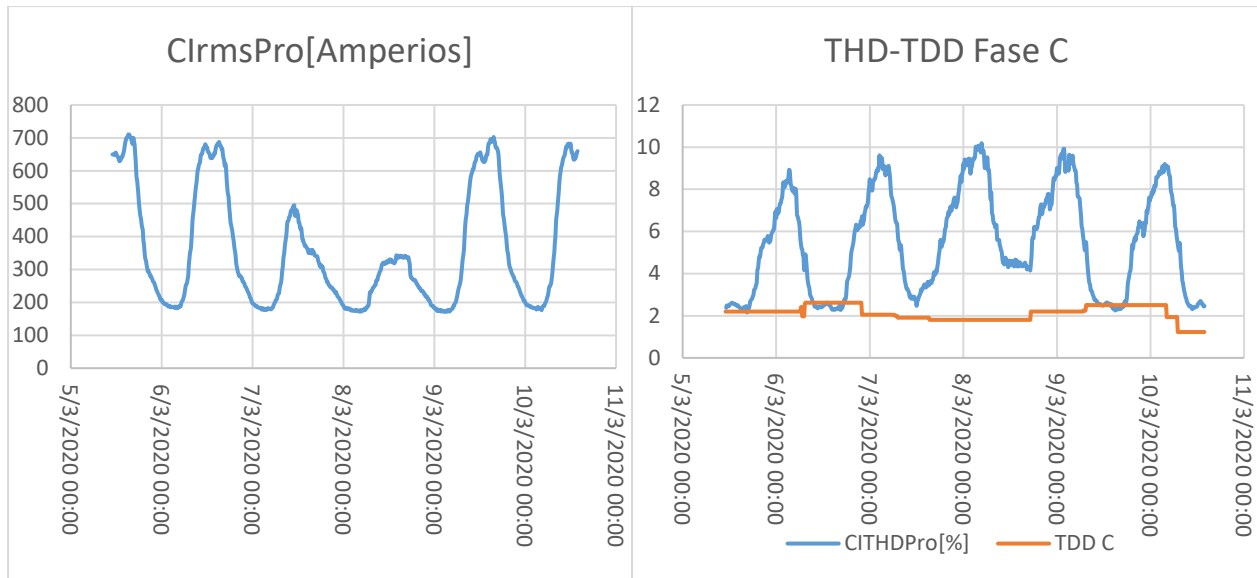


Ilustración 3. 48 Perfil de carga de circuito 22 fase C (gráfica izquierda), THD (trazo azul gráfica derecha) TDD (trazo naranja gráfica derecha).

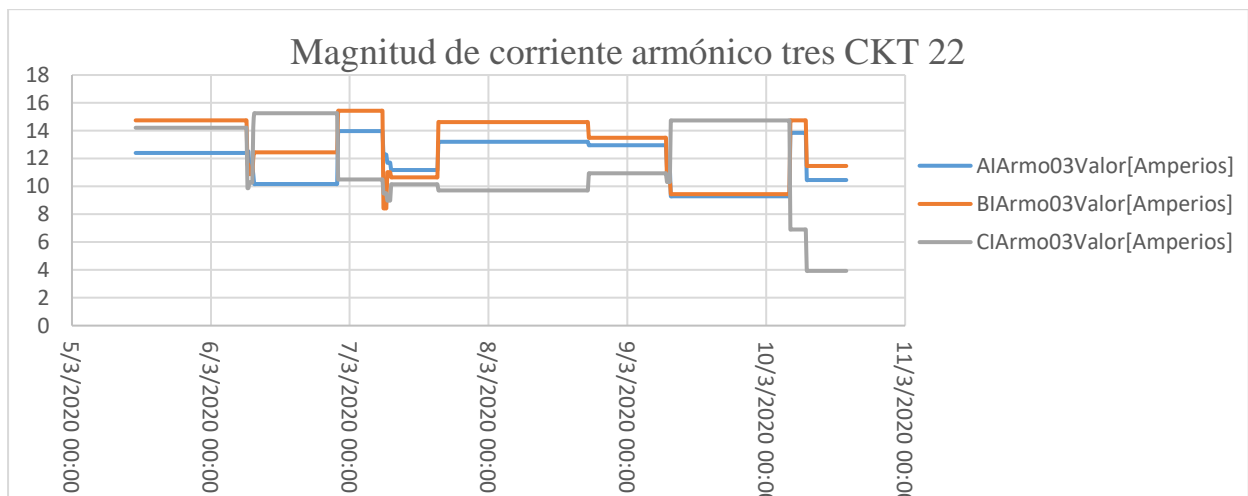


Ilustración 3. 49 Comportamiento del tercer armónico en las tres fases del circuito 22.

3.3. Corriente de neutro

Como un precedente, se facilitaron mediciones previas para tener un punto de comparación o de partida para nuestro análisis; estos datos pertenecen a mediciones realizadas en el año 2018

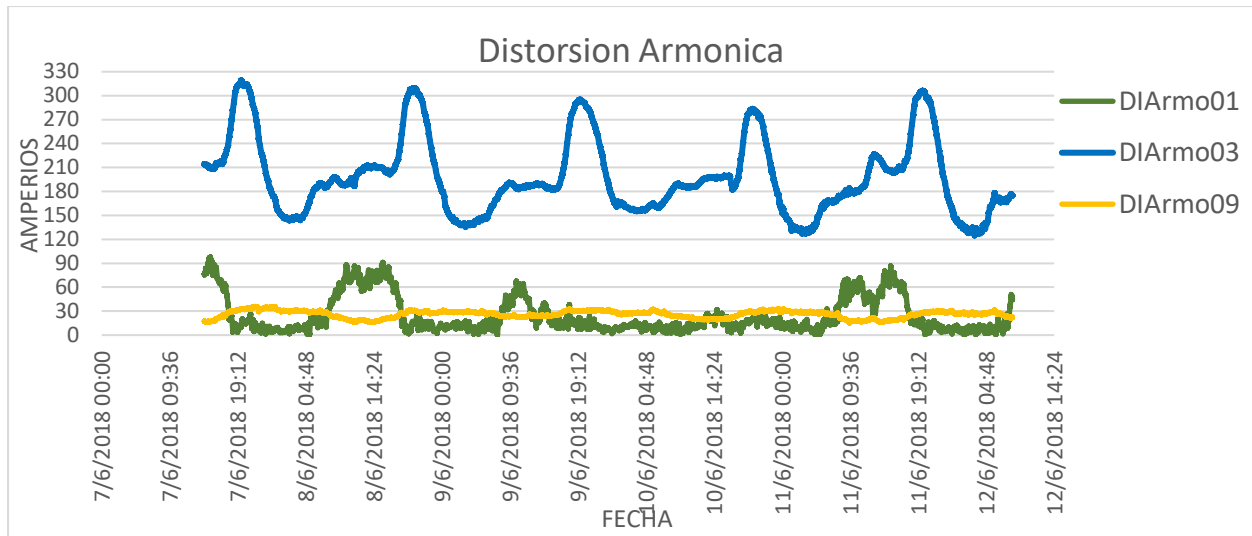


Ilustración 3. 50 mediciones de corriente de neutro del año 2018.

De la Ilustración 3. 50 es sorprendente como la magnitud de corriente del armónico tres (3) supera de manera sobrada a la corriente fundamental en el punto neutro, además de tener un noveno armónico equiparable a este; dejando claro que el tercer armónico es el predominante en la corriente I_{RMS} que circula por el conductor neutro; evidenciando con esto la importancia de hacer un análisis con respecto al armónico tres en los circuitos de la subestación.

