

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



**ESTUDIO ARMÓNICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ÁREA
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

PRESENTADO POR:

ESCOBAR SARMIENTO, IRVIN JOSÉ

HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, RONAL ALEXANDER

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

M. SC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARÍA GENERAL

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

M. SC. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO

M. SC. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

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:

**ESTUDIO ARMÓNICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ÁREA
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

Presentado por:

**ESCOBAR SARMIENTO, IRVIN JOSÉ
HERNANDEZ GONZALEZ, RONAL ALEXANDER**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

PhD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

SAN SALVADOR, JUNIO DE 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

PhD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

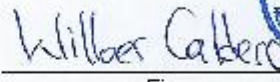
NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, **juv**es 15 de mayo de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma

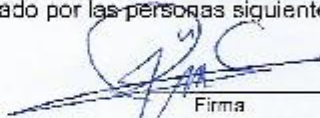
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

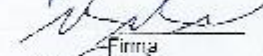


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSÉ ROBERTO RAMOS LÓPEZ


Firma

- ING. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ESTUDIO ARMÓNICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ RONAL ALEXANDER
- ESCOBAR SARMIENTO IRVIN JOSÉ

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

9.0

(Nueve punto cero)

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa tan significativa de mi formación académica, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en este proceso.

En primer lugar, agradezco a Dios, por haberme concedido la vida, la salud y la fortaleza necesaria para avanzar en cada etapa de este camino.

A mis padres, Guillermo Hernández y Esperanza González, por su apoyo incondicional, por inculcarme valores firmes, y apoyarme en cada decisión con paciencia, sacrificio y generosidad. Su ejemplo ha sido mi mayor inspiración.

A mi familia, por acompañarme en todo momento, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por brindarme siempre palabras de aliento y comprensión.

A mis amigos, Nicole Flores, Cristina Sánchez, Karen Duarte y Samuel Hernández, quienes con su apoyo, comprensión y compañía me ayudaron a sobrellevar los desafíos propios de este proceso. Gracias por estar presentes en los momentos de incertidumbre, y por celebrar también cada pequeño logro.

Asimismo, extiendo mi gratitud a todas las personas que, de forma directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este trabajo. Cada comentario, sugerencia o gesto de apoyo ha sido valioso y apreciado.

A todos, gracias por formar parte de este logro.

Ronal Alexander Hernández González

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme finalizar satisfactoriamente una etapa más en mi vida, de la cual me siento profundamente orgulloso.

A mi familia, especialmente a mis padres, Marta Alicia Sarmiento de Escobar y Julián Escobar Paz, les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino. A mis hermanos, Julián Ariel Escobar Sarmiento, Wilfredo Javier Escobar Sarmiento y Carlos Antonio Escobar Sarmiento, les agradezco sus palabras de aliento. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

A mi prometida, Johanna Arias, le agradezco su amor, apoyo incondicional y paciencia durante todo el proceso de elaboración de este trabajo. Su motivación y comprensión fueron esenciales para alcanzar este logro.

A mis amigos y compañeros, especialmente a Ronal Hernández, les agradezco su compañía y apoyo en los momentos de estrés y alegría. Ustedes fueron mi red de contención, y su amistad me ayudó a mantener el ánimo en los momentos más duros. Cada uno de ustedes contribuyó a que este proceso fuera más llevadero y significativo.

A mi asesor, el PhD. Carlos Pocasangre, le agradezco profundamente su experiencia, paciencia y apoyo, que fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su guía no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y superar los desafíos.

A los docentes de la EIE, en especial al Ing. José Ramos y al MSc. Luis Chevez, les agradezco su valiosa orientación y corrección durante la finalización de este trabajo.

A Reina Vides, le agradezco su cariño y apoyo constante desde el inicio de este trabajo.

A cada uno de ustedes, gracias totales.

Irvin Escobar Sarmiento

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
Objetivos	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	22
1.1 Definiciones	22
1.2 Distorsión armónica	24
1.3 Clasificación de armónicos	28
1.4 Clasificación de cargas.....	30
1.4.1 Cargas lineales	30
1.4.2 Cargas no lineales	32
1.5 Fuentes de distorsión armónica.....	32
1.5.1 Dispositivos ferromagnéticos.....	32
1.5.2 Convertidores estáticos	33
1.5.3 Dispositivos de arco.....	37
1.6 Repercusión de armónicos en las redes de distribución.....	37
1.6.1 Motores y Generadores	38
1.6.2 Transformadores	38
1.6.3 Conductores de Potencia:.....	38
1.6.4 Condensadores	38
1.6.5 Equipo electrónico	38
1.6.6 Medidores	39
1.6.7 Factor de potencia con presencia de armónicos.....	39
1.6.8 Resonancia	41
1.6.8.1 Resonancia paralelo:	41
1.6.8.2 Resonancia serie:	42
CAPÍTULO II: NORMATIVA LOCAL E INTERNACIONAL RELACIONADA AL CUMPLIMIENTO DE LOS NIVELES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	43

2.1 INSTITUTO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS Y ELECTRÓNICOS (IEEE-519) ...	43
2.1.1 Límites de distorsión de Tensión	43
2.1.2 Límites de distorsión de corriente.....	43
2.2 Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución de SIGET	45
2.2.1 Límites de distorsión de tensión	45
2.2.2 Límites de distorsión de corriente.....	46
2.2.4 COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC)	47
2.2.4.1 Estándar IEC 61000-3-2	47
2.2.4.2 Estándar IEC 61000-3-6	52
2.2.4.3 Estándar IEC 61000-4-7	54
2.2.4.4 Estándar IEC 61000-4-30	55
III METODOLOGÍA DE MEDICIÓN	57
3.1 Descripción del equipo Power Quality and Energy Analyzer 435 series II de Fluke.....	57
3.2 Normativas para la medición con el Analizador	58
3.3 Conexión del Analizador.....	59
3.4 Como conectar el Analizador.....	60
3.5 Configuración del Analizador	63
3.6 Configuración para la medición de Armónicos	66
3.7 Datos obtenidos por el Analizador	68
IV MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.....	69
Definición del área metropolitana de San Salvador.....	69
PUNTO 1: Medición del edificio de medicina de la Universidad de El Salvador	72
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	73
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	75
Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases	76
PUNTO 2: Productos Alimenticios Bocadeli S.A. de C.V.....	80
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	81
Tendencia de la distorsión armónica total THD de tensión	83
Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases	84
PUNTO 3: Antigua Casa Presidencial	88
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	89

Tendencia de la distorsión armónica de tensión presente en cada una de las fases	90
Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases	92
PUNTO 4: Planta fotovoltaica MAS SOLAR	95
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	96
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	97
Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en cada una de las fases.....	99
PUNTO 5: Plaza libertad	102
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	103
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	104
Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión	106
PUNTO 6: Biblioteca Nacional de El Salvador (BINAES).....	109
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases	110
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	111
Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión	113
PUNTO 7: Aluminio de Centro América S.A. de C.V.....	116
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada fase.....	117
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	118
Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión	120
PUNTO 8: San Miguel Industrias PET S.A. de C.V.....	123
Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada fase y neutro	124
Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión	126
Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada fase.....	127
VERIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN EN CADA PUNTO DE MEDICIÓN	131
V MÉTODOS PARA MINIMIZAR LOS ARMÓNICOS	132
FILTROS PARA ARMÓNICOS	132
FILTROS PASIVOS	132
Clasificación de Filtros Pasivos	134
FILTROS ACTIVOS.....	134
Clasificación de Filtros Activos	138
TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA	138

CONEXIÓN ZIG – ZAG.....	139
SIMULACIÓN CON SOFTWARE ATP DRAW	141
CÁLCULO DE FILTRO SINTONIZADO SEGÚN IEEE STD. 3002.8-2018.....	141
SIMULACIÓN CON ATP DRAW	143
CONCLUSIONES	153
SUGERENCIAS.....	155
ANEXOS	159
Límites de distorsión armónica de tensión establecidos en la norma EN50160.....	159

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de armónicos	28
Tabla 2	Límites de distorsión de un Horno de Arco.....	37
Tabla 3	Límites de distorsión armónica de tensión en el punto de acoplamiento común (PCC) 43	
Tabla 4	Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal de 120 V a 69 kV	44
Tabla 5	Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal de 69 kV a 161 kV	44
Tabla 6	Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal mayor a 161 kV	45
Tabla 7	Límites de distorsión armónica de tensión en redes de media y baja tensión	46
Tabla 8	Límites de distorsión de corriente de carga en media y baja tensión	47
Tabla 9	Clasificación de equipos según su clase de diseño	48
Tabla 10	Límites de distorsión de corriente para los equipos de clase "A"	49
Tabla 11	Límites de distorsión de corriente para los equipos de clase "B"	50
Tabla 12	Límites de distorsión de corriente para equipos clase "C"	51
Tabla 13	Límites de distorsión de corriente para equipos clase "D"	52
Tabla 14	Niveles de compatibilidad para tensiones armónicas, en porcentajes de tensión nominal	53
Tabla 15	Niveles de planeación para tensiones armónicas en porcentajes de tensión nominal para MV, HV y EHV	54
Tabla 16	Requisitos de precisión para las mediciones de corriente, tensión y potencia	55
Tabla 17	Clases de equipo y sus características de medición	56
Tabla 18	Distribución de usuarios correspondientes a cada distrito que conforma el AMSS.....	71
Tabla 19	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	72
Tabla 20	Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	79
Tabla 21	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	80
Tabla 22	Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	87
Tabla 23	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	88
Tabla 24	Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	94
Tabla 25	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	95
Tabla 26	Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos.....	101
Tabla 27	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	102
Tabla 28	Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	108
Tabla 29	Resumen de datos de la configuración del punto de medición	109

Tabla 30 Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	115
Tabla 31 Resumen de datos de la configuración del punto de medición	116
Tabla 32 Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos	122
Tabla 33 Resumen de datos de la configuración del punto de medición	123
Tabla 34 Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 sobre los niveles de distorsión armónica permitidos.....	130
Tabla 35 Verificación de los niveles de distorsión armónica de tensión presentes en cada uno de los puntos de medición con respecto a la normativa de SIGET e IEEE 519	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Señal de onda de tensión y corriente correspondiente a una carga no lineal	24
Figura 2	Función original de una onda distorsionada.....	25
Figura 3	Componente fundamental de una onda sinusoidal.....	26
Figura 4	Componente correspondiente a la quinta armónica	26
Figura 5	Componente correspondiente a la séptima armónica.....	27
Figura 6	Componente correspondiente a la novena armónica.....	27
Figura 7	Fasores de secuencia positiva.....	29
Figura 8	Fasores de secuencia negativa.....	29
Figura 9	Fasores de secuencia cero.....	30
Figura 10	Circuito RC correspondiente a una carga lineal.....	31
Figura 11	Forma de onda de tensión y corriente del circuito.....	31
Figura 12	Forma de onda de tensión y corriente de un núcleo ferromagnético.....	33
Figura 13	Circuito rectificador de un puente monofásico	34
Figura 14	Forma de onda de tensión y corriente de entrada al circuito.....	35
Figura 15	Espectro de la FFT del circuito de la figura 14	36
Figura 16	Representación fasorial del factor de potencia.....	39
Figura 17	Diagrama fasorial de potencia cuando hay contenido armónico.....	40
Figura 18	Condición de resonancia en paralelo.....	42
Figura 19	Condición de resonancia en serie	42
Figura 20	Analizador de energía y calidad eléctrica 435 serie II de Fluke.....	58
Figura 21	Montaje de etiquetas para entradas de tensión y corriente.....	61
Figura 22	Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.....	61
Figura 23	Diagrama de vectores correspondiente al analizador conectado correctamente	62
Figura 24	Pantalla de entrada a las configuraciones del analizador	63
Figura 25	Pantalla de bienvenida al encender el analizador	64
Figura 26	Pantalla que muestra la configuración real del cableado	64
Figura 27	Teclas para desplazarse por los menús y realizar selecciones.....	66
Figura 28	Teclas de función disponibles para acceder a la pantalla multímetro	67
Figura 29	Teclas de función disponibles para acceder a las tablas de eventos.....	68
Figura 30	Distritos que conforman el área metropolitana de San Salvador (AMSS).....	69
Figura 31	Nueva distribución de municipios en El Salvador	70
Figura 32	Ubicación del edificio de Medicina, Universidad de El Salvador (UES)	72
Figura 33	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	73
Figura 34	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	73
Figura 35	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios.....	74
Figura 36	Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios	74
Figura 37	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje	75
Figura 38	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje	75
Figura 39	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje	76

Figura 40	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en porcentaje	76
Figura 41	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en porcentaje	77
Figura 42	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en porcentaje	77
Figura 43	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	78
Figura 44	Ubicación correspondiente a empresa productora BOCADELI	80
Figura 45	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	81
Figura 46	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	81
Figura 47	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios.....	82
Figura 48	Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios	82
Figura 49	Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "A" en porcentaje.....	83
Figura 50	Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "B" en porcentaje	83
Figura 51	Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "C" en porcentaje	84
Figura 52	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios	84
Figura 53	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios.....	85
Figura 54	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	85
Figura 55	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	86
Figura 56	Ubicación correspondiente a Antigua Casa Presidencial	88
Figura 57	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	89
Figura 58	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	89
Figura 59	Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios	90
Figura 60	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en Voltios.....	90
Figura 61	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en Voltios	91
Figura 62	Tendencia del THD de tensión presente en el conductor Neutro en Voltios	91
Figura 63	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios	92
Figura 64	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	92
Figura 65	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios	93
Figura 66	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	93
Figura 67	Ubicación correspondiente a Planta FV MAS SOLAR	95
Figura 68	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	96
Figura 69	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	96
Figura 70	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios.....	97
Figura 71	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje	97
Figura 72	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje	98
Figura 73	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje	98
Figura 74	Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios	99
Figura 75	Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios	99
Figura 76	Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios	100
Figura 77	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	100
Figura 78	Ubicación correspondiente a transformador de distribución en Plaza Libertad.....	102

Figura 79	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	103
Figura 80	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	103
Figura 81	Intensidad de corriente que circula por el conductor "Neutro" en Amperios.....	104
Figura 82	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en Voltios.....	104
Figura 83	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	105
Figura 84	Tendencia del THD de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios.....	105
Figura 85	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios.....	106
Figura 86	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	106
Figura 87	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios.....	107
Figura 88	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	107
Figura 89	Ubicación correspondiente a la Biblioteca Nacional de El Salvador.....	109
Figura 90	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	110
Figura 91	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	110
Figura 92	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios.....	111
Figura 93	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje.....	111
Figura 94	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje.....	112
Figura 95	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje.....	112
Figura 96	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios.....	113
Figura 97	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	113
Figura 98	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios.....	114
Figura 99	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	114
Figura 100	Ubicación correspondiente a empresa ALDECA.....	116
Figura 101	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios.....	117
Figura 102	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios.....	117
Figura 103	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios.....	118
Figura 104	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje.....	118
Figura 105	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje.....	119
Figura 106	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje.....	119
Figura 107	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios.....	120
Figura 108	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios.....	120
Figura 109	Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios.....	121

Figura 110	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	121
Figura 111	Ubicación correspondiente a compañía SMI PET	123
Figura 112	Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios	124
Figura 113	Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios	124
Figura 114	Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios	125
Figura 115	Intensidad de corriente que circula por el conductor "Neutro" en Amperios	125
Figura 116	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje.....	126
Figura 117	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje.....	126
Figura 118	Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje.....	127
Figura 119	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios...	127
Figura 120	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios...	128
Figura 121	Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios..	128
Figura 122	Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT).....	129
Figura 123	Compensación pasiva de energía reactiva y eliminación de armónicos.....	133
Figura 124	Convertidor monofásico o medio puente	135
Figura 125	Convertidor monofásico de puente completo.....	136
Figura 126	Convertidor trifásico de tres hilos	136
Figura 127	Convertidor trifásico de cuatro hilos con compensación de neutro	137
Figura 128	Convertidor trifásico, dispositivo de almacenamiento a) Capacitivo b) Inductivo	137
Figura 129	Transformador con conexión estrella zig – zag.....	139
Figura 130	Diagrama vectorial de las F.E.M, a) lado primario b) lado secundario.....	140
Figura 131	Especificación de fuente de tensión	143
Figura 132	Componente resistivo de Impedancia Thévenin	144
Figura 133	Componente reactivo de Impedancia Thévenin	144
Figura 134	Componente resistivo de impedancia de carga	145
Figura 135	Componente reactivo de impedancia de carga	145
Figura 136	Circuito equivalente para simulación	146
Figura 137	Forma de onda de tensión (azul) y corriente (roja) que reproduce la corriente de carga y el factor de potencia	146
Figura 138	Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito equivalente.	147
Figura 139	Circuito con distorsión armónica	147
Figura 140	Valores configurados de la fuente armónica de tensión para la simulación	148
Figura 141	Forma de onda de tensión con distorsión armónica	148
Figura 142	Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito con distorsión armónica de tensión.....	149
Figura 143	Cociente del componente armónico individual con respecto al fundamental	149
Figura 144	Circuito con filtro pasivo sintonizado (RLC).....	150
Figura 145	Valores aplicados al filtro pasivo sintonizado (RLC).....	150
Figura 146	Onda de tensión aplicando filtro pasivo sintonizado (RLC).....	151