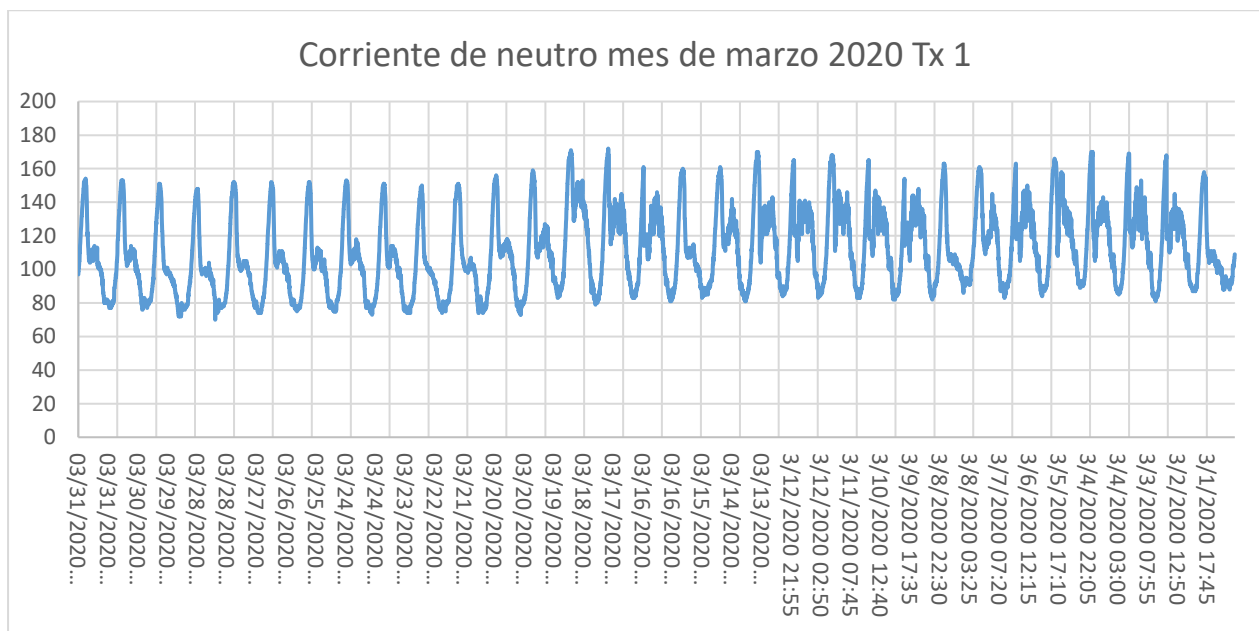


Ilustración 3. 51 Tendencia de corriente de neutro en transformador de tierra 1.

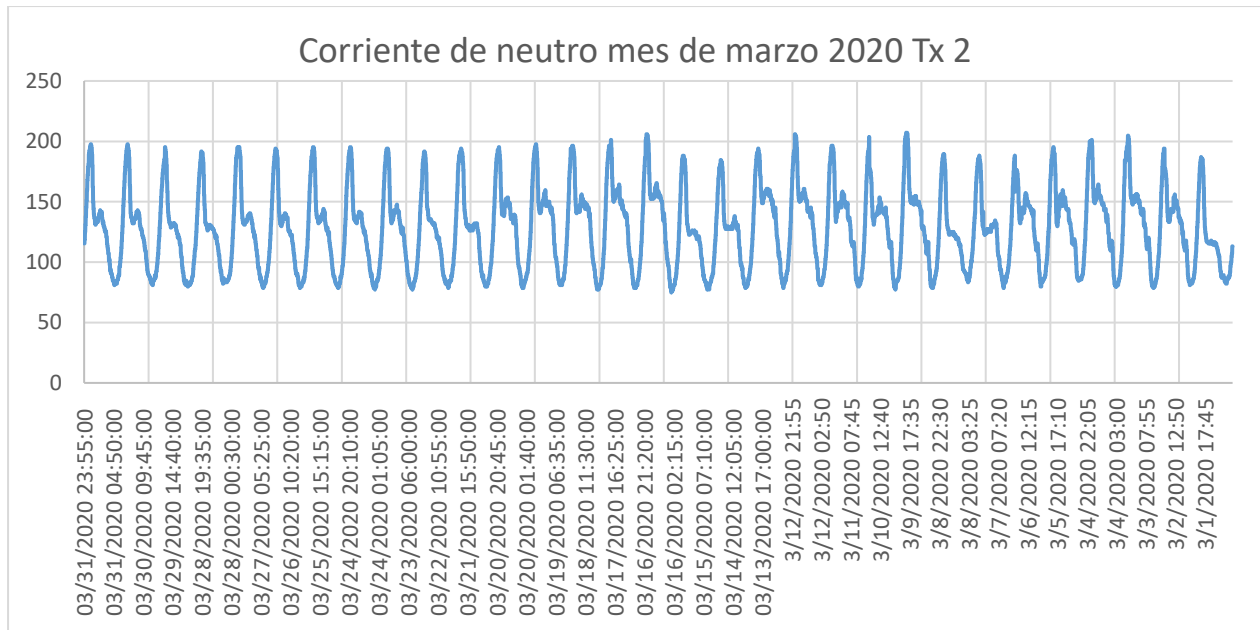


Ilustración 3. 52 tendencia de corriente de neutro en transformador de tierra 2.

Como se observa en Ilustración 3. 51 e Ilustración 3. 52 los transformadores de tierra están percibiendo una corriente de una magnitud considerable, la cual no debería circular por estos transformadores en condiciones normales de operación.

4. Capítulo 4. Cálculos y simulación

4.1. Cálculo del filtro según IEEE Std. 3002.8-2018

Tomando en consideración las afirmaciones que se mencionaron en el capítulo precedente, se decide darle tratamiento al circuito 14, por lo tanto, a continuación, se procede a calcular los elementos necesarios para un filtro pasivo sintonizado.

Los parámetros eléctricos que el circuito ofrece son los siguientes:

$$\begin{aligned}fp &= 0.95 \\V_{rms} &= 13450 \text{ V} \\I_{rms} &= 76.82 \text{ A} \\V_1 &= 13447 \text{ V} \\I_1 &= 76.28\end{aligned}$$

Cálculo del Angulo de desfase entre tensión y corriente. Debido a que el filtro compensa el factor de potencia, es necesario verificar cuanta potencia reactiva se debe corregir, esto se realiza a través de los ángulos del factor de potencia existente y factor de potencia deseado.

Como ángulo inicial tenemos:

$$\begin{aligned}\varphi &= \cos^{-1}(0.95) \\ \varphi &= 18.19 \\ I_1 &= 76.28 \angle -18.19\end{aligned}$$

Cálculo de la impedancia equivalente total en el circuito. Para motivos de simulación debe conocerse la condición de carga del circuito, por tanto, se calcula la impedancia vista desde la fuente.

$$\begin{aligned}Z &= \frac{V}{I} = \frac{13450 \text{ V}}{76.82 \text{ A}} = 175.08 \angle 18.19 \\ Z &= 166.33 + j54.65\end{aligned}$$

Cálculo de inductancia equivalente. Para los parámetros de la simulación se calculará el valor en Henrios de la inductancia.

$$\begin{aligned}2 * \pi * f * L &= 54.65 \\ L &= \frac{54.65}{2 * \pi * 60} \\ L &= 144.96 \text{ mH}\end{aligned}$$

Cálculo de corrección del factor de potencia.