Figura 147 Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito con filtro pasivo sintonizado (RLC)	151
Figura 148 Cociente del componente armónico individual con respecto al fundamental	152

INTRODUCCIÓN

Con la implementación de la electrónica en la mayoría de los equipos que se usan en la industria y en la vida cotidiana ha provocado un incremento en las distorsiones armónicas que afectan a la red de distribución, dando lugar a una menor eficiencia y calidad de la energía, siendo así, la tercera armónica la más común y según el estudio (Ramos et al., 2022) en el AMSS se acerca al límite establecido en (SIGET, 2014). Los armónicos se producen por la conexión de cargas no lineales a la red, consideradas como frecuencias múltiplos que se suman a la corriente o tensión. Este tipo de cargas posee niveles altos de contenido armónico, por lo que superan la capacidad de carga máxima que pueden soportar los conductores y provoquen un calentamiento, como en los transformadores de tierra y aparezca una corriente por el neutro (Alberto et al., 2022). Las cargas no líneas provocan una distorsión en la forma de onda de corriente con respecto a la onda sinusoidal pura de la frecuencia fundamental. (Mario et al., 2006). Hoy en día, medir la distorsión armónica es un parámetro importante debido a la proliferación de cargas no lineales y se debe garantizar que esa distorsión se mantenga dentro de un límite establecido para asegurar la calidad de la electricidad. Según la normativa internacional relacionadas a la calidad de la energía ((EN50160, 2001), IEE519 e IEC 61000) establecen que es necesario mantener los límites de corrientes armónicas en los dispositivos y servicios eléctricos en general, dentro de los valores permisibles. (Velez Valdiviezo Steven Elias, 2023). Ante la presencia de contenido armónico es necesario disminuir los niveles de distorsión armónica por debajo del 5% según el estándar (IEEE, 1992) y por debajo del 8% según la normativa de (SIGET, 2014). Comúnmente para un sistema conectado a tierra conduce la corriente del neutro, ocasionando problemas en cuanto a los armónicos triples u homopolares (Rosero & Orizondo, 2023). De esta forma en un sistema de distribución de cuatro hilos, es común que haya una reducción en la capacidad del suministro eléctrico. Por lo que una inyección triple de armónicos por parte de las cargas no lineales aumenta significativamente el nivel de distorsión en el hilo neutro de la fuente. Normalmente, en este tipo de sistemas las cargas no están balanceadas uniformemente, lo que provoca un excedente de corrientes por el neutro, tanto de corriente fundamental como armónica. De esta manera, un sistema trifásico incluso balanceado, las corrientes no se anulan entre sí, sino que se suman. Por tanto, la parte fundamental y armónica afectaran a la corriente total por el neutro. Un método para reducir la corriente por el neutro y eliminar las corrientes armónicas de secuencia cero es el

transformador conectado en zigzag, ya que por su conexión provee una ruta de circulación de estas corrientes, permitiendo que fluya hacia el neutro del transformador (Rosero & Orizondo, 2023). La normativa de SIGET establece un periodo mínimo de medición de siete días. La duración del intervalo de medición de la distorsión armónica será de diez minutos. Se establece un percentil del 95% de niveles de compatibilidad y límites de emisión. SIGET determinará los puntos de verificación del nivel de efecto de distorsión armónica de tensión en las redes de distribución, es decir, designando a cada empresa distribuidora un (1) punto de verificación por cada sesenta mil (60,000) usuarios. Adicionalmente, se determinará el diseño de un filtro pasivo sintonizado para uno de los puntos de medición, según el estándar (IEEE, 2018), de acuerdo con las características de la red. Posteriormente, se realizará la simulación haciendo uso del software ATP Draw y se analizarán los resultados correspondientes.

Objetivos

Objetivo general

Verificar que los niveles de distorsión armónica presentes en los puntos de medición han sobrepasado los límites establecidos por la normativa de SIGET.

Objetivos específicos

- Recopilar información respecto a los puntos representativos de la red de distribución eléctrica en el área metropolitana de San Salvador.
- Proponer metodologías de medición de tensión en los puntos seleccionados.
- Analizar los datos obtenidos en los diferentes puntos de medición para identificar los niveles de distorsión armónica.
- Comparar los niveles de distorsión armónica medidos con los límites permitidos por la normativa de SIGET y de la IEEE Std. 519.
- Proponer soluciones para reducir la distorsión armónica.
- Verificar que los niveles de distorsión armónica presentes en los puntos de medición han sobrepasado los límites establecidos por la normativa de SIGET.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Definiciones

Calidad de energía (Power Quality)

Es el concepto de alimentación y conexión a tierra de los equipos electrónicos de forma adecuada para el funcionamiento de dichos equipos y compatible con el sistema de cableado de la instalación y otros equipos conectados. (IEEE, 2005)

Valor RMS (Root Mean Square Value)

Se trata de una magnitud senoidal, se llama valor eficaz o efectivo, y es igual a la media cuadrática (raíz cuadrada de la media de los cuadrados) de los valores que toma la variable durante un período, resultando ser equivalente al valor máximo dividido por $\sqrt{2}$. (J. Roberto Ramos López, n.d.)

Carga lineal

En sistemas de potencia de corriente alterna se clasifican de carga lineal aquellas con tensión senoidal y que extraen la corriente también de forma senoidal, es decir, la forma de onda de corriente es igual a la de la tensión (J. Roberto Ramos López, n.d.)

Carga no lineal

En los circuitos en los que su curva corriente – tensión no es lineal, la tensión aplicada no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal. (Armonica et al., 2012)

Factor de distorsión (factor armónico)

Se establece como la relación de la raíz cuadrada de los armónicos contenidos al valor efectivo de la cantidad fundamental, expresado en porcentaje de la fundamental. (IEEE, 1992)

$$DF = \sqrt{\frac{\text{suma de los cuadrados de las amplitudes de todos los armónicos}}{\text{cuadrado de la amplitud fundamental}}} * 100 \quad (1)$$

Factor armónico

La relación del valor de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (rms) de todos los armónicos al valor efectivo (rms) de la fundamental. (IEEE, 1992)

$$\text{Factor armónico (para tensión)} = \frac{\sqrt{E^2_3 + E^2_5 + E^2_7 \dots}}{E_1} \quad (2)$$

$$\text{Factor armónico (para corriente)} = \frac{\sqrt{I^2_3 + I^2_5 + I^2_7 \dots}}{I_1} \quad (3)$$

Filtro

Es un término genérico usado para definir aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir el flujo de corriente o tensión armónica aplicado a las partes específicas de un sistema de potencia eléctrica. (IEEE, 1992)

Armónicos (Componentes armónicos)

Componentes de orden superior a uno de la serie de Fourier de una magnitud periódica. Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, el armónico de orden 3, también conocido como “tercer armónico” es de 180 Hz. (IEEE, 2022)

Interarmónicos (componentes armónicos)

Componentes de frecuencia de una magnitud periódica que no son un múltiplo entero de la frecuencia a la que funciona el sistema de alimentación (por ejemplo, 75 Hz en un sistema de 50 Hz o 60 Hz). (IEEE, 2022)

Relación de cortocircuito (SCR)

En un lugar determinado, la relación entre la corriente de cortocircuito disponible, en amperios, a la corriente de carga de demanda máxima, en amperios. (IEEE, 2022)

Punto de acoplamiento común (PCC)

Punto de un sistema público de suministro de energía, eléctricamente más cercano a una determinada en el que se conectan o podrían conectarse otras cargas. El PCC es un punto situado aguas arriba de la instalación considerada. (IEEE, 2022)

Distorsión total de la demanda (TDD)

La relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico, considerando componentes hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como porcentaje de la corriente de carga de máxima demanda. Las componentes armónicas de orden superior a 50 podrían incluirse cuando sea necesario. (IEEE, 2022)

Distorsión armónica total (THD)

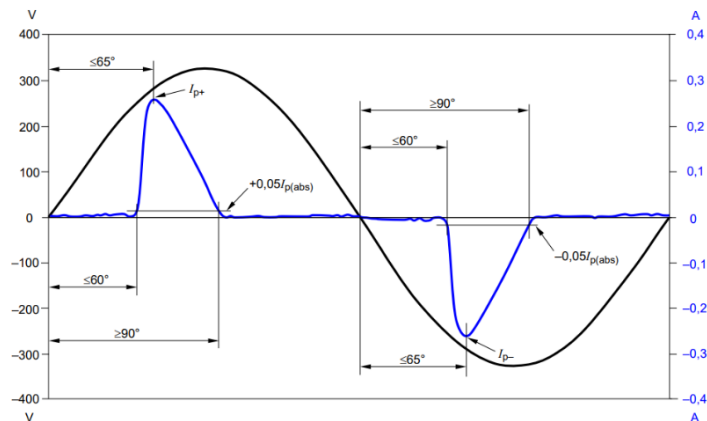
La relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico, considerando componentes hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como porcentaje de la fundamental. Los componentes armónicos de orden superior a 50 pueden incluirse cuando sean necesario. (IEEE, 2022)

1.2 Distorsión armónica

Cuando la forma de onda de tensión o de corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada. (Armonica et al., 2012). Las armónicas están relacionadas con condiciones permanentes, en los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tengan una cierta distorsión que cuando es pequeña, no ocasiona problemas con el funcionamiento de equipos y dispositivos.

Figura 1

Señal de onda de tensión y corriente correspondiente a una carga no lineal

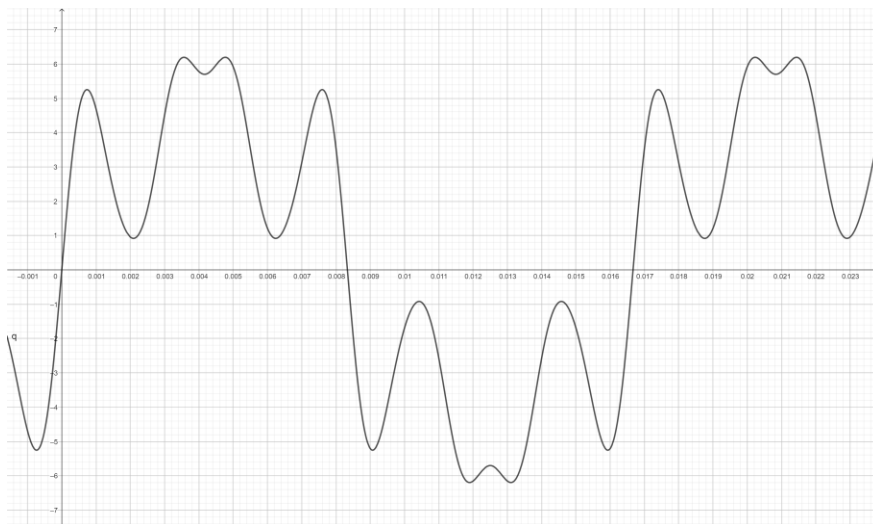


Nota: Se muestra la distorsión en la forma de onda de corriente y el ángulo de fase relativo. Tomado de (IEC, 2014)

El concepto de armónica viene dado por el teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma infinita de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto son funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas (Armónica et al., n.d.). A continuación, se muestra una función distorsionada y su descomposición por Fourier.

Figura 2

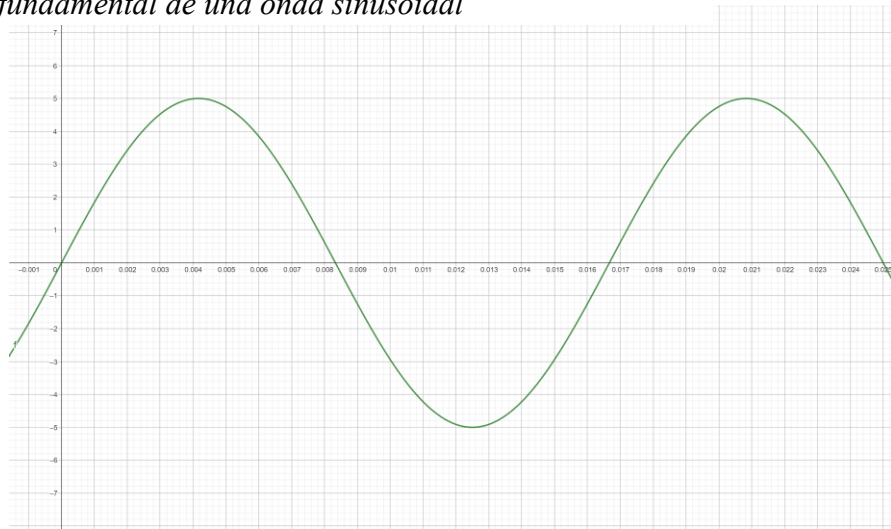
Función original de una onda distorsionada



Nota: Se muestra la forma de onda distorsionada, basado en (Rene Rodil Gomez et al., 2009)

Figura 3

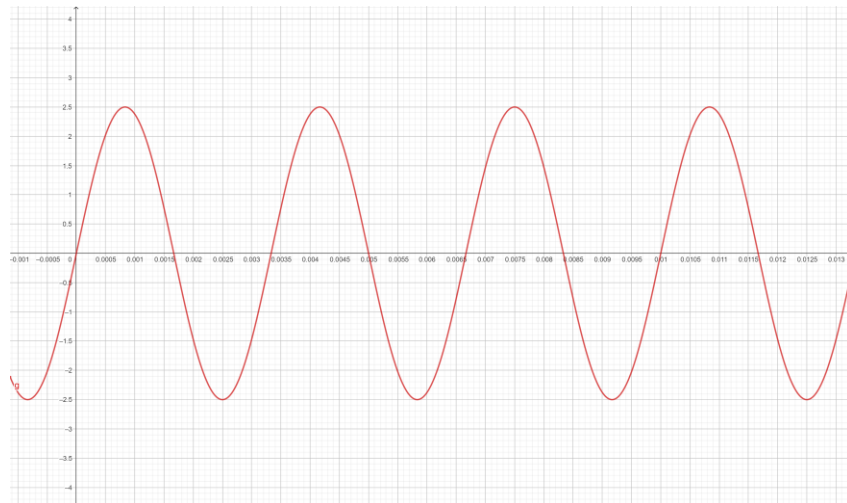
Componente fundamental de una onda sinusoidal



Nota: Se muestra la componente fundamental que para nuestro sistema es 60 Hz (SIGET, 2014)

Figura 4

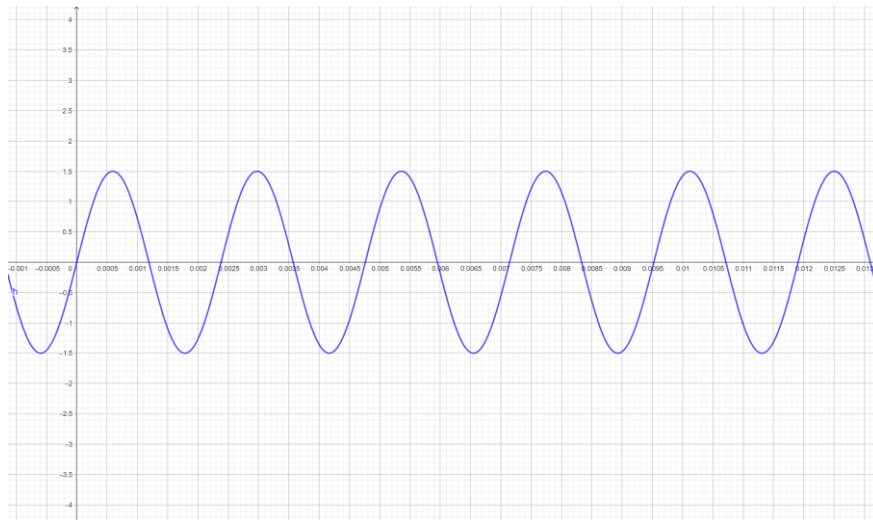
Componente correspondiente a la quinta armónica



Nota: Basado en (Oppenheim-Señales y Sistemas-2da Edición, n.d.)