En primer lugar, se calcula la potencia aparente utilizando únicamente los valores fundamentales tensión y corriente, debido a que estos aun no poseen potencia de armónicos.

$$S1 = V1 * I1$$

$$S1 = (76.28 A) * (13447V)$$

$$S1 = 1025.74 KVA$$

Se procede a calcular potencia reactiva inicial.

$$Q1 = S1 * \sin(\varphi)$$

$$Q1 = 1025.74 KVA * \sin(18.19)$$

$$Q1 = 320.2 kVAR$$

Se calcula Angulo de factor de potencia deseado.

$$\cos(\varphi_2) = 0.97$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.97)$$

$$\varphi_2 = 14.07^\circ$$

Se calcula la potencia reactiva que debiese consumir el circuito para tener un Factor de potencia de 0.97

$$Q2 = S1 * \sin(\varphi_2)$$

$$Q2 = 1025.74 kVA * \sin(14.07^\circ)$$

$$Q2 = 249.36 kVAR$$

Potencia reactiva que será necesario compensar para tener un factor de potencia de 0.97

$$Qc = Q1 - Q2$$

$$Qc = 320.2 - 249.36$$

$$Qc = 70.84 kVAR$$

Ahora se calcula el condensador que sea capaz de suministrar dicha potencia reactiva.

$$Xc = \frac{kV^2}{Qc} = \frac{(13.450 kV)^2}{70.84 kVAR} = 2.554 k\Omega$$

$$Xc = \frac{1}{2 * \pi * f * c}$$

$$C_{60} = \frac{1}{2 * \pi * 60 * Xc} = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 2.554 k\Omega} = 1.04 \mu F$$

Se calcula X_l de acuerdo al armónico que se desea eliminar

$$X_l = \frac{X_c}{(h * 0.97)^2} = \frac{2.554 \text{ k}\Omega}{(3 * 0.97)^2} = 301.6 \Omega$$

$$j\omega L = X_l$$

$$L = \frac{X_l}{2 * \pi * 60} = 0.8 \text{ H}$$

Se calcula el valor de la resistencia a partir del factor de calidad Q_q , se toma en cuenta que el valor de Q_q puede variar entre el rango de 30-100

$$X_r = \sqrt{X_c * X_l} = \sqrt{2.554 \text{ k} * 301.6}$$

$$X_r = 877.66$$

$$R = \frac{X_r}{Q_q} = \frac{877.66}{80} = 10.97 \Omega$$

4.2. Simulación con ATP

Después de calcular los elementos necesarios para el filtro pasivo se procede a realizar las simulaciones pertinentes, utilizando como software “ATP DRAW”

Inicializamos la fuente de tensión con los siguientes parámetros.

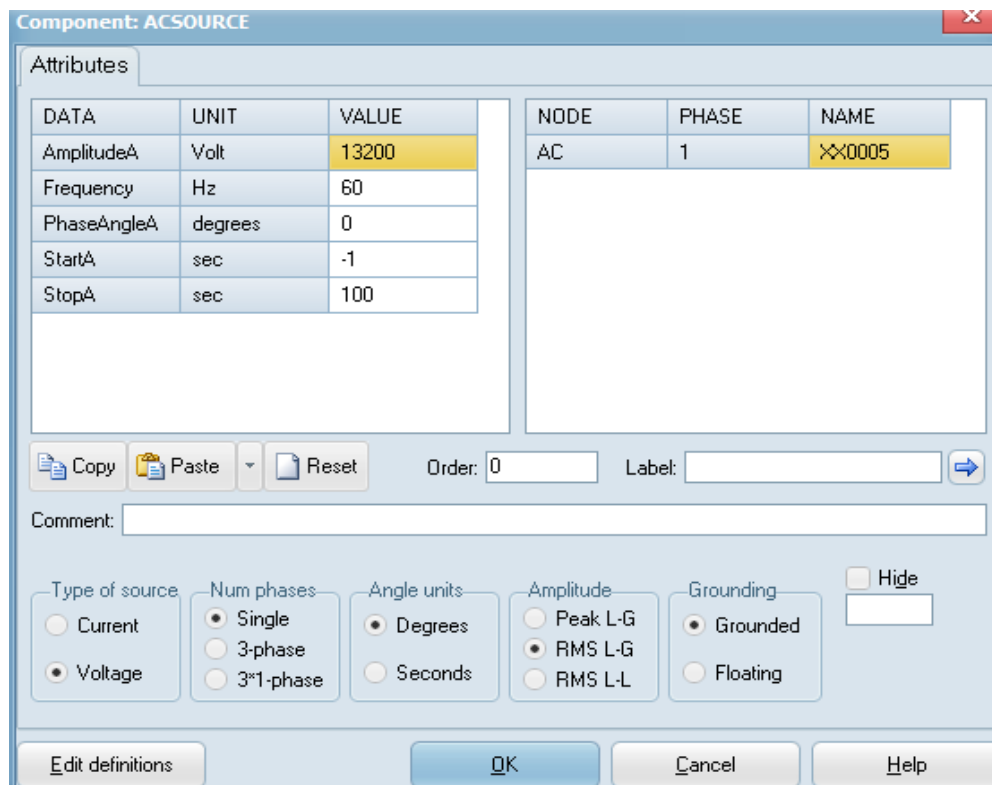


Ilustración 4. 1 Especificación de fuente de tensión.

Como se muestra en la Ilustración 4. 1 tenemos una fuente monofásica de 13.2 kV RMS línea a tierra a 60 Hz

Como paso siguiente y con los valores calculados en la sección anterior se configura el equivalente Thévenin del circuito como se muestra en las siguientes ilustraciones.

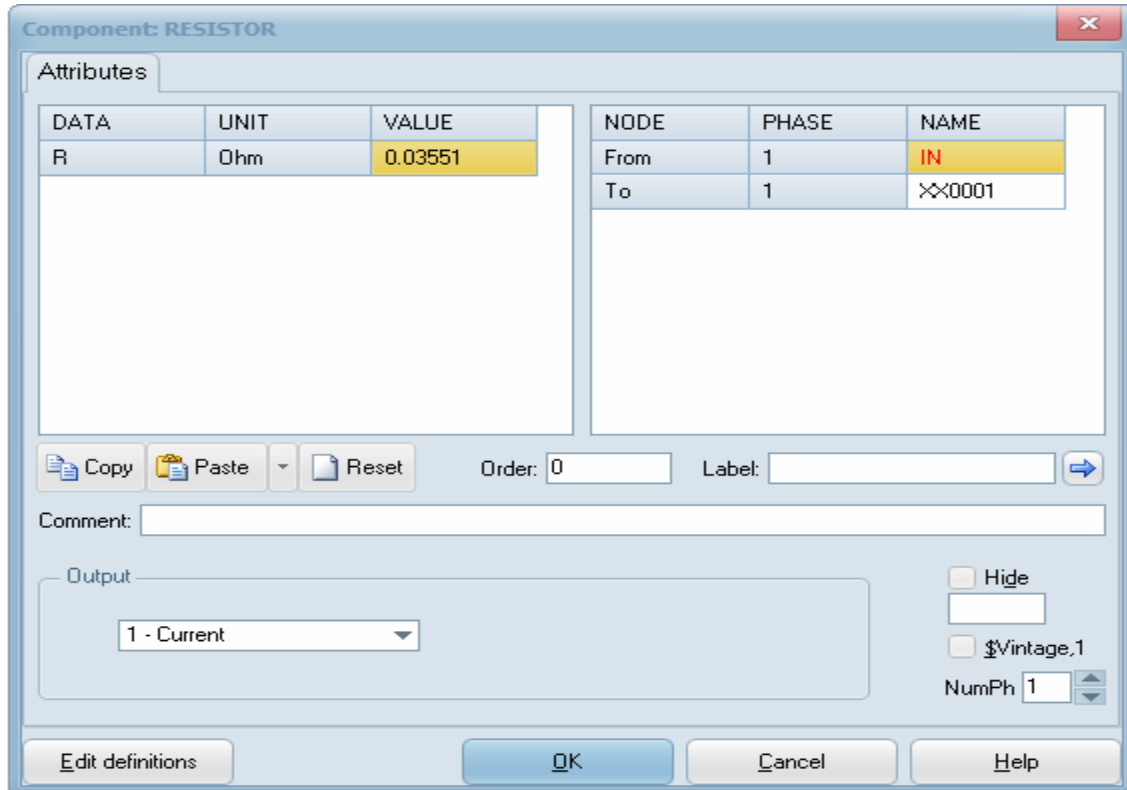


Ilustración 4. 2 Elemento resistivo de la impedancia Thévenin.

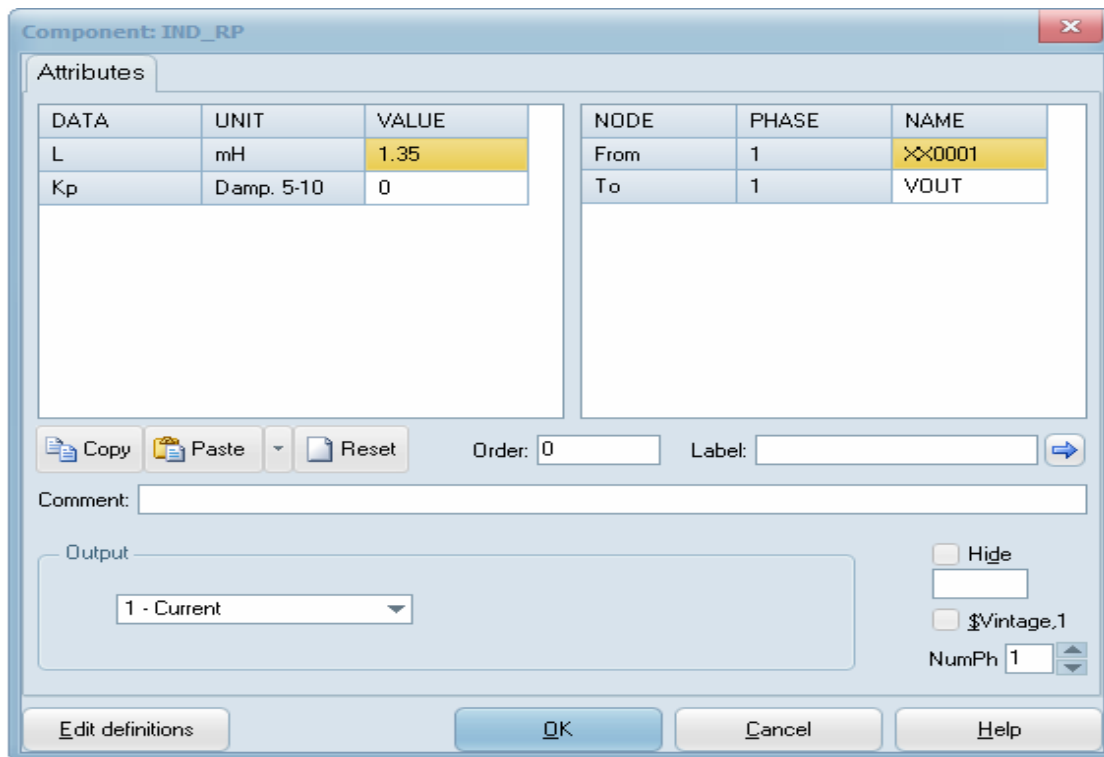


Ilustración 4. 3 Elemento reactivo de la impedancia Thévenin.

Los valores de la impedancia de carga se detallan a continuación.

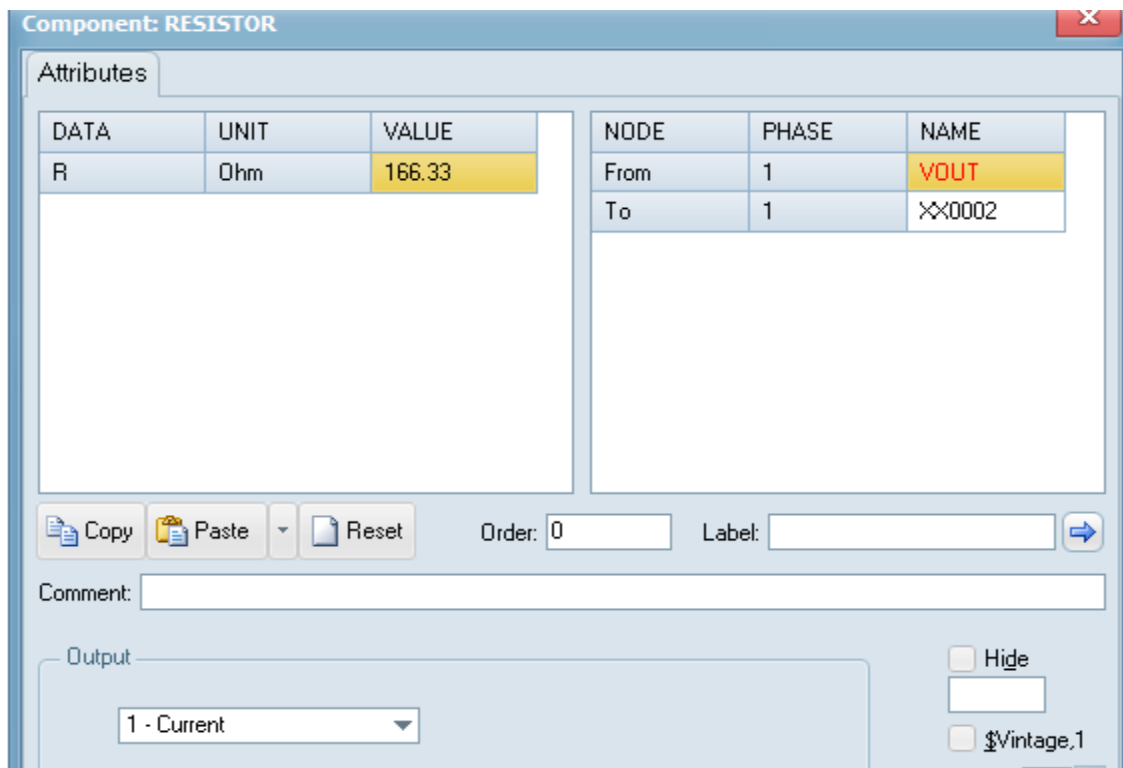


Ilustración 4. 4 Elemento resistivo de la impedancia de carga.