Figura 5

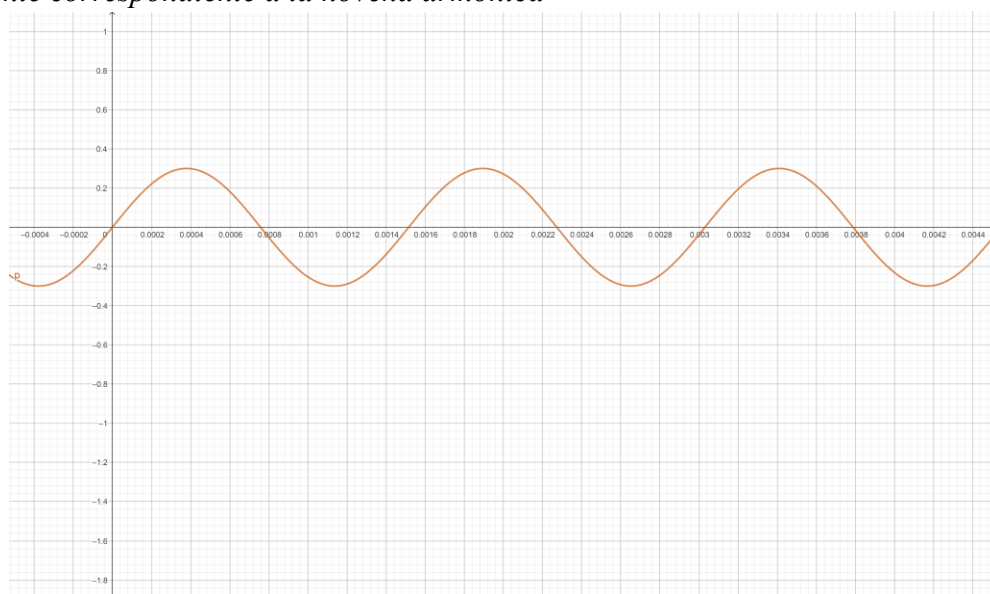
Componente correspondiente a la séptima armónica



Nota: basado en (Oppenheim-Señales y Sistemas-2da Edición, n.d.)

Figura 6

Componente correspondiente a la novena armónica



Nota: basado en (Oppenheim-Señales y Sistemas-2da Edición, n.d.)

Los armónicos generalmente son inyectados a la red por la conexión de cargas industriales no lineales y si la magnitud de estos es suficientemente elevada puede provocar daños en la red eléctrica y afectar a otros consumidores (Heidi et al., 2008). Los armónicos pueden provocar diferentes afectaciones al sistema de potencia como el aumento de pérdidas en la potencia activa, fallas en los bancos de condensadores ya sea por resonancia o sobretensiones, deterioro prematuro del aislamiento y el acortamiento de la vida de equipos. Además, hay informes de las empresas de servicios públicos han comprobado que se produce sobrecalentamiento significativo en los transformadores de tierra debido a corrientes de tercer armónico.(Alberto et al., 2022). La tercera armónica tiene una tendencia a superar los límites establecidos por (SIGET, 2014). según el estudio realizado en un nodo del área metropolitana de San Salvador (Ramos et al., n.d.).

1.3 Clasificación de armónicos

Las señales de corriente o tensión normalmente se pueden clasificar como pares, impares y triples. Donde las magnitudes que presentan los armónicos impares son las más significativas, lo que es más perjudicial para el sistema. Estos armónicos pueden aparecer de manera indefinida y se presentan como secuencia positiva, secuencia negativa y cero (Rene Rodil Gomez et al., 2009).

Tabla 1

Clasificación de armónicos

Corrientes Armónicas	
	h
Secuencia Positiva	1,7,13, ...
Secuencia Negativa	5,11,17, ...
Secuencia Cero	3,9,15, ...

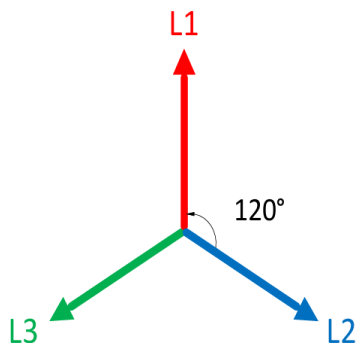
Nota: Tomado de (Rosero & Orizondo, 2023)

Los armónicos triples se atribuyen a la composición de múltiplos impares del tercer armónico que originan corrientes elevadas que circulan por el neutro en sistemas de configuración en estrella aterrizada. Cabe mencionar que los armónicos de secuencia cero son los que concuerdan con los armónicos triples. Para la descomposición fasorial de un sistema trifásico desbalanceado a uno balanceado, se requiere un análisis de secuencia positiva (figura 7) donde sus tres fasores

tienen la misma magnitud y se encuentran desfasados 120° , la secuencia negativa (figura 8) corresponden a tres fasores de igual magnitud con un desfase de 120° en sentido opuesto, de la misma manera la secuencia cero (figura 9) mantiene las magnitudes iguales en sus tres componentes, con un desfase nulo (Rosero & Orizondo, 2023)

Figura 7

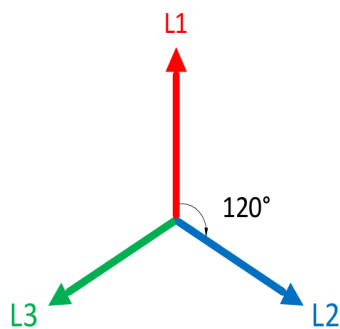
Fasores de secuencia positiva



Nota: Tomado de (Rosero & Orizondo, 2023)

Figura 8

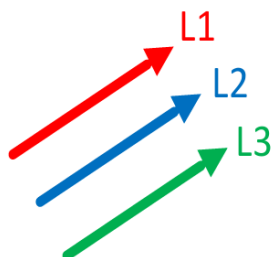
Fasores de secuencia



Nota: Tomado de (Rosero & Orizondo, 2023)

Figura 9

Fasores de secuencia cero



Nota: Tonado de (Rosero & Orizondo, 2023)

1.4 Clasificación de cargas

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.

1.4.1 Cargas lineales

Las cargas eléctricas en sistemas de potencia de CA con tensiones senoidales son clasificadas por la forma en que se extrae la corriente del sistema. Por ejemplo, las cargas que extraen corrientes senoidales son definidas como cargas lineales. En este caso, las formas de onda de las corrientes son iguales a las formas de onda de la tensión. Históricamente, un alto porcentaje de las cargas eléctricas han sido lineales. Las cargas lineales utilizan la potencia activa de CA directamente para desarrollar sus funciones.

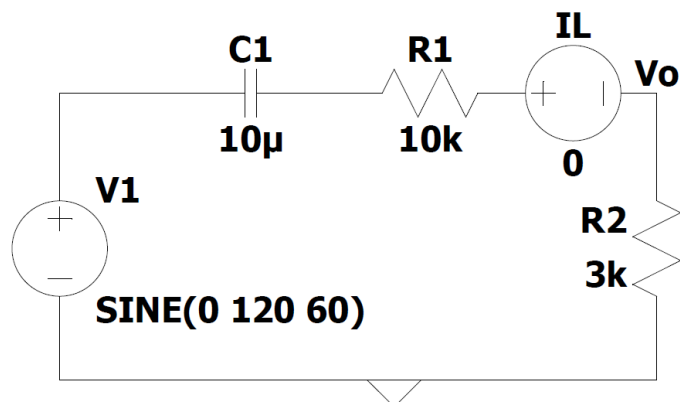
La característica principal de estas cargas es que si son alimentadas por una fuente sinusoidal demandan una corriente eléctrica sinusoidal (libre de contenido armónico), en este grupo se incluyen:

1. Resistencias
2. Inductores
3. Capacitores

En el caso de estos últimos no generan contenido armónico, sin embargo, debido a su propiedad de almacenar energía y de ser alimentados con corrientes armónicas, estos, podrían amplificarla.

Figura 10

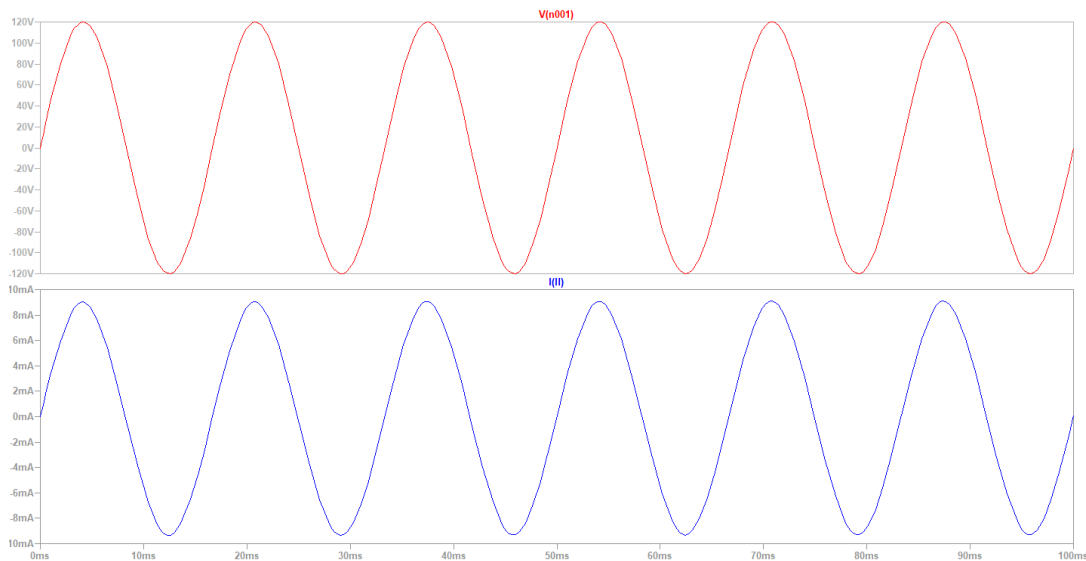
Circuito RC correspondiente a una carga lineal



Nota: basada en (Alberto et al., 2022)

Figura 11

Forma de onda de tensión y corriente del circuito



Nota: Basada en (Alberto et al., 2022)

1.4.2 Cargas no lineales

Las cargas eléctricas que extraen corrientes no senoidales son definidas como cargas no lineales. En este caso, al alimentar este tipo de cargas con una fuente de tensión sinusoidal, no demanda una corriente con el mismo tipo de onda, es decir, difieren en sus formas de onda. A medida que son enfatizados los ahorros de energía y el uso eficiente de electricidad, se han instalado muchos dispositivos eléctricos no lineales. Las cargas no lineales, no utilizan la potencia de CA directamente, frecuentemente convierten la potencia de CA a CD antes de ser utilizada para desarrollar sus funciones. Un componente común en las cargas no lineales es el rectificador de CA a CD, los rectificadores no extraen corrientes senoidales.

La generación de armónicos se encuentra inmerso en este grupo. Cuando se habla de fuentes generadoras de armónicos, se pueden separar en tres grupos:

1. Dispositivos ferromagnéticos
2. Convertidores estáticos
3. Dispositivos de arco eléctrico

Cada uno de estos grupos generan corrientes armónicas.

1.5 Fuentes de distorsión armónica

1.5.1 Dispositivos ferromagnéticos

Este tipo de dispositivos tales como:

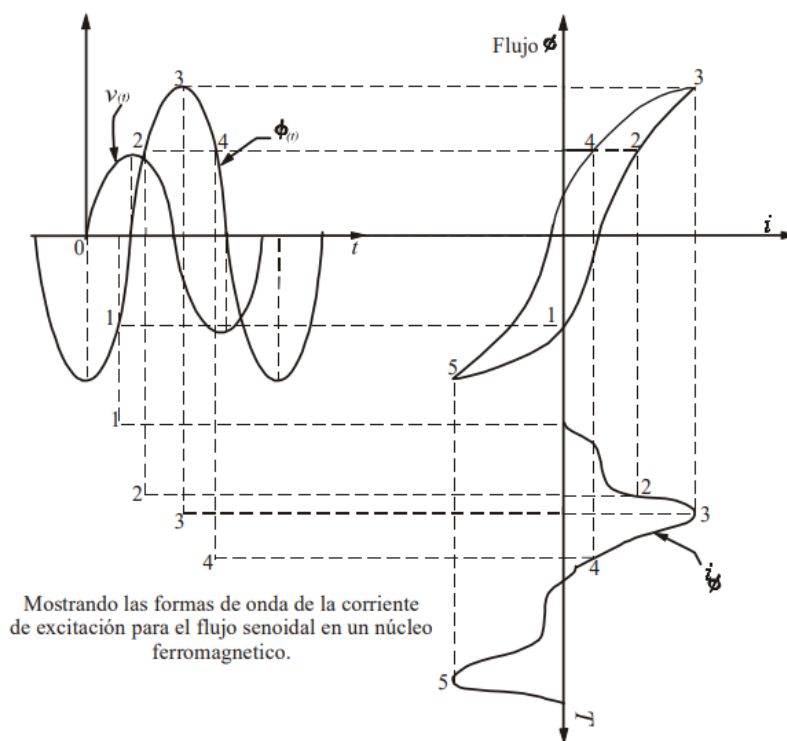
1. Transformadores
2. Motores
3. Generadores
4. Reactores

Son inductores y generan corrientes armónicas debido a su naturaleza de funcionamiento, dado que, al poseer núcleos de materiales saturables se quiere un gran cambio en su intensidad de campo magnético H , para tener un pequeño cambio en su densidad de flujo magnético B , lo cual

deriva al fenómeno de multiplicación de armónicos, por lo tanto, se genera una cantidad mayor de corrientes armónicas, predominando la de tercer orden.

Figura 12

Forma de onda de tensión y corriente de un núcleo ferromagnético



Nota: Tomado de (Gutierrez, 2000)

1.5.2 Convertidores estáticos

En este tipo de dispositivos Figura 10, al no consumir corriente de manera constante se da como resultado la generación de corrientes armónicas, debido a que, al ser alimentados por una tensión sinusoidal, consumen una corriente con forma de onda que difiere de una sinusoidal. Estos dispositivos son la mayor fuente de armónicos, debido a que son utilizados en la industria y de uso cotidiano, entre estos se tiene:

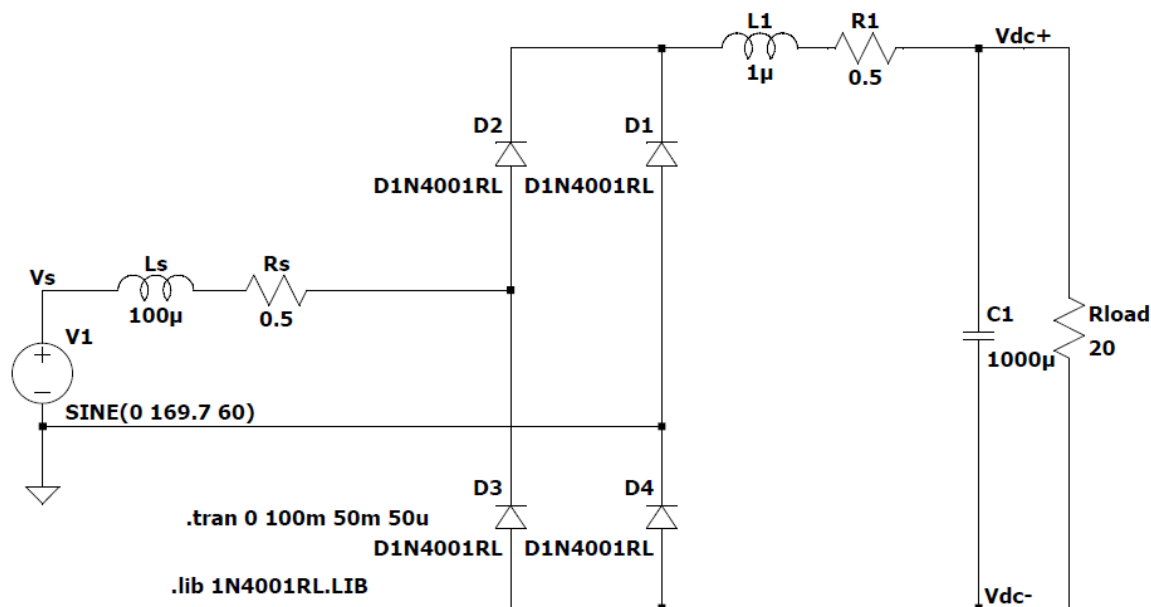
1. Variadores de velocidad (para motores eléctricos)

2. Sistemas ininterrumpidos de potencia (UPS)
3. Luminarias LED
4. Sistemas de enfriamiento invertir
5. Muchos electrodomésticos muy utilizados.

Cuanto más cercano se encuentre la frecuencia de un armónico de la fundamental (en su mayoría) mayor será la magnitud, debido a esto los convertidores monofásicos de cuatro pulsos generan armónicos de orden 3, los convertidores de seis pulsos generan armónicos de orden 5, los convertidores de doce pulsos generan armónicos de orden 11, notándose así, que a mayor cantidad de pulsos presenta un convertidor menor será su contenido armónico cerca de la frecuencia fundamental, la desventaja, es que se requieren mayor electrónica de potencia, por lo tanto, implicaría un mayor costo.