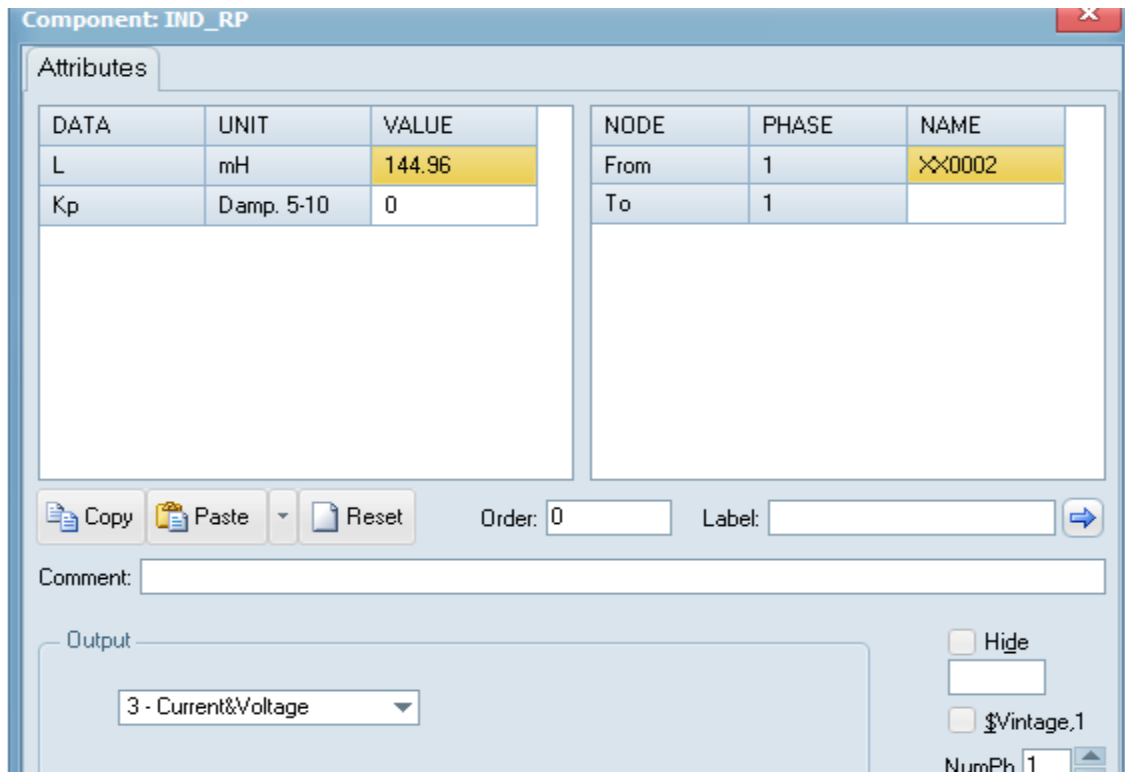


Ilustración 4. 5 Elemento reactivo de carga.

Con las configuraciones anteriores se obtiene el siguiente circuito.

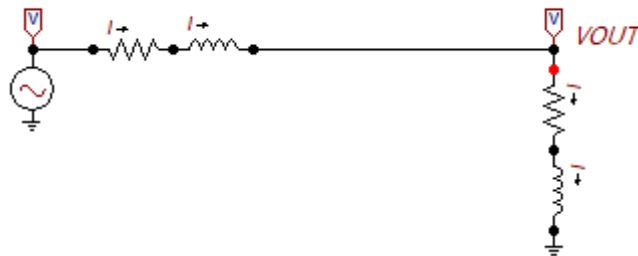


Ilustración 4. 6 Circuito equivalente para simulación.

Para verificar la reproducción de los parámetros calculados en la sección anterior, se realiza la siguiente simulación.

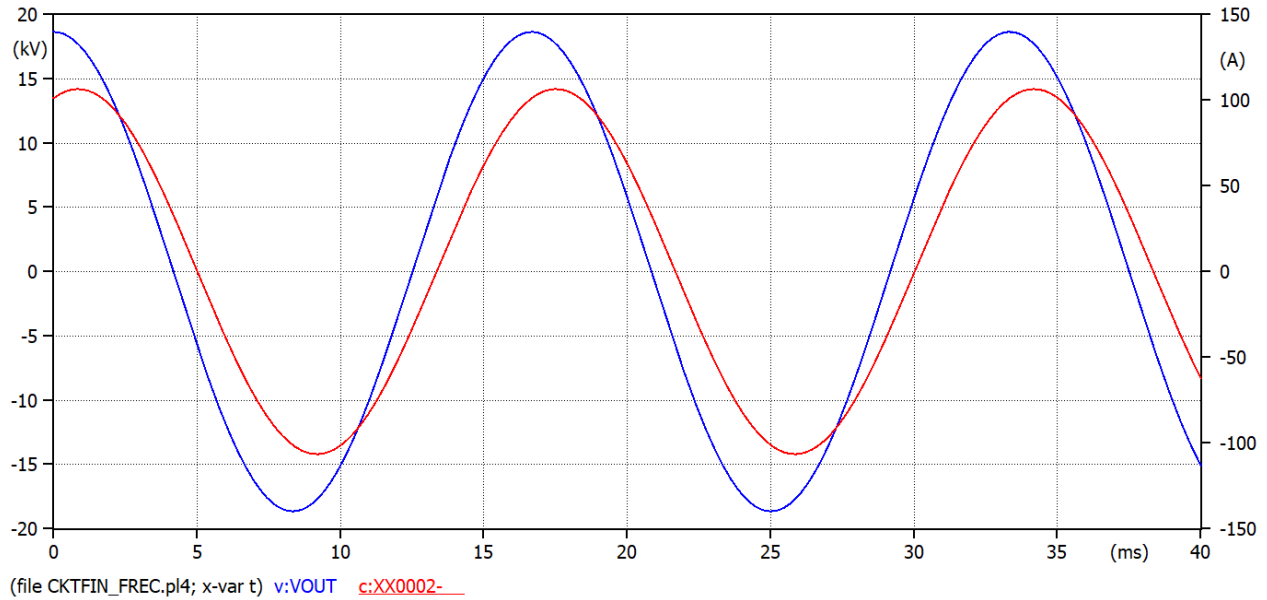


Ilustración 4. 7 onda de tensión y corriente que reproduce la corriente de carga y el factor de potencia del circuito de manera aproximada.

En la Ilustración 4. 7 se muestra la onda de tensión, con sus valores en el eje izquierdo de la gráfica, junto con la onda de corriente y sus respectivos niveles en el eje derecho, como puede apreciarse se tiene un desplazamiento entre formas de onda de 0.848 milisegundos equivalente a 18.32° , lo que es aproximadamente el desfase calculado en la sección anterior. En la Ilustración 4. 8 se muestra su espectro en frecuencia en el que no encontramos distorsión como se esperaba.

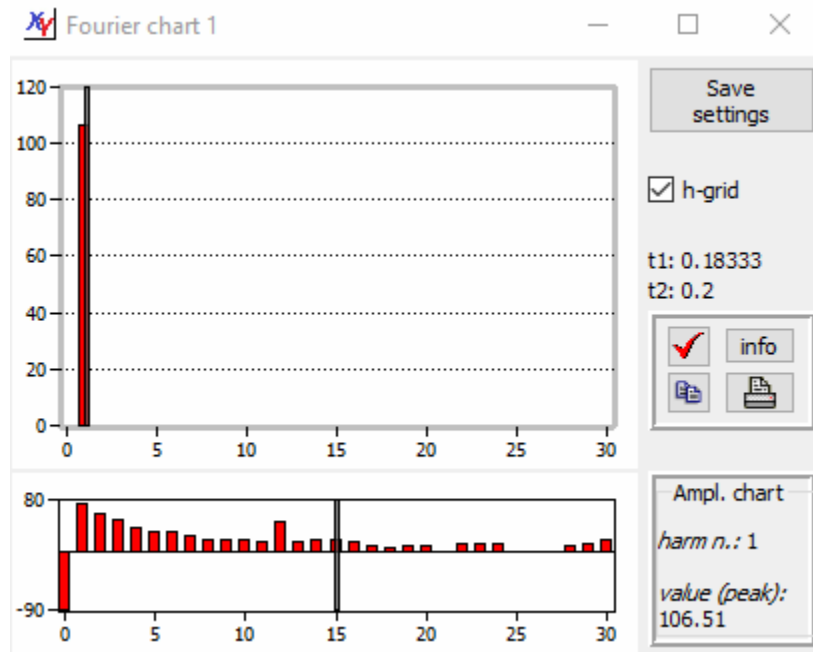


Ilustración 4. 8 Transformada rápida de Fourier para el circuito equivalente.

En la siguiente ilustración tenemos cómo se comporta la impedancia de carga respecto a la frecuencia.

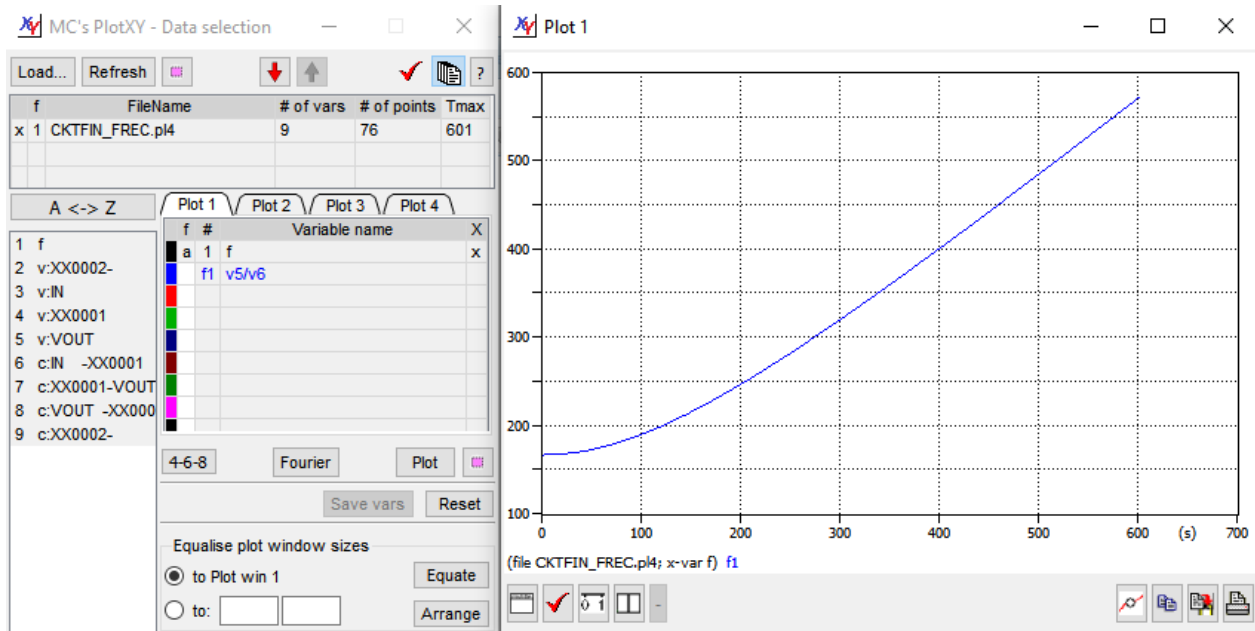


Ilustración 4. 9 Impedancia de la red eléctrica en estudio con respecto a la frecuencia.

Como se logra apreciar en la Ilustración 4. 9 el comportamiento de la carga es de tendencia inductiva, teniendo como inicio un desplazamiento de cero que corresponde a los elementos netamente resistivos.

A continuación, se inserta la distorsión armónica al circuito; obteniendo el siguiente circuito para simulación.

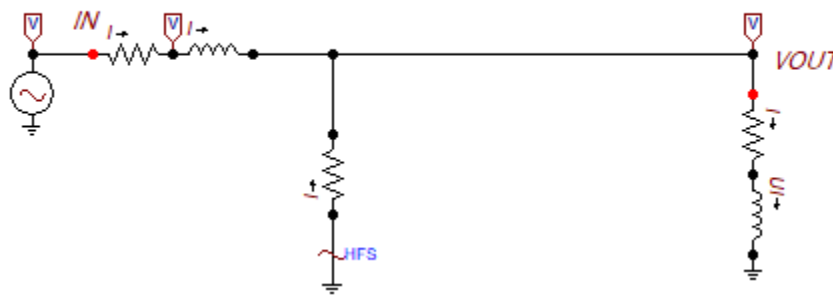


Ilustración 4. 10 Circuito con distorsión armónica.

A la fuente de distorsión se inicializo con los siguientes valores.

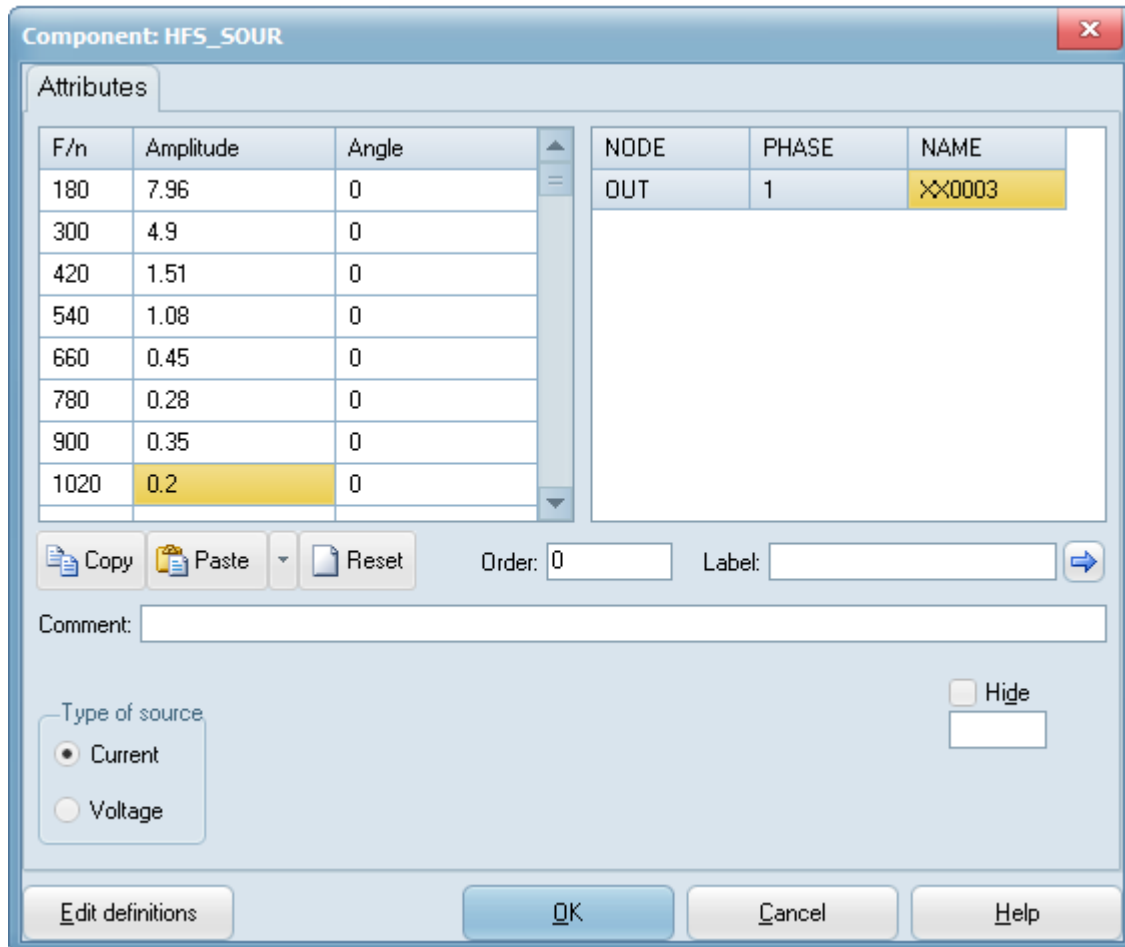


Ilustración 4. 11 valores configurados en la fuente armónica para la simulación.

En la Ilustración 4. 12 se muestran los resultados de la simulación del circuito con la fuente de distorsión armónica. Se aprecian muescas en la forma de onda de corriente, lo que confirma la existencia de armónicos a través del circuito. También en la Ilustración 4. 13 se presenta la señal de tensión de este mismo circuito con su análisis de Fourier en el cual no se nota distorsión apreciable.