Figura 13

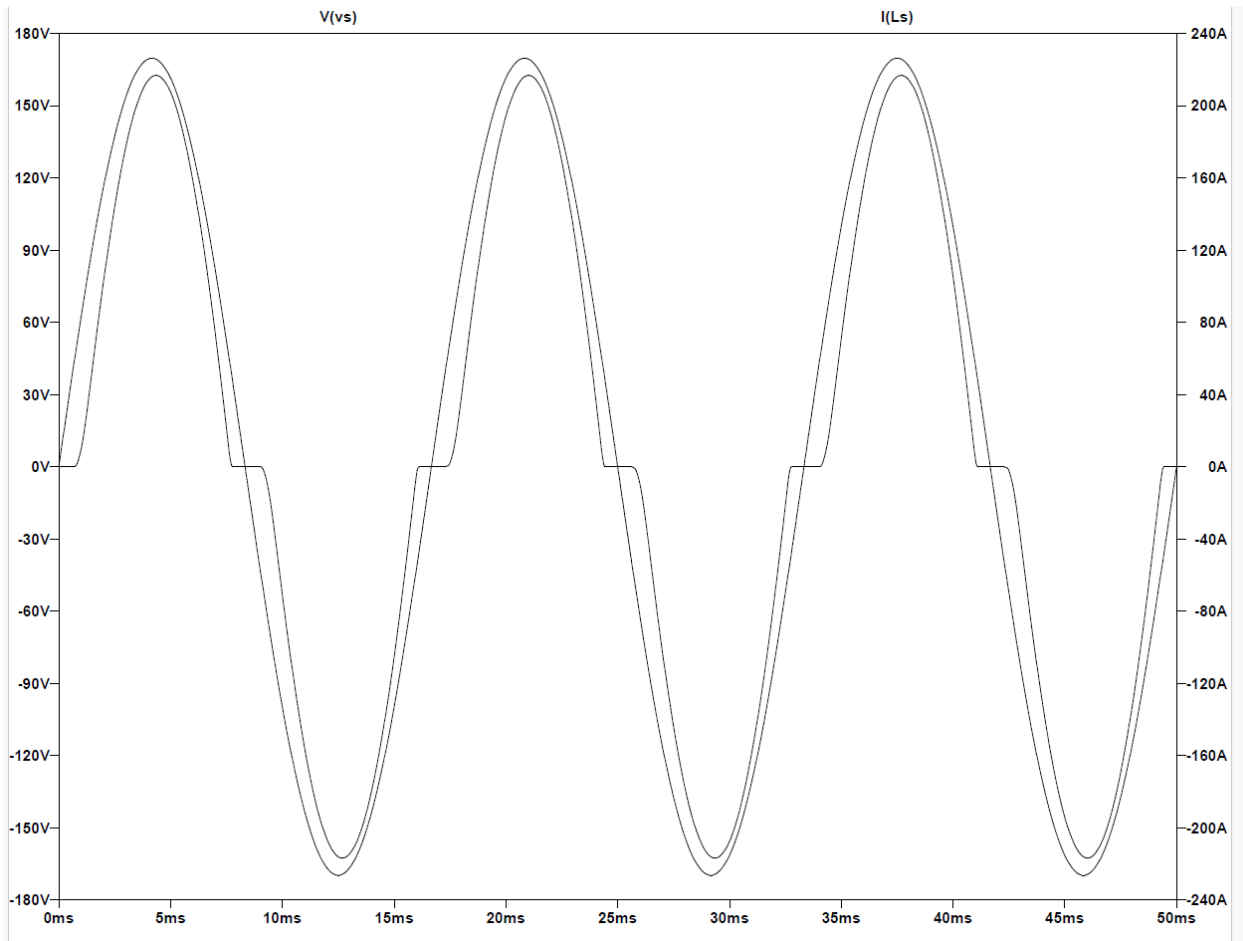
Circuito rectificador de un puente monofásico



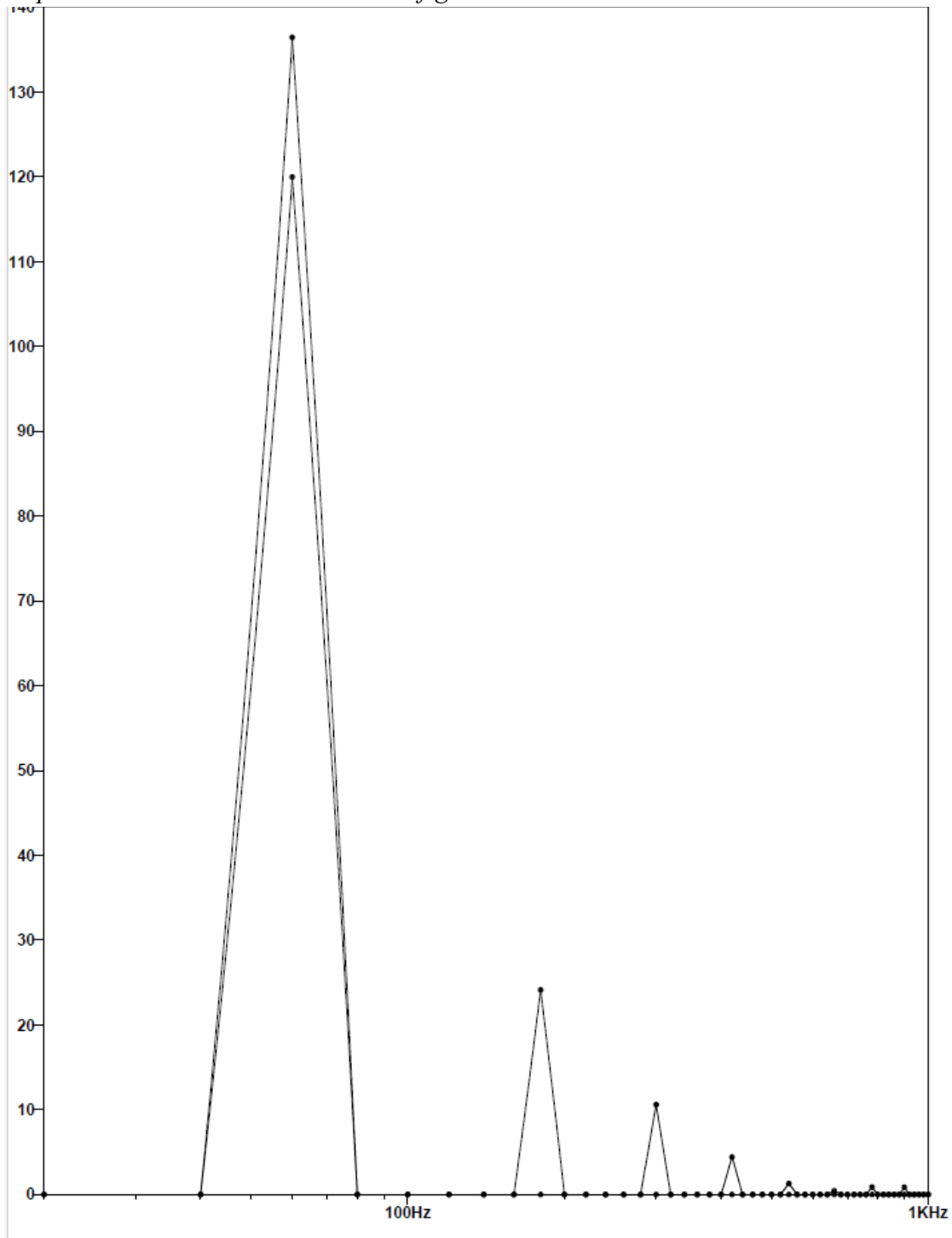
Nota: basado de (Ramos López, 2023.)

Figura 14

Forma de onda de tensión y corriente de entrada al circuito



Nota: Se muestra la forma de onda y corriente, es notable que la corriente se distorsiona y adelanta a la tensión. Basado en (Ramos López, 2023.)

Figura 15*Espectro de la FFT del circuito de la figura 14*

Nota: Se observa que existen armónicas con un valor cercano a 15 A y 30 A. Basado en (Ramos López, 2023.)

1.5.3 Dispositivos de arco

En este tipo de dispositivos, es difícil predecir su corriente de funcionamiento, debido a que en cada periodo demandan cantidades de corriente distinta generando un amplio espectro de armónicos en cada operación. Para hornos de arco, estos presentan una gran distorsión al inicio del proceso de fundición, teniendo un amplio espectro de armónicos característicos como no característicos, sin embargo, al fundirse el metal, la corriente se estabiliza reduciendo así su distorsión y se eliminan los armónicos no característicos.

Tabla 2

Límites de distorsión de un Horno de Arco

Contenido armónico de la corriente del horno de arco en dos fases del ciclo de fundición					
Furnance 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	2	0	2.1	0

Nota: Tomado de (IEEE, 1992)

1.6 Repercusión de armónicos en las redes de distribución

Los armónicos en las redes de distribución tienen diferentes efectos, los cuales implican problemas para los equipos eléctricos conectados a la red, además, de afectar los conductores de la misma red, ya sea por calentamiento dieléctrico o esfuerzo eléctrico, lo cual ocasiona el envejecimiento prematuro del aislamiento de conductores. A continuación, se describen equipos que son afectados por los armónicos (IEEE, 1992).

1.6.1 Motores y Generadores

Un mayor efecto de las tensiones y corrientes armónicas en las máquinas rotativas (inducción y síncronas) incrementa el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. Los componentes armónicos afectan la eficiencia de la máquina, y pueden entonces afectar el par desarrollado por el motor.

1.6.2 Transformadores

Las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos dispersos, y las tensiones armónicas causan un incremento de las pérdidas de hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, al ser comparado con una operación puramente sinusoidal.

1.6.3 Conductores de Potencia:

El flujo de una corriente no sinusoidal en un conductor causará un calentamiento adicional por encima de lo que se esperaría para el valor RMS de la forma de onda. Esto debido a dos fenómenos conocidos como “efecto piel” y “efecto proximidad”, que varían en función de la frecuencia, así como también del tamaño y calibre del conductor. Como resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva AC, aumenta con respecto a la resistencia DC, especialmente en conductores largos. El aumento de la resistencia AC se traduce en un aumento de las pérdidas del conductor.

1.6.4 Condensadores

Un mayor inconveniente se presenta con el uso de condensadores en un sistema de potencia debido a la posibilidad de resonancia del sistema. La reactancia de un banco de condensadores disminuye con la frecuencia, y el banco, actúa como una carga para corrientes armónicas altas. Este efecto incrementa el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico. El cambio frecuente de componentes no magnéticos (como núcleo de hierro), tal como transformadores y reactores, pueden producir corrientes que se agregarán a la carga de condensadores.

1.6.5 Equipo electrónico

El equipo electrónico de potencia es susceptible a mal funcionamiento causado por las distorsiones armónicas. Este equipo a menudo depende de la determinación exacta del cruce por cero voltios o de otros aspectos de la forma de onda de tensión. La distorsión armónica puede

resultar en un cambio en el cruce por cero voltios o en el punto al cual una tensión fase a fase se vuelve mejor que otra tensión fase a fase. Estos son dos puntos críticos para muchos tipos de controles de circuitos electrónicos, y estos cambios pueden llevar al mal funcionamiento del equipo.

1.6.6 Medidores

Los medidores e instrumentos son afectados por componentes armónicas, particularmente si la existencia de condiciones de resonancia puede resultar en altas tensiones y corrientes armónicas en los circuitos. Los dispositivos de discos de inducción, tal como vatímetros, normalmente ven solo la corriente fundamental; sin embargo, el desbalance de fase ocasionado por las distorsiones armónicas puede causar operaciones erróneas en estos dispositivos.

1.6.7 Factor de potencia con presencia de armónicos

En condiciones donde la carga se considera lineal, es decir, sin presencia de armónicos, el factor de potencia equivale al cociente de potencia activa y potencia aparente, lo que coincide con el coseno del ángulo de desplazamiento entre la tensión y la corriente como se describe a continuación.

Figura 16

Representación fasorial del factor de potencia



Nota: Tomado de (J. Roberto Ramos López, 2022.)

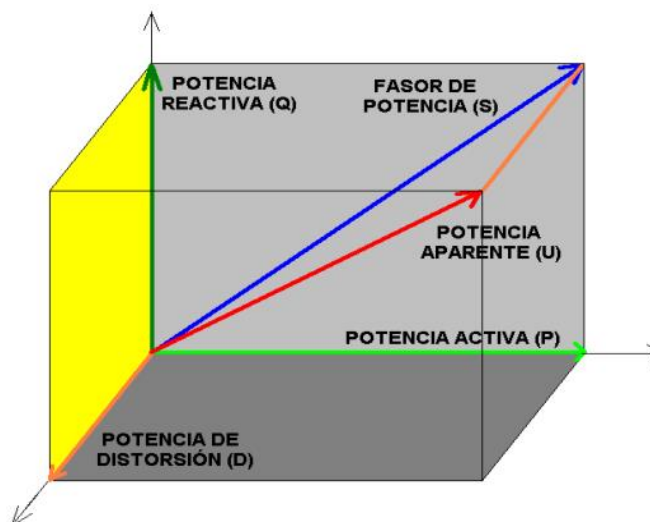
$$fp = \cos(\theta) = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Sin embargo, en condiciones reales no toda la carga conectada es lineal, y la corriente adopta características no lineales generadoras de armónicos, por lo cual, surge un nuevo concepto

de potencia denominada potencia de distorsión y se denotará con la letra D, la cual corresponde a la potencia de los armónicos, esta no aporta ningún beneficio para la red eléctrica. A continuación, se muestra la representación gráfica de las potencias del sistema (J. Roberto Ramos López, n.d.).

Figura 17

Diagrama fasorial de potencia cuando hay



Nota: (J. Roberto Ramos López, 2022.)

$$U = \sqrt{S^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (5)$$

Para obtener el factor de potencia bajo estas condiciones, se tiene:

$$I_{RMS} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2} \quad (6)$$

$$V_{RMS} = V_1 \sqrt{1 + THD_v^2} \quad (7)$$

$$P = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$U = \sqrt{3} V_{RMS} I_{RMS} \quad (9)$$

$$fp = \frac{P}{U} \quad (10)$$

$$fp = \frac{\sqrt{3} V_1 I_1 \cos(\varphi)}{\sqrt{3} V_{RMS} I_{RMS}} \quad (11)$$

$$fp = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (12)$$

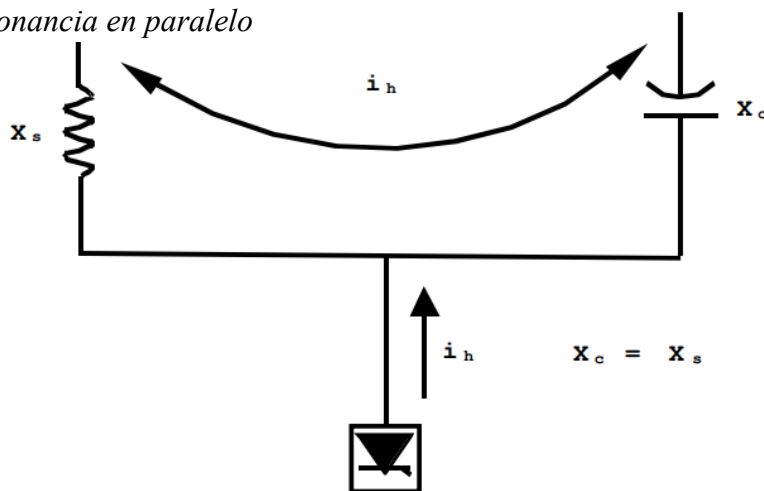
Se debe comprender que existe una diferencia entre factor de potencia y factor de potencia de desplazamiento, debido a que se podría cometer el error de creer que el sistema necesita ser compensado mediante la instalación de un banco de capacitores, cuando en realidad no es así, este detalle podría provocar que el banco de capacitores instalado, que no es necesario, entre en resonancia con el resto de la red, generando una serie de consecuencias no deseables (J. Roberto Ramos López, n.d.).