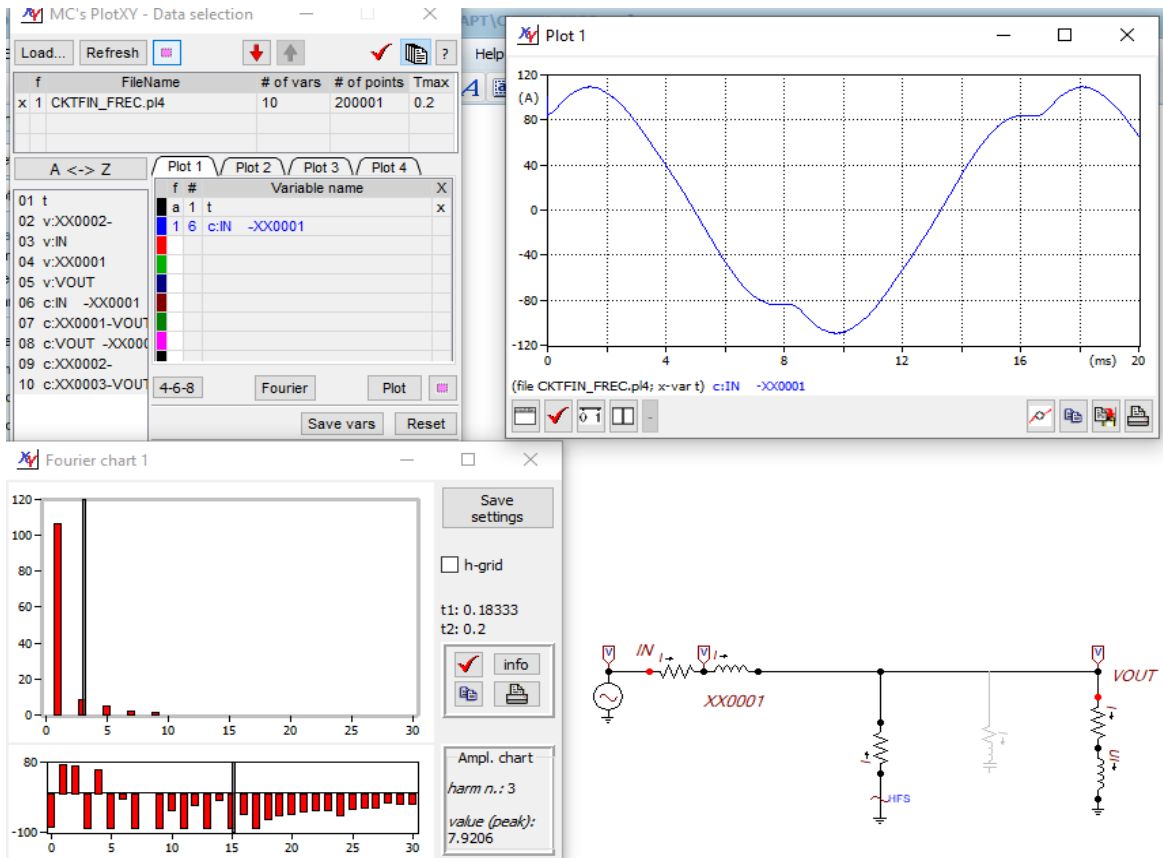


Ilustración 4. 12 resultados de simulación de circuito con distorsion armonica.

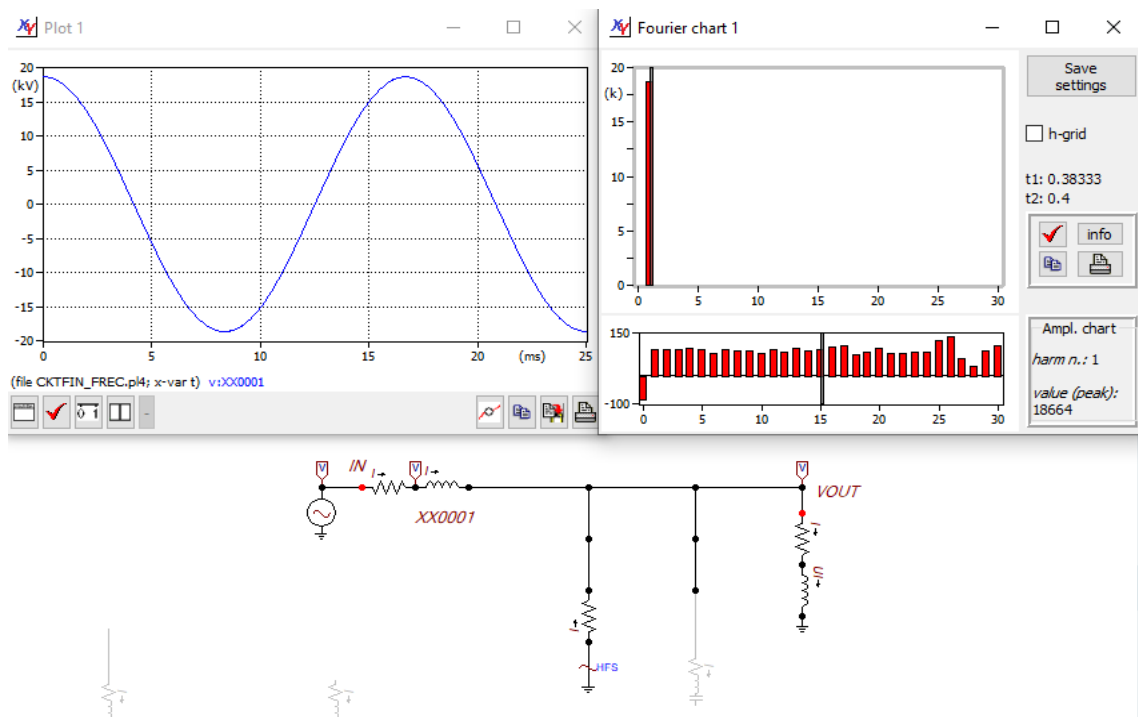


Ilustración 4. 13 señal de tensión y su análisis de Fourier para circuito con fuente armónica.

En la Ilustración 4. 14 se agregó el filtro para tercera armónica en el circuito para la simulación.

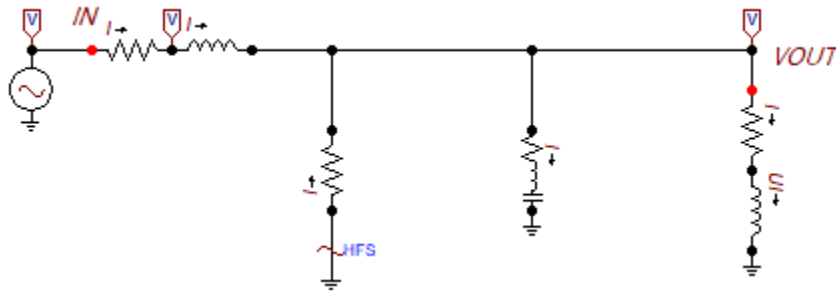


Ilustración 4. 14 circuito con la implementación del filtro.

Component: RLC

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	Ohm	10.97	From	1	VOUT
L	mH	800	To	1	
C	μ F	1.04			

Order: 0 Label:

Comment:

Output:

Hide

\$Vintage,1

NumPh 1

Ilustración 4. 15 valores del filtro para tercer armónico.

En la Ilustración 4. 15 se presentan la configuración de los valores del filtro calculados en la sección 4.1; los resultados de la simulación del circuito mostrado en la Ilustración 4. 14 se muestran a continuación.