1.6.8 Resonancia

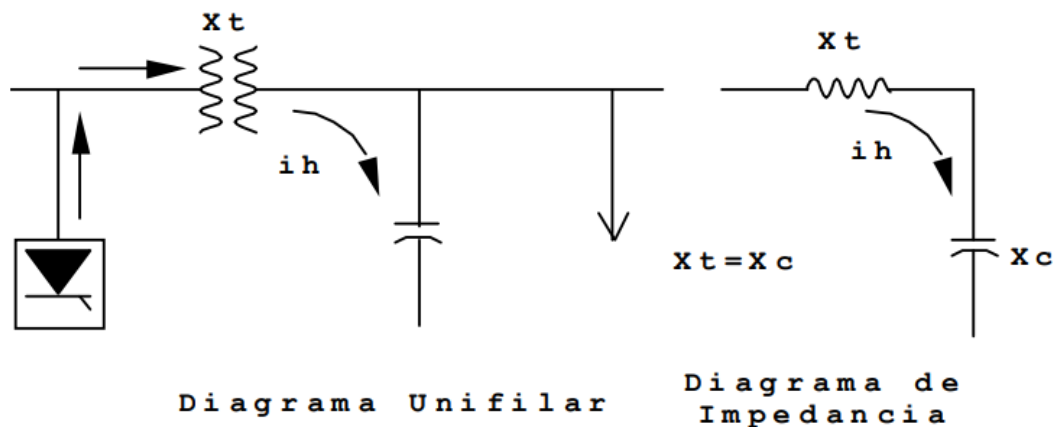
Las condiciones de resonancia del sistema es uno de los factores más importantes que afectan los niveles de armónicos del sistema. La resonancia paralela es una impedancia alta para el flujo de corriente armónica, mientras la resonancia serie es una impedancia baja para el flujo de corriente armónica. Cuando las condiciones de resonancia no son un problema, el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corrientes armónicas. Esto es solo cuando estas corrientes ven altas impedancias debido a la resonancia paralelo que ocurren de significativas distorsiones de voltaje y ampliaciones de corriente. Por tanto, es importante poder analizar las características de respuesta en frecuencia del sistema y evitar los problemas de resonancia del sistema (IEEE, 1992).

1.6.8.1 Resonancia paralelo:

La resonancia paralela ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema y las reactancias capacitivas son iguales a la misma frecuencia. Si la combinación de bancos de condensadores y la inductancia del sistema resultan en una resonancia paralelo-cercana a los armónicos característicos generados por una carga no lineal cura corriente armónica excitará el circuito “tanque” este provocará una corriente amplificada que oscilará entre la energía almacenada en la inductancia y la energía almacenada en la capacitancia. Esta oscilación de corriente puede causar distorsión de tensión e interferencia telefónica cuando los circuitos de distribución están cerca de los circuitos de telefonía (IEEE, 1992).

Figura 18*Condición de resonancia en paralelo**Nota:* Tomado de (IEEE, 1992).**1.6.8.2 Resonancia serie:**

La resonancia serie es el resultado de una serie de combinaciones de bancos de condensadores y líneas o inductancias de transformadores. La resonancia serie presenta un camino de baja impedancia para corrientes armónicas y tiende a “atrapar” alguna corriente armónica a la cual está se ha ajustado. La resonancia serie puede resultar en niveles de distorsión de alta tensión entre la inductancia y la capacitancia del circuito serie (IEEE, 1992).

Figura 19*Condición de resonancia en serie**Nota:* Tomado de (IEEE, 1992)

CAPÍTULO II: NORMATIVA LOCAL E INTERNACIONAL RELACIONADA AL CUMPLIMIENTO DE LOS NIVELES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

En este capítulo se describen las normativas que rigen los niveles de distorsión armónica permitidos en El Salvador y normas referentes a nuestro país.

2.1 INSTITUTO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS Y ELECTRÓNICOS (IEEE-519)

Es una guía de diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales, establece los límites de distorsión armónica de tensión y corriente, haciendo énfasis en los límites de corriente permisibles dividiendo en tres rangos de tensión dichos límites.

2.1.1 Límites de distorsión de Tensión

Todos los valores se expresarán en porcentaje de la tensión nominal de frecuencia de potencia en el PCC. En la siguiente tabla se aplica a la tensión de armónicos cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de potencia hasta la armónica 50.

Tabla 3

Límites de distorsión armónica de tensión en el punto de acoplamiento común (PCC)

Tensión de bus [V] en PCC	Armónico individual (%) $h \leq 50$	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1	1.5

Nota: Tomado de (IEEE, 2022)

2.1.2 Límites de distorsión de corriente

Estos límites no se utilizarán para la evaluación de una carga no lineal individual, sino para la evaluación de la instalación que contenga dichas cargas no lineales. Además, establece que todos los equipos de generación de potencia están limitados al valor de distorsión de corriente $I_{sc}/I_L < 20$, sin importar el valor real de la relación I_{sc}/I_L . En PCC, los usuarios limitarán sus corrientes armónicas como se indica a continuación.

Tabla 4*Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal de 120 V a 69 kV*

Distorsión armónica máxima de corriente en porcentaje de IL						
Orden armónico individual						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h$	$11 \leq h$	$17 \leq h$	$23 \leq h$	$35 \leq h$	TDD
	$< 11^a$	< 17	< 23	< 35	≤ 50	
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8
$50 < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12	5.5	5	2	1	15
$1000 >$	15	7	6	2.5	1.4	20

Nota: Tomado de (IEEE, 2022)**Tabla 5***Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal de 69 kV a 161 kV*

Distorsión armónica máxima de corriente en porcentaje de IL						
Orden armónico individual						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h$	$11 \leq h$	$17 \leq h$	$23 \leq h$	$35 \leq h$	TDD
	$< 11^a$	< 17	< 23	< 35	≤ 50	
< 20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
$50 < 100$	5	2.25	2	0.75	0.35	6
$100 < 1000$	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
$1000 >$	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

Nota: Tomado de (IEEE, 2022)

Tabla 6

Límites de distorsión de corriente para sistemas con tensión nominal mayor a 161 kV

Distorsión armónica máxima de corriente en porcentaje de IL						
Orden armónico individual						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h$	$11 \leq h$	$17 \leq h$	$23 \leq h$	$35 \leq h$	<i>TDD</i>
	$< 11^a$	< 17	< 23	< 35	≤ 50	
< 25	1	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
> 50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Nota: Tomado de (IEEE, 2022)

2.2 Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución de SIGET

Las tasas de distorsión individual (TDI) y distorsión armónica total (VDAT) se determinarán porcentualmente con respecto a la componente de tensión de la frecuencia fundamental (60 Hz) de la siguiente forma:

$$TDI = \frac{U_n}{U_1} \times 100 \quad (13)$$

$$VDAT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2} \times 100}{U_1} \quad (14)$$

En donde:

TDI: Tasa de distorsión individual

VDAT: Tasa de distorsión armónica total

Un: Amplitud del voltaje de la armónica n

U1: Amplitud del voltaje a la frecuencia fundamental (60 Hz)

2.2.1 Límites de distorsión de tensión

La tabla 7, muestra los límites distorsión individual y total establecidos en (SIGET, 2014), para las redes de baja tensión y media tensión.

Tabla 7*Límites de distorsión armónica de tensión 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	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>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 %					

Nota: Tomado de (SIGET, 2014)

2.2.2 Límites de distorsión de corriente

La tabla 8, muestra los límites de distorsión armónica individual y total de la corriente de carga originada en las instalaciones internas de los usuarios finales y que dependen de la potencia registrada por fase en cada intervalo de medición realizada en el punto de entrega del usuario establecidos por (SIGET, 2014).

Tabla 8

Límites de distorsión de corriente de carga en media y baja tensión

Orden de la armónica (n)	Potencia < 3.5kW Intensidad de la Componente Armónica (Amperios)	Potencia ≥ 3.5 kW 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	0.2
	25	0.18
>25	4.5/n	0.2+0.8*25/n
Órdenes impares múltiplos de 3	3	4.6
	9	0.8
	15	0.3
	21	0.21
	>21	4.5/n
Órdenes pares	2	2.16
	4	0.86
	6	0.6
	8	0.46
	10	0.37
	12	0.31
	>12	3.68/n
Distorsión Armónica Total de Corriente (%)		20

Nota: Tomado de (SIGET, 2014)

2.2.4 COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC)

2.2.4.1 Estándar IEC 61000-3-2

Esta parte de la norma indica los límites de las corrientes armónicas inyectadas en la red de suministro público. Especifica los límites de los componentes armónicos de la corriente de entrada que pueden ser producidos por equipos probados en condiciones específicas. Además, solo

es aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos con una corriente de entrada de hasta 16 Amperios por fase. A continuación, se presenta la clasificación de equipos y tablas de los límites de corrientes armónicas.

Tabla 9

Clasificación de equipos según su clase de diseño

Clase A
Equipo trifásico balanceado
Electrodomésticos, excluidos los aparatos identificados como clase D
herramientas, excluidas las portátiles
reguladores para lámparas incandescentes; equipos de audio
Clase B
Herramientas portátiles
Equipos de soldadura de arco que no son equipos profesionales
Clase C
Equipo de iluminación
Clase D
Computadoras personales y monitores de ordenadores personales
Receptores de televisión
Congeladores dotados de uno o varios variadores de frecuencia para controlar el motor o los motores de compresor

Nota: Tomado de (IEC, 2014)

Para las siguientes tablas de límites de distorsión armónica, son aplicables solo a los terminales de entrada de alimentación de los equipos destinados a conectarse a redes de 220/380V, 230/400V y 240/415V para sistemas de que funcionen a 50 o 60 Hz.

Tabla 10

Límites de distorsión de corriente para los equipos de clase "A"

Orden armónico n	Corriente armónica Máxima Permisible [A]
Armónicos Impares	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15(15/n)$
Armónicos Pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.3
$8 \leq n \leq 40$	$0.23(8/n)$

Nota: Tomado de (IEC, 2014)

Tabla 11*Límites de distorsión de corriente para los equipos de clase "B"*

Orden armónico n	Corriente armónica Máxima Permisible [A]
Armónicos Impares	
3	3.45
5	1.71
7	1.16
9	0.6
11	0.5
13	0.32
$15 \leq n \leq 39$	$0.23(15/n)$
Armónicos Pares	
2	1.62
4	0.65
6	0.45
$8 \leq n \leq 40$	$0.35(8/n)$

Nota: Tomado de (IEC, 2014)

Tabla 12

Límites de distorsión de corriente para equipos clase "C"

Orden armónico n	Máxima corriente armónica permitida expresada como un porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental [%]
2	2
3	30λ
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

λ es el factor de potencia del circuito

Nota: Tomado de (IEC, 2014)

Tabla 13*Límites de distorsión de corriente para equipos clase "D"*

Orden armónico n	Corriente armónica máxima permisible mA/W	Corriente armónica máxima permisible [A]
2	3.4	2.3
3	1.9	1.14
5	1	0.77
7	0.5	0.4
9	0.35	0.33
<hr/>		
11≤n≤39		
Solo armónicas impares	3.85/n	Ver Clase A

Nota: Tomado de (IEC, 2014)

2.2.4.2 Estándar IEC 61000-3-6

Esta parte de la norma establece los límites de distorsión de armónicos para los siguientes niveles de tensión: Baja Tensión (LV: $V_n = 1$ kV), Media Tensión (MV: 1 kV < $V_n = 35$ kV), Alta Tensión (HV: 35 kV < $V_n = 230$ kV) y Extra Alta Tensión (EHV: $V_n > 230$ kV).

La tabla 14, presenta los niveles de compatibilidad o límites de armónicos en baja y media tensión. Estos son valores de referencia para coordinar la emisión y la inmunidad de los equipos conectados a la red de distribución, estableciendo que el 95% de las mediciones realizadas deben de cumplir con estos límites, de tal forma que la empresa distribuidora entregue al usuario final la tensión sin distorsión o tensión capaz de hacer funcionar correctamente el equipo conectado al punto de suministro de la empresa distribuidora.

Tabla 14

Niveles de compatibilidad para tensiones armónicas, en porcentajes de tensión nominal

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden armónico h	Tensión armónica %	Orden armónico h	Tensión armónica %	Orden armónico h	Tensión armónica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
17=h=49	2.27(17/h) - 0.27	21<h=45	0.2	10=h=50	0.25(10/h) + 0.25

Nota: El nivel de compatibilidad para la distorsión Armónica Total es THD = 8%, Tomado de (IEC, 2008)

La tabla 15, muestra los límites o niveles planeados que pueden utilizarse con el propósito de evaluar el impacto en la fuente de suministro de las cargas de los usuarios finales. Los niveles planeados son especificados para todos los niveles de tensión de las empresas distribuidoras y pueden ser considerados como objetivos de calidad de las empresas. Estos niveles son menores o iguales a los de compatibilidad y pueden variar dependiendo de la estructura y circunstancias de la red.

Tabla 15

Niveles de planeación para tensiones armónicas en porcentajes de tensión nominal para MV, HV y EHV

Armónicos impares no múltiplos de 3			Armónicos impares múltiplos de 3			Armónicos pares		
Orden armónico	Tensión armónica %		Orden armónico	Tensión armónica %		Orden armónico	Tensión armónica %	
	<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>		<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>		<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>
<i>h</i>	<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>	<i>h</i>	<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>	<i>h</i>	<i>MV</i>	<i>HV-EHV</i>
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17= <i>h</i> =49	1.9(17/ <i>h</i>)	1.2(17/ <i>h</i>)	21< <i>h</i> =45	0.2	0.2	10= <i>h</i> =50	0.25(10/ <i>h</i>)	0.19(10/ <i>h</i>)
	- 0.2						+ 0.22	+ 0.16

Nota: Los niveles de planificación para la Distorsión Armónica Total (THD): 6.5% (*MV*), 3% (*HV-EHV*). Tomado de (IEC, 2008)

2.2.4.3 Estándar IEC 61000-4-7

Esta parte de la norma es aplicable a los instrumentos destinados a medir componentes espectrales en la gama de frecuencias de hasta 9 kHz que se superponen a la fundamental de los sistemas de alimentación eléctrica a 50 Hz y 60 Hz. Distingue entre armónicos, interarmónicos y otros componentes por encima de la gama de frecuencias armónicas. A demás, detalla los requisitos para los instrumentos de medición, incluyendo precisión y condiciones de operación necesarias para obtener resultados confiables.

La tabla 16, muestra dos clases de precisión para los instrumentos que miden componentes armónicos. A demás, muestra los errores máximos admisibles referidos a señales de frecuencia única y en estado estacionario, en la gama de frecuencias de funcionamiento, aplicadas al instrumento en las condiciones nominales de funcionamiento que indica el fabricante.

Tabla 16*Requisitos de precisión para las mediciones de corriente, tensión y potencia*

Clase	Medición	Condiciones	Error máximo
I	Tensión	$V_m \geq 1\% V_{nom}$	$\pm 5\% V_m$
		$V_m < 1\% V_{nom}$	$\pm 0.05\% V_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 3\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$
		$I_m < 3\% I_{nom}$	$\pm 0.15\% I_{nom}$
	Potencia	$P_m \geq 150 W$	$\pm 1\% P_m$
		$P_m < 150 W$	$+1.5 W$
II	Tensión	$V_m \geq 10\% V_{nom}$	$\pm 5\% V_m$
		$V_m < 10\% V_{nom}$	$\pm 0.15\% V_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 10\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$
		$I_m < 10\% I_{nom}$	$\pm 0.5\% I_{nom}$

I_{nom}: Rango de corriente nominal del instrumento de medida.
V_{nom}: Rango de tensión nominal del instrumento de medida.
V_m, I_m y P_m: Valores medidos.

Nota: Tomado de (IEC, 2009)

Los instrumentos de Clase I son recomendados cuando es necesario realizar mediciones precisas, tales como la verificación de cumplimiento de normas. Los instrumentos de Clase II son recomendados para estudios generales, además, son utilizados para mediciones de emisiones si los valores son tales que, teniendo en cuenta el aumento de la incertidumbre, no se superan los límites. En decir, los valores medidos de armónicos deben ser $< 90\%$ de los límites permitidos.

2.2.4.4 Estándar IEC 61000-4-30

Esta parte de la norma establece los métodos de medición e interpretación de los resultados para los parámetros de calidad de la energía en sistemas de alimentación de corriente alterna (CA) con una frecuencia fundamental de 50 Hz y 60 Hz, asegurando que los resultados sean confiables, repetibles y comparables. Para cada parámetro medido, define dos clases y sus características:

Tabla 17*Clases de equipo y sus características de medición*

Clase A	Clase S
Es utilizada cuando son necesarias mediciones precisas, como ejemplo, para la verificación del cumplimiento de normas.	Es utilizada para aplicaciones estadísticas como evaluación de la calidad de la energía. Aunque utiliza intervalos de medición equivalentes a los de la Clase A, los requisitos de procesamiento de la Clase S son mucho menores, sin embargo, se puede evaluar los parámetros de calidad eléctrica de varios puntos de medición de la red, o un único punto durante un período de tiempo.
La lectura de frecuencia se obtiene cada 10 segundos. Dado que la frecuencia de potencia puede no ser exactamente 50 Hz o 60 Hz dentro del intervalo de 10 segundos, el número de ciclos puede no ser un número entero.	Igual que la Clase A.
La medición será el valor eficaz de la magnitud de la tensión en un intervalo de tiempo de 12 ciclos para una red de 60 Hz. Cada intervalo de 12 ciclos será continuo y no se solapará con intervalos adyacentes.	Igual que la Clase A.
La medición básica Vrms de una caída o subida de tensión será la Vrms (1/2) en cada canal de medición. La duración del ciclo para Vrms (1/2) depende de la frecuencia.	La medición básica Vrms de una caída o subida de tensión será la Vrms (1/2) en cada canal de medición. El fabricante deberá especificar qué medición se utiliza.
Las mediciones se efectuarán como mínimo hasta el armónico de orden 50. La distorsión armónica total, se calculará como la distorsión total del subgrupo.	Las mediciones se efectuarán como mínimo hasta el armónico de orden 40. Al igual que en la Clase A, la distorsión armónica total, se calculará como la distorsión total del subgrupo.

Nota: Tomado de (IEC, 2015)

III METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

3.1 Descripción del equipo Power Quality and Energy Analyzer 435 series II de Fluke

El estudio se realizará con el analizador de energía y calidad eléctrica 435 serie II, el cual está diseñado para minimizar el tiempo de inactividad, resolver rápidamente problemas de calidad eléctrica y averiguar con facilidad los costes de la pérdida de energía. Los tiempos de inactividad salen caros, por lo cual, es importante obtener los datos necesarios para resolver con rapidez los problemas críticos de calidad eléctrica. El proceso de medida y salida de datos del analizador se ha optimizado para obtener con facilidad la información más importante.

Se mide simultáneamente múltiples parámetros y se muestran en formatos que describen con rapidez el estado general de la calidad eléctrica. La información detallada ayuda a tomar mejores decisiones de mantenimiento, tanto si se intenta reducir la pérdida de energía, como si se propone encontrar la causa de los problemas de calidad eléctrica o averiguar de qué modo afecta al sistema eléctrico el arranque de motores. Se puede acceder a los datos como simples valores digitales, gráficos de tendencias (para visualizar con rapidez los cambios a lo largo del tiempo), formas de onda o diagramas fasoriales. Los datos también pueden analizarse y organizarse en formato tabular. Los datos de eventos detallados le permiten ver las etiquetas de magnitud, duración y tiempo de las anomalías de forma que pueda correlacionar con rapidez los problemas que experimentan las instalaciones eléctricas.

Elabora un resumen del estado de la calidad eléctrica que le proporciona una visión general de una amplia gama de problemas de calidad eléctrica en tiempo real. Con una simple presentación gráfica, que incluye los límites de tolerancia, podrá averiguar con rapidez qué problemas de calidad eléctrica puede tener su sistema eléctrico. Su función Auto Trend le permite obtener con rapidez información sobre los cambios registrados en la calidad eléctrica a lo largo del tiempo. Cada lectura mostrada se registra de forma continua y automática sin necesidad de configurar niveles de umbral ni tener que iniciar manualmente el proceso. De esta forma podrá ver con rapidez las tendencias de tensión, corriente, frecuencia, potencia, armónicos o parpadeo en las fases y el neutro.

Figura 20

Analizador de energía y calidad eléctrica 435 serie II de Fluke



Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

3.2 Normativas para la medición con el Analizador

La norma IEC 61000-4-30 indica la manera de realizar las mediciones con el analizador, estas pueden realizarse en sistemas de alimentación monofásico y polifásicos según sea requerido, midiendo tensiones entre conductores de fase y neutro (línea a neutro) o entre conductores de fase (línea a línea) o entre conductores de fase o neutro y tierra (fase a tierra, neutro a tierra).

Vrms: intervalos contiguos no superpuestos de 10/12 ciclos mediante 500/416 muestras por ciclo.

Pico de tensión: mayor valor de muestra absoluto en intervalo de 10/12 ciclos con una resolución de muestra de 40 μ s.

Factor de cresta de V: permite medir la relación entre el pico de tensión y Vrms.

Hz: medida cada 10 segundos.

V_{ms1/2}: se mide en un ciclo, comenzando en los pasos por cero del fundamental y renovándose cada medio ciclo.

La norma IEC 61000-4-7 indica el cálculo de medidas del grupo de armónicos ininterrumpidos de tensión de 10/12 ciclos.

3.3 Conexión del Analizador

El analizador cuenta con una batería recargable de iones de litio incorporada que puede alimentarlo durante una semana cuando está totalmente cargada. Al alimentarse con batería, el símbolo de estado de la batería del encabezado de la pantalla indica el estado de carga. Este símbolo abarca de carga completo a descarga. Ofrece información detallada sobre el estado de la batería en la pantalla del analizador tras la operación de las teclas: SETUP, F2-VERSION y CAL, F2-BATT. INFO. Cuando la batería está descargada, se deja que se cargue por completo con el adaptador de red. El proceso de carga con el analizador apagado dura al menos cuatro horas hasta alcanzar la carga completa. Cuando está encendido, el proceso de carga requiere mucho más tiempo. Si el cargador queda conectado durante largos periodos, por ejemplo, durante el fin de semana, esta acción no producirá daño alguno al equipo. El analizador pasará automáticamente a modo de carga lenta. Al recibir el equipo, la batería puede estar descargada y se debe cargar antes de su uso.

Uso del adaptador de red:

1. Utilizar el adaptador de red solamente como se suministra con el analizador.
2. Antes de su uso, se debe comprobar que la tensión y la frecuencia coinciden con la alimentación de la red eléctrica, como lo indica el adaptador de red y la hoja de instrucciones.
3. Se conecta el adaptador de red al tomacorriente de CA.
4. Se conecta el adaptador de red a la entrada (INPUT) correspondiente ubicada en el lado superior derecho del analizador.
5. Para evitar el sobrecalentamiento de la batería durante la carga, no se debe exceder la temperatura ambiente admisible indicada en las especificaciones.

No se podrá encender el analizador si la tapa de la batería no está correctamente cerrada.

Instalación y sustitución de un juego de baterías:

1. Se extraen todas las sondas y los cables de prueba.
2. Se debe plegar el soporte del analizador.

3. Se desbloquea la tapa de la batería de la parte trasera del analizador (se gira los tornillos un cuarto de vuelta en sentido antihorario).
4. Se levanta el soporte y la tapa de la batería, posteriormente se retira.
5. Se instala la batería y se cierra la tapa (se gira los tornillos un cuarto de vuelta en sentido horario).

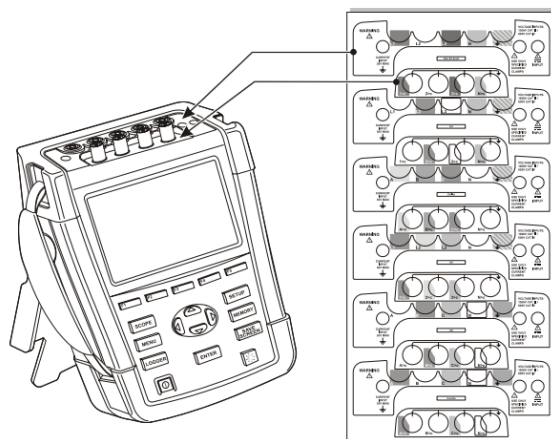
El analizador cuenta con una tarjeta de memoria SD para el almacenamiento de los datos de medida. (“Fluke Serie II 434, Serie II 435, Serie II 437 Manual de uso | Manualzz”) Estos datos se conservan cuando el analizador se desconecta de su fuente de alimentación. Si la tarjeta de memoria no se instala, solo se encontrarán disponibles los datos de medida momentáneos. La tarjeta de memoria se encuentra en el compartimiento de la batería del analizador y se puede acceder a ella de la misma manera que a la batería. Para bloquear o desbloquear la tarjeta, se presiona en la dirección de la flecha mostrada en el compartimiento. En éste se muestra también la posición correcta de la tarjeta.

3.4 Como conectar el Analizador

El analizador posee cuatro entradas BNC para pinzas amperimétricas y cinco entradas tipo banana para tensiones. Se debe utilizar solamente las pinzas amperimétricas como se proporcionan, o bien pinzas recomendadas para un uso seguro con el analizador. Las pinzas tienen un conector BNC de plástico. Es necesario utilizar conectores BNC aislados para realizar las medidas de forma segura. Se suministran etiquetas autoadhesivas que corresponden con los códigos de color utilizados en el país, estas se adhieren alrededor de las entradas de corriente y tensión como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Montaje de etiquetas para entradas de tensión y corriente



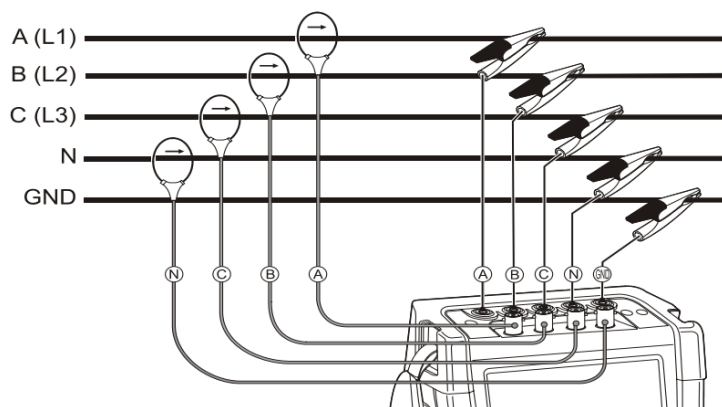
Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Se debe desactivar los sistemas de alimentación antes de realizar las conexiones, utilizar siempre el equipo de protección personal apropiado y evitar trabajar solo. Tener en cuenta las advertencias de información de seguridad.

En un sistema trifásico, se debe realizar las conexiones como se muestra en la figura 22.

Figura 22

Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.



Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Conexiones de tensión; se comienza por la conexión a tierra y, después, en sucesión N, A (L1), B (L2) y C (L3). Para obtener resultados de medida correctos, siempre se debe conectar la entrada de conexión a tierra, se debe comprobar dos veces las conexiones, además, comprobar que las pinzas amperimétricas están firmemente fijadas y completamente cerradas alrededor de los conductores.

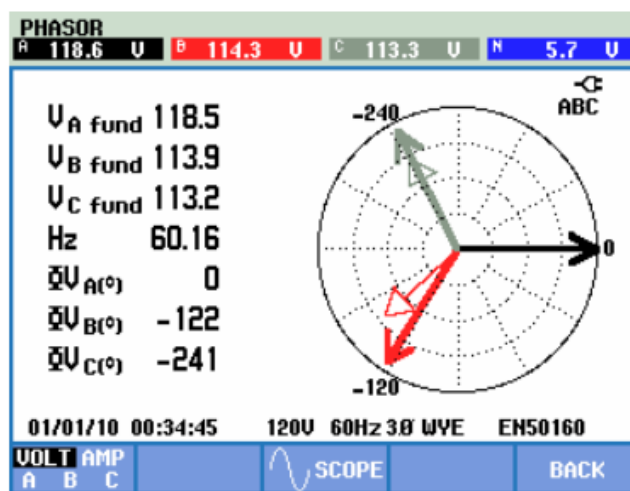
Para medidas monofásicas, se utiliza la entrada de corriente A (L1) y las entradas de tensión de conexión a tierra, N (neutro) y fase A (L1). La referencia para todas las medidas es la fase A (L1).

Antes de realizar mediciones, se debe configurar el analizador según la tensión de línea, la frecuencia y la configuración de los conductores del sistema de alimentación que se desea medir.

Las pantallas de osciloscopio y fasor son útiles para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectadas correctamente. En el diagrama de vectores, las tensiones de fase y las corrientes A (L1), B (L2) y C (L3) deben aparecer en secuencia al observarlas en sentido horario como se muestra en la figura 23.

Figura 23

Diagrama de vectores correspondiente al analizador conectado correctamente



Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

3.5 Configuración del Analizador

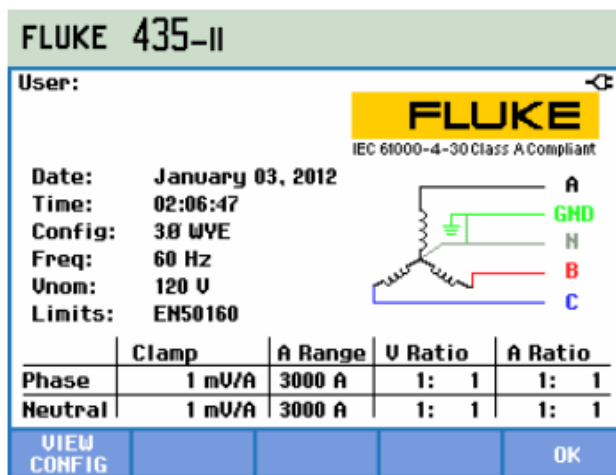
El analizador ofrece muchas funciones de medida. Estas funciones están predefinidas de manera que se obtenga la mejor representación posible de los resultados de medida en prácticamente todas las circunstancias. Sin embargo, si se desea, se puede realizar configuraciones personales según determinados requisitos.

Al encender el analizador, tras un ajuste predeterminado de fábrica, o si se ha desconectado de todas las fuentes de alimentación, se deben ajustar varios valores generales como el idioma de información, frecuencia nominal, tensión nominal, identificación de fase, colores de fase, fecha y hora.

Desde la pantalla de idioma, se usan las flechas arriba/abajo para resaltar el idioma, pulsar ENTER y confirmar el mensaje que aparece para definir el idioma. Pulsar F5-NEXT para ajustar el próximo elemento de la configuración inicial. Cuando se termina de configurar los parámetros antes mencionados, aparecerá la pantalla mostrada en la figura 24, esta pantalla permite acceder a todos los ajustes del analizador.

Figura 24

Pantalla de entrada a las configuraciones del analizador



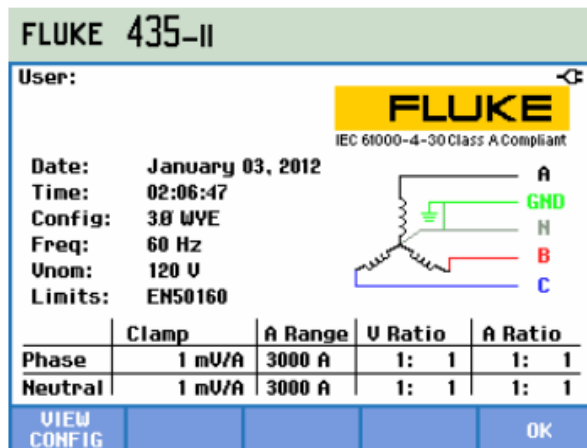
Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Al encender el analizador, aparece la pantalla de bienvenida de la figura 25, la cual ofrece una visión general de los ajustes antes mencionados, además, de ajustar los límites de calidad de

la energía utilizados y el tipo de sondas de tensión y corriente que se utilizarán. La tecla de función F1 permite acceder a una pantalla que muestra con detalle como conectar las sondas de tensión y corriente al sistema de alimentación que se va a examinar. En la figura 25 se muestra un ejemplo, se pulsa F1 nuevamente para volver a la pantalla de bienvenida.

Figura 25

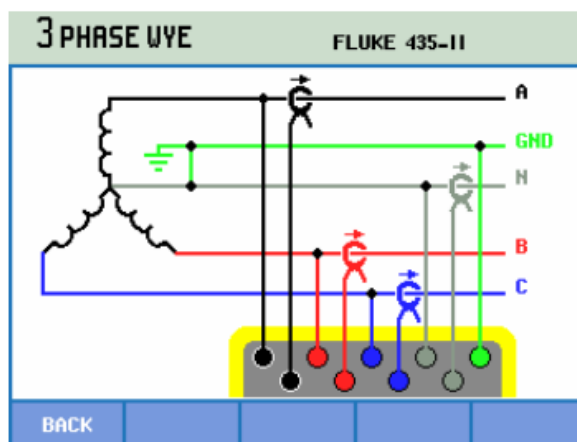
Pantalla de bienvenida al encender el analizador



Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Figura 26

Pantalla que muestra la configuración real del cableado






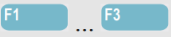

Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Se pulsa la tecla SETUP para acceder a los menús que incluyen las configuraciones del analizador, los ajustes se agrupan en cuatro secciones funcionales:

1. USER PREFERENCES (Preferencia usuario); ajuste de idioma, identificación de fase, colores de fase, velocidad en baudios RS-232, desconexión automática de la pantalla (para ahorrar energía de la batería), definición del nombre de usuario (como se muestra en la pantalla de entrada), recuperación de los valores predeterminados de fábrica, activación y desactivación del modo de demostración, contraste de la pantalla, formato de la tarjeta de memoria SD. Algunos menús disponen de una tecla de función para recuperar los valores predeterminados de fábrica. Se puede acceder con la tecla función F1.
2. VERSION & CALIBRATION (Versión y calibración); permite acceder a un menú de solo lectura que muestra el número de modelo, número de serie, número de calibración y fecha de calibración. Mediante la tecla de función F1 se accede a un submenú que muestra las opciones instaladas. Con la tecla F2 se accede a información disponible de la batería tal como la calidad y el estado de carga.
3. SETUP WIZARD (Asistente de configuración); proporciona un recorrido guiado por las configuraciones generales que son fundamentales para realizar medidas correctas. Esto se aplica para los siguientes parámetros: configuración del cableado, frecuencia nominal, tensión nominal, ajuste de límites de calidad de la energía eléctrica utilizados y tipo de sondas de tensión y corriente a utilizar. La puesta en escala de las sondas se realiza por separado para fase y neutro. Se puede acceder con la tecla de función F3.
4. MANUAL SETUP (Configuración manual); permite personalizar muchas funciones según determinados requisitos. Sin embargo, muchas de estas funciones están predefinidas en valores tales que se obtiene una presentación clara en prácticamente todas las circunstancias. A demás, se puede ajustar la fecha, hora, configuración, frecuencia, tensión nominal (V_{nom}) y límites utilizados. Se puede acceder con la tecla de función F4.