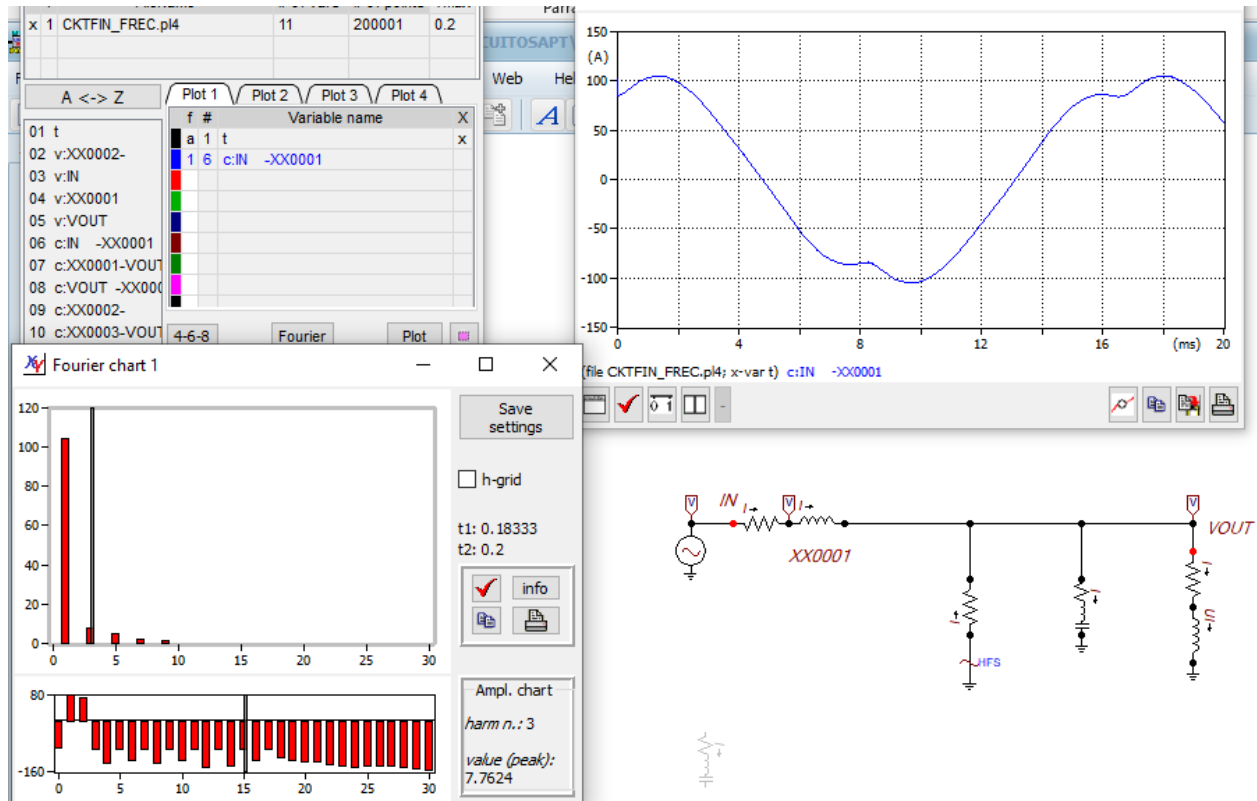


Ilustración 4. 16 resultados de la simulación de la implementación del filtro.

Como podemos observar al comparar las transformadas de Fourier de la Ilustración 4. 12 e Ilustración 4. 16, donde se aprecia una ligera disminución de 0.2 A en la magnitud del armónico tres (el cual es el armónico para el cual el filtro está diseñado), lo que representa el 2.53% de la magnitud del armónico a mitigar.

5. Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. Al graficar los valores armónicos de tensión medidos en una subestación de distribución que posee una capacidad de 150 MVA, no se observó distorsión importante en su forma de onda, siendo así que, la distorsión armónica de corriente no afecta en gran medida a la onda de tensión.
2. ATP es ideal para la realización de simulaciones de corrientes armónicas en circuitos de media tensión ya que permite de manera eficiente la inserción de todo el espectro armónico que conforma la corriente RMS de igual manera es posible observar en el dominio del tiempo y frecuencia la impedancia de la red y el desempeño del filtro donde se aprecia como este redujo en cierto grado la magnitud del tercer armónico.
3. De acuerdo a los datos medidos, la corriente que circula por el neutro en la bahía 2, alcanza valores hasta de 200 A, verificando la distorsión armónica de corriente de esta, se observa que el tercer armónico es el de mayor magnitud inclusive mayor que el fundamental, por ende, este es el causante de la operación bajo condiciones anormales del transformador de tierra; como es el caso de calentamiento en sus devanados; debido a que dicha corriente supera las condiciones típicas de operación del transformador de tierra, afectando con ello la vida útil de este equipo, de manera similar sucede con el conductor neutro de la distribuidora.
4. Comparando los mecanismos de control que establece SIGET con los de IEEE como lo son los indicadores THD y TDD respectivamente, se nota que el utilizado por SIGET (THD) es menos acorde al comportamiento de carga del sistema, es decir, puede llegar a mostrar valores altos en condiciones de carga baja, lo que daría una falsa idea de la distorsión del sistema; por otro lado, el TDD, sí representa el estado real de la distorsión en el sistema.
5. El filtro pasivo sintonizado cumple en cierta medida su cometido, pero en base a los resultados obtenidos en la simulación, no reduce de manera significativa el problema, además de tener la limitante de funcionar mejor en redes poco dinámicas, como no ocurre en un sistema de distribución común.

5.2. Recomendaciones

1. Se sugiere instalar el filtro para armónicos en la bahía de la subestación, siendo esta una posición estratégica, donde se le facilite la absorción de corrientes de distorsión armónica para la frecuencia de diseño.
2. Utilizar el banco de condensadores existente para la implementación del filtro pasivo logrando con esto la disminución de corrientes armónicas y corrección del factor de potencia.
3. Para convertidores estáticos de potencia se recomienda la implementación con tecnología de 12 pulsos ya que el espectro armónico de estos es representativo, a partir del armónico 11;

aliviando la generación de armónicos cercanos a la fundamental reduciendo la posibilidad que pueda existir un punto de resonancia a una frecuencia menor a 660 Hz.

4. Tratar de implementar una normativa o proyecto de ley que regule la distorsión armónica que puedan generar los dispositivos electrónicos que ingresen al país, así como reducir los límites permisibles de distorsión armónica generada por los usuarios.
5. Diseñar la red y dispositivos que formen parte de esta, de manera robusta, con el fin que sean capaces de soportar presencia armónica; es decir, dimensionar de manera que soporten la carga armónica, aquellos elementos de la red que se verían mayormente afectados, como lo son el conductor neutro, los transformadores existentes y bancos de capacitores si existen.

Referencias

- [1] I. 519-1992, IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system, 1992.
- [2] IEC, 60050: International Electrotechnical Vocabulary, 2017.
- [3] R. Gómez, U. Mendoza y E. Ortiz, «Diseño y construcción de filtros pasivos de pequeña potencia para la reducción de problemas de distorsión en cargas no lineales,» San Salvador, UES, 2009, p. 9.
- [4] S. J. Chapman, MÁQUINAS ELÉCTRICAS, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2005.
- [5] J. Frailes, Máquinas Eléctricas, España: Mc Graw Hill, 2008.
- [6] J. R. López, *Notas de Power Quality*, San Salvador, 2008.
- [7] IEEE, C57.32 Standard for Requirements, Terminology and test procedures for neutral grounding devices, 2015.
- [8] J. F. Mora, Maquinas Electricas, Madrid: Mc Graw Hill, 2008.
- [9] I. C57.32, IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Procedures for Neutral Grounding Devices, 1990.
- [10] A. S. Sedra y K. C. Smith, Circuitos microelectronicos, Mc Graw Hill, 1998.
- [11] C. A. Schuler, Electrónica principios y aplicaciones, Barcelona: Reverté, S.A., 2021.
- [12] R. Ibarra y M. S. Lopez, Principios de teoria de las comunicaciones., Mexico D.F.: LIMUSA S.A de C.V., 2007.
- [13] IEEE, Std 3002.8 Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems, 2018.