Figura 27

Teclas para desplazarse por los menús y realizar selecciones

	Selección del elemento que se desea ajustar.
	Púselo para acceder al menú de ajustes seleccionado.
	Para seleccionar (arriba/abajo) y ajustar (izquierda/derecha) elementos en un menú de ajustes. Pulse ENTER para confirmar una selección.
	Selecciones o acceso a submenús.
	Vuelta al menú anterior.

Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

3.6 Configuración para la medición de Armónicos

Armónicos, mide y registra armónicos e interarmónicos hasta el orden 50. Se miden los datos relacionados, como componentes de CC, THD (distorsión total por armónicos) y factor K. Una forma de onda puede considerarse una combinación de varias ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y magnitudes, la forma en que estos componentes afectan a la señal es el parámetro de medida. Las lecturas pueden mostrarse como porcentaje de la fundamental, como porcentaje de todos los armónicos combinados (valor rms) o como valor rms. Los resultados pueden visualizarse en una pantalla de gráfico de barras, una pantalla de multímetro o una pantalla de tendencias, los armónicos pueden causar el sobrecalentamiento de los transformadores, conductores y motores.

La pantalla de gráficos de barras muestra el porcentaje de contribución de cada uno de los componentes relacionados con la señal total. Una señal sin torsión debe mostrar un primer armónico (igual el fundamental) al 100% mientras los otros están a cero: en la práctica, esto no ocurre, ya que siempre hay una determinada cantidad de distorsión, lo que provoca armónicos más altos.

Una onda sinusoidal pura se distorsiona cuando se le añaden componentes de frecuencia más alta. La distorsión se representa mediante el porcentaje de THD. La pantalla puede mostrar también el porcentaje del componente de CC y del factor K, el factor K se mide para la corriente

y la potencia, y se muestra en el encabezado de la pantalla, es un número que cuantifica la sobrecarga potencial en transformadores debida a corrientes de armónicos, los armónicos de orden superior influyen en el factor K más que los armónicos de bajo orden.

Las teclas de flecha izquierda/derecha se utilizan para situar el cursor en una determinada barra. En el encabezado de la pantalla se mostrará el identificador de fase, el número de armónicos, la frecuencia y el ángulo de fase correspondiente a esa barra. Si no se muestran todas las barras en la pantalla, se puede situar el siguiente conjunto en el área de visualización desplazando el cursor fuera del extremo izquierdo o derecho de la pantalla. A la hora de medir armónicos con interarmónicos desactivados, se usa el grupo de armónicos y un filtro de suavizado activo de 1.5 segundos. A la hora de medir armónicos con interarmónicos activos, se usa un subgrupo de armónicos y un subgrupo centrado de interarmónicos y no se activa ningún filtro.

Figura 28

Teclas de función disponibles para acceder a la pantalla multímetro

F1	Selección del tipo de armónicos: tensión, corriente o potencia real (vatios). Los armónicos de potencia pueden tener polaridad positiva y negativa.
F2	Selección del conjunto de formas de onda que se va a utilizar: A (L1), B (L2), C (L3), N (neutro) o ALL
F3	Acceso a la pantalla de multímetro.
F5	Cambio entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida.

Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

Para acceder a la pantalla de multímetro de armónicos se presiona la tecla de función F3, la pantalla muestra muchas agrupaciones por fase. Con las teclas de flecha arriba/abajo para desplazarse por todas las medidas del área de visualización. En la tabla de eventos, a la que se accede con la tecla de función F4, se enumeran todos los traspasos de umbral de tensiones de fase, se pueden utilizar umbrales con estándares internacionales o valores definidos.

La tendencia muestra como varían los armónicos y los parámetros relacionados en un intervalo de tiempo; el cursor y el zoom se pueden utilizar en el modo HOLD para investigar detalles de tendencias. Todos los valores de la pantalla de multímetro quedan registrados, pero las tendencias de cada fila aparecen de una en una. Se utiliza las teclas de flechas para desplazarse por la pantalla de tendencias.

Figura 29

Teclas de función disponibles para acceder a las tablas de eventos

F1	Las teclas de flecha arriba/abajo se asignan para desplazarse por la pantalla de tendencia.
F2	Acceso al menú de cursor y zoom.
F3	Vuelta a la pantalla de multímetro.
F4	Acceso a las tablas de eventos.
F5	Cambio entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida.

Nota: Tomado de (Datos Técnicos Analizadores de Calidad Eléctrica y Energía 434-II y 435-II de Fluke, n.d.)

3.7 Datos obtenidos por el Analizador

Del equipo se obtienen los siguientes parámetros:

1. Parámetros básicos; tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente.
2. Distorsión armónica: medición de la distorsión armónica total (THD) en tensión, espectro en frecuencia y análisis armónico individual que afecta la calidad de energía.
3. Formas de onda y fasores: visualización de formas de onda de tensión y corriente, diagramas fasoriales para analizar relaciones angulares entre fases.

IV MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

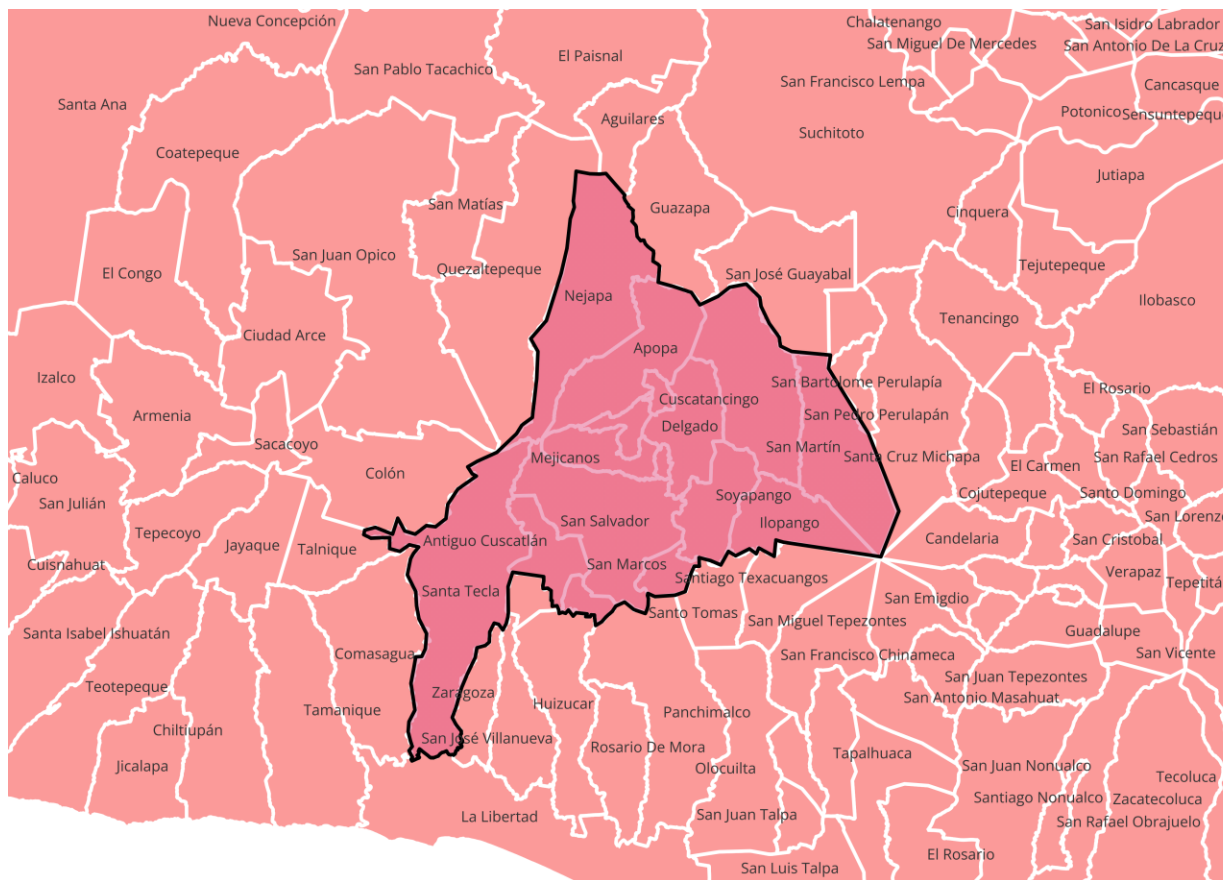
El período de medición se llevó a cabo desde el mes de octubre de 2024 hasta el mes de marzo de 2025.

Definición del área metropolitana de San Salvador

El área metropolitana de San Salvador está conformada por 14 municipios, ahora en día distritos (Decreto 762 Ley Especial Para restauración de Departamentos Municipios y Distritos Municipales, n.d.). Los cuales son: Santa Tecla, San Salvador, Antiguo Cuscatlán, San Marcos, Nejapa, Tonacatepeque, Apopa, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque, Ciudad Delgado, Mejicanos, Soyapango, Ilopango y San Martín. Los cuales son parte ahora de los Municipios de San Salvador Este, San Salvador Oeste, San Salvador Centro, San Salvador Sur, La Libertad Este y La Libertad Sur.

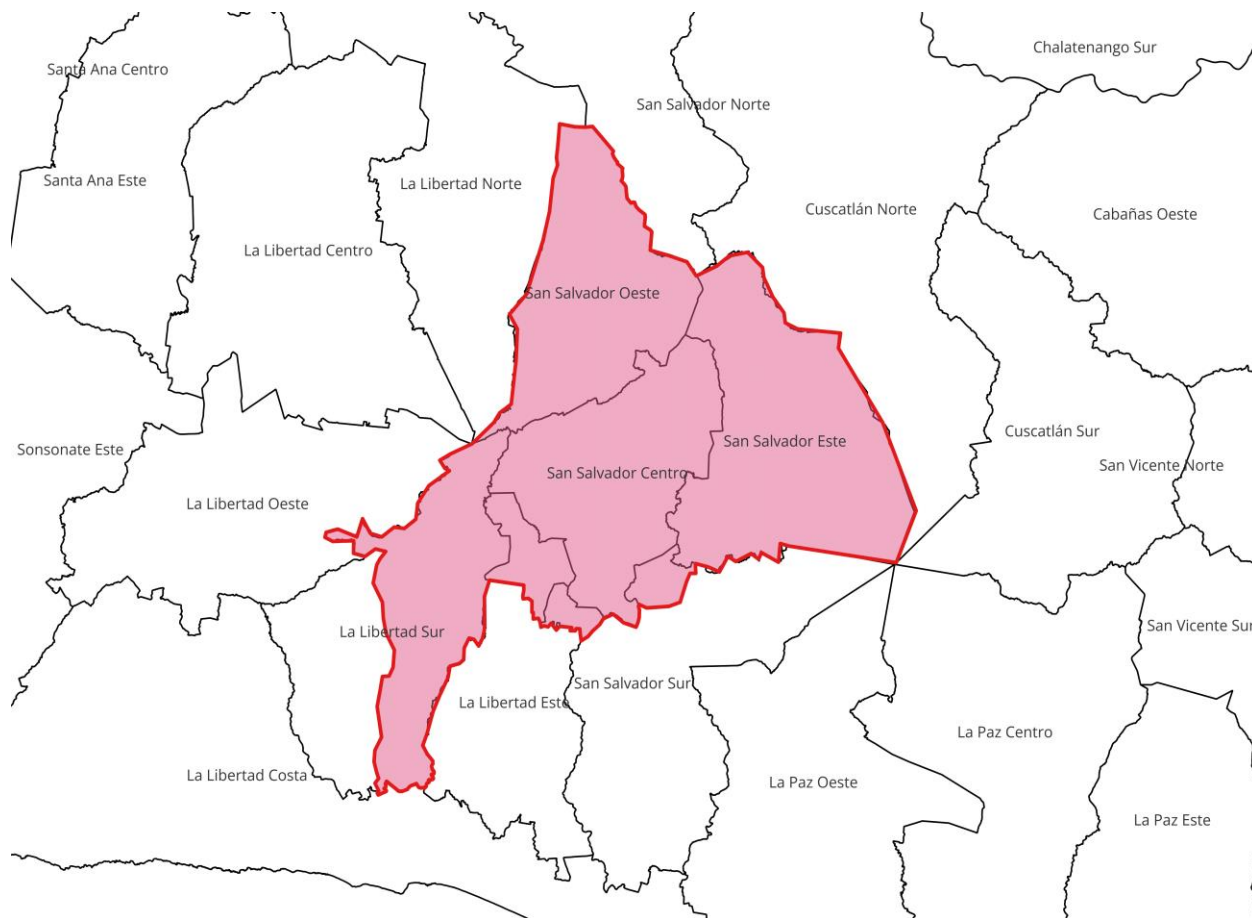
Figura 30

Distritos que conforman el área metropolitana de San Salvador (AMSS)



Coordenadas: 13.6894° N, -89.1872°O

Nota: Basado en (Atlas Metropolitano - OPAMSS, 2021)

Figura 31*Nueva distribución de municipios en El Salvador*

Coordenadas: 13.6894° N, -89.1872°O

Nota: Se muestran los municipios en los cuales está conformada el AMSS. Tomado de (*Geoportal - OPAMSS, 2025*)

En el artículo 47 de la norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución, establece que la SIGET determinará los puntos de verificación del nivel de distorsión armónica de tensión en las redes de distribución, designando a cada empresa distribuidora un (1) punto de verificación por cada sesenta mil (60,000) usuarios. Además, en el artículo 48 de la misma, establece que el período de medición en cada punto de verificación de distorsión armónica de tensión debe de ser al menos siete (7) días calendario, realizadas en intervalos de diez (10) minutos.

La siguiente tabla muestra el número de usuarios por municipio que tiene cada distribuidora.

Tabla 18

Distribución de usuarios correspondientes a cada distrito que conforma el AMSS

Distritos	Usuarios	
	CAESS	DELSUR
Santa Tecla		26261
San Salvador	115091	
Antiguo Cuscatlán	879	
San Marcos	62	13505
Nejapa	10193	
Tonacatepeque	26397	
Apopa	44913	
Cuscatancingo	22184	
Ayutuxtepeque	10624	
Ciudad Delgado	31837	
Mejicanos	46151	
Soyapango	81034	
Ilopango	32956	
San Martín	22783	
Total	445104	39766

Nota: Datos proporcionados por (AES CAESS GIS CORPORATIVO, 2024) y (DELSUR, 2024)

Se determinó, que para CAESS se necesitan siete puntos de verificación como mínimo y para DELSUR un punto de verificación para realizar el estudio armónico.

PUNTO 1: Medición del edificio de medicina de la Universidad de El Salvador

Figura 32

Ubicación del edificio de Medicina, Universidad de El



Coordenada: 13°43'01"N 89°12'08"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 19

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	3φ en estrella
Tensión nominal	207 V
Corriente nominal	500 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	14 d 5h

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 33

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

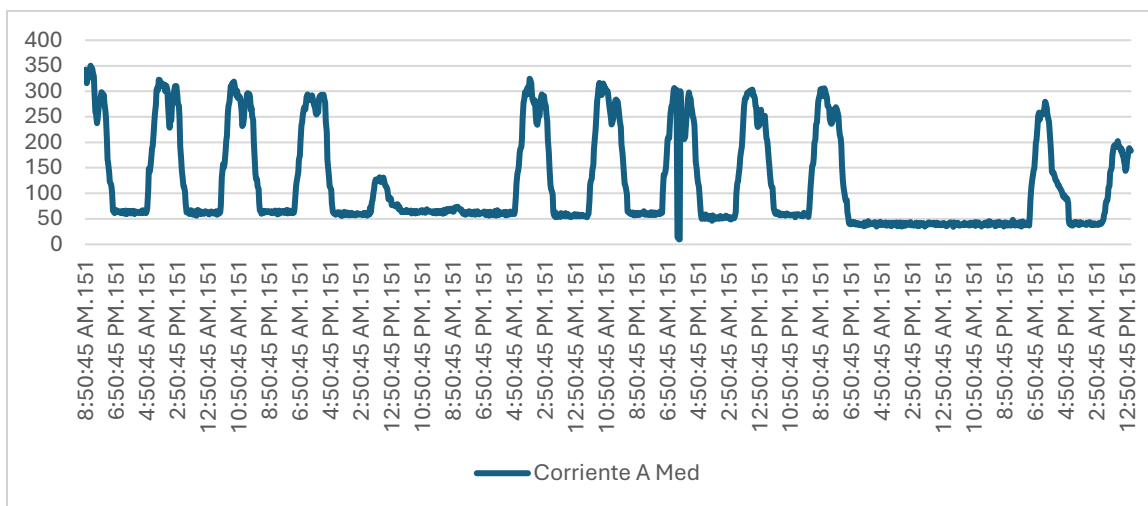


Figura 34

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

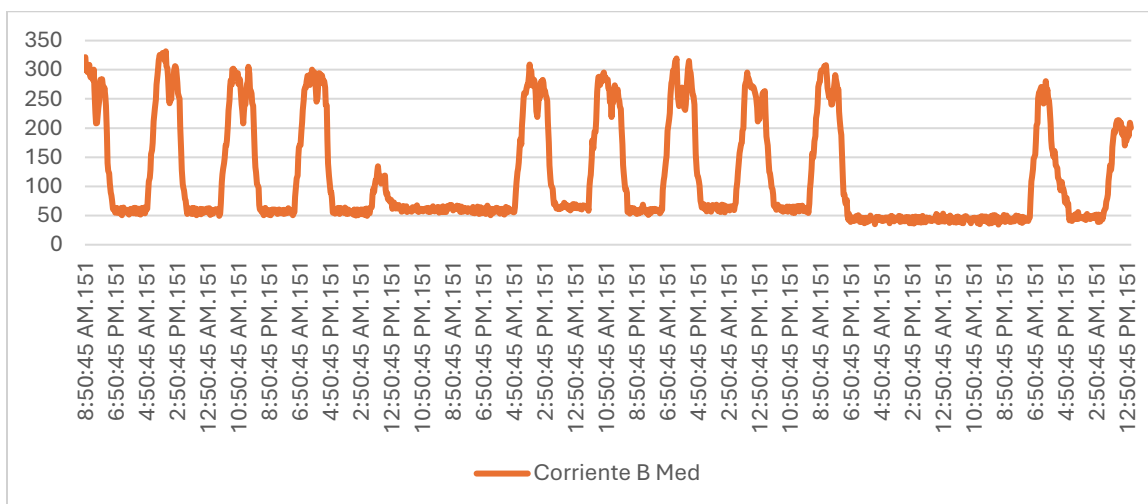
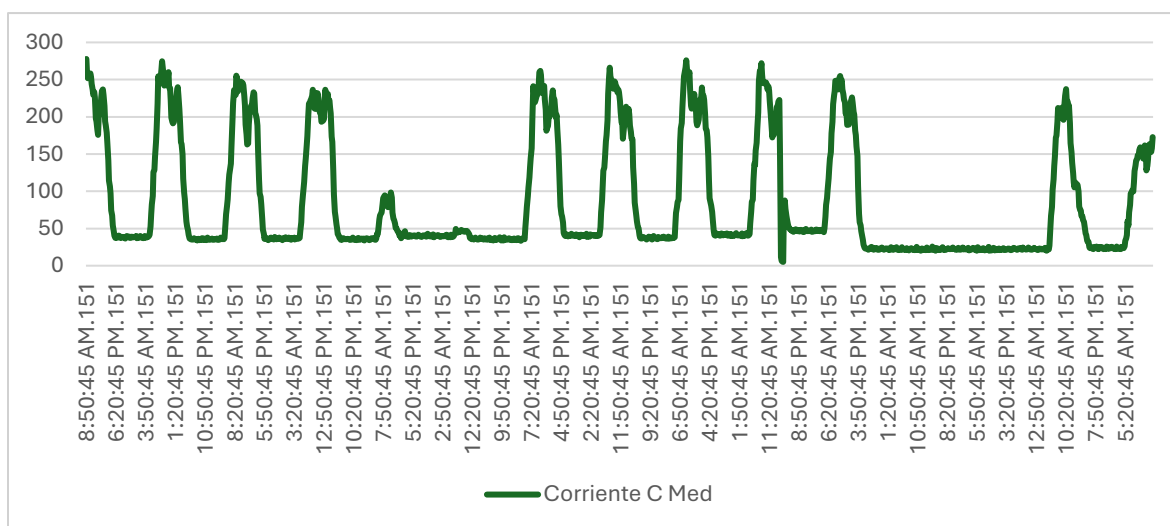
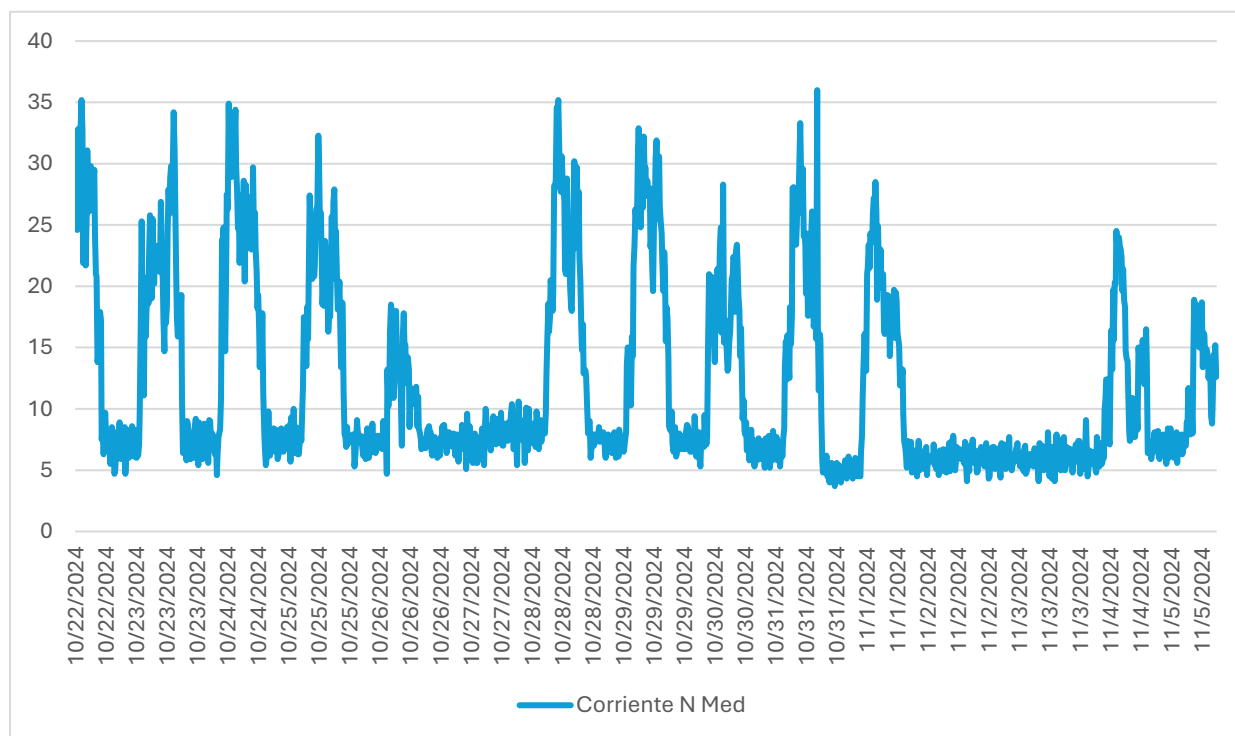


Figura 35

Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios

**Figura 36**

Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 37

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje

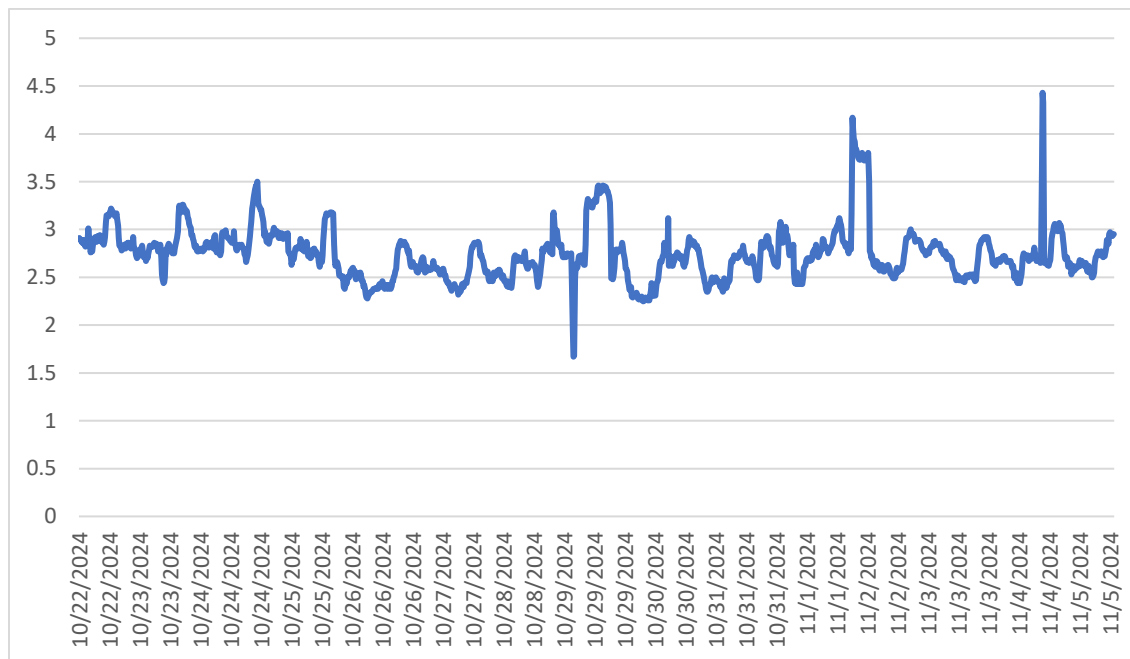


Figura 38

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje

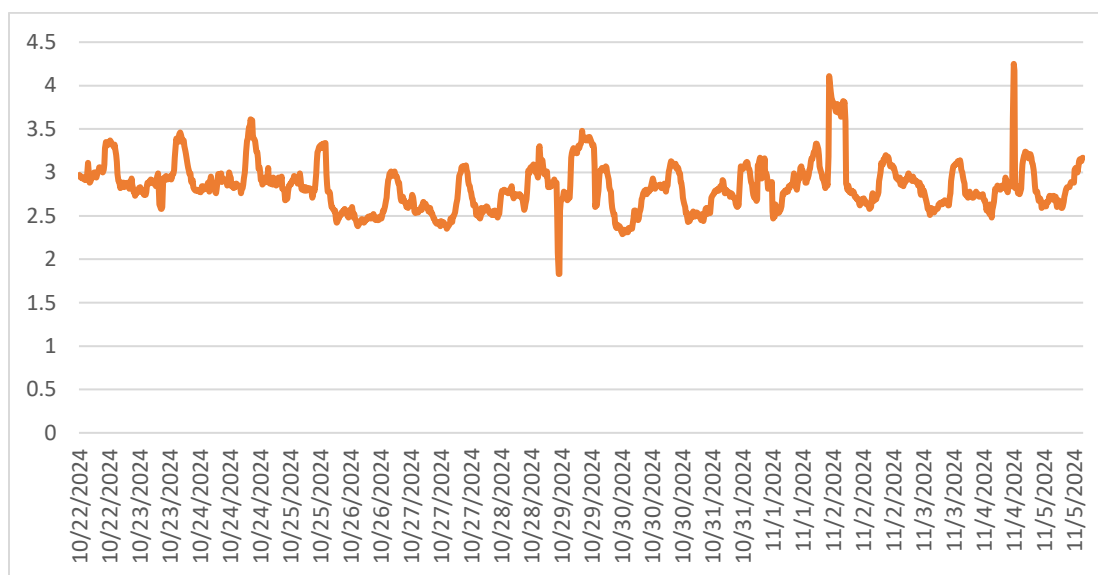
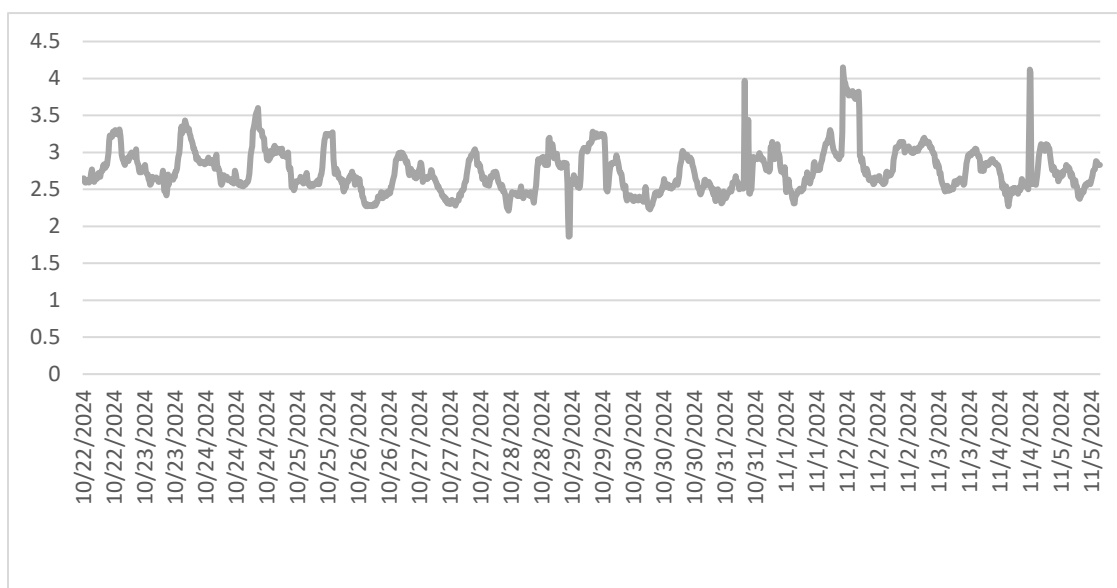


Figura 39

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje



Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases

Figura 40

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en porcentaje

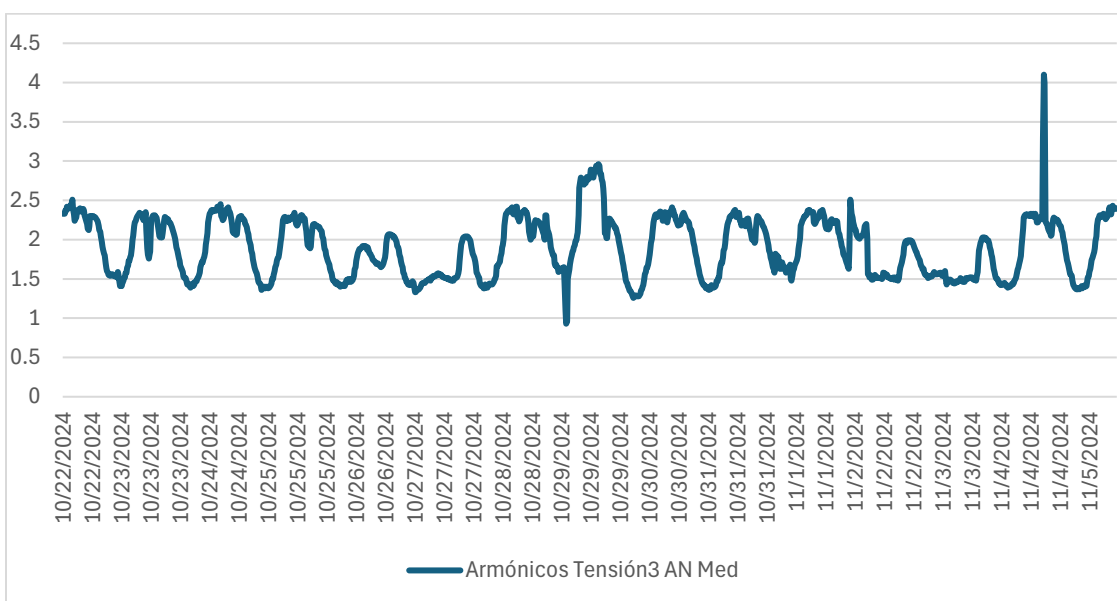
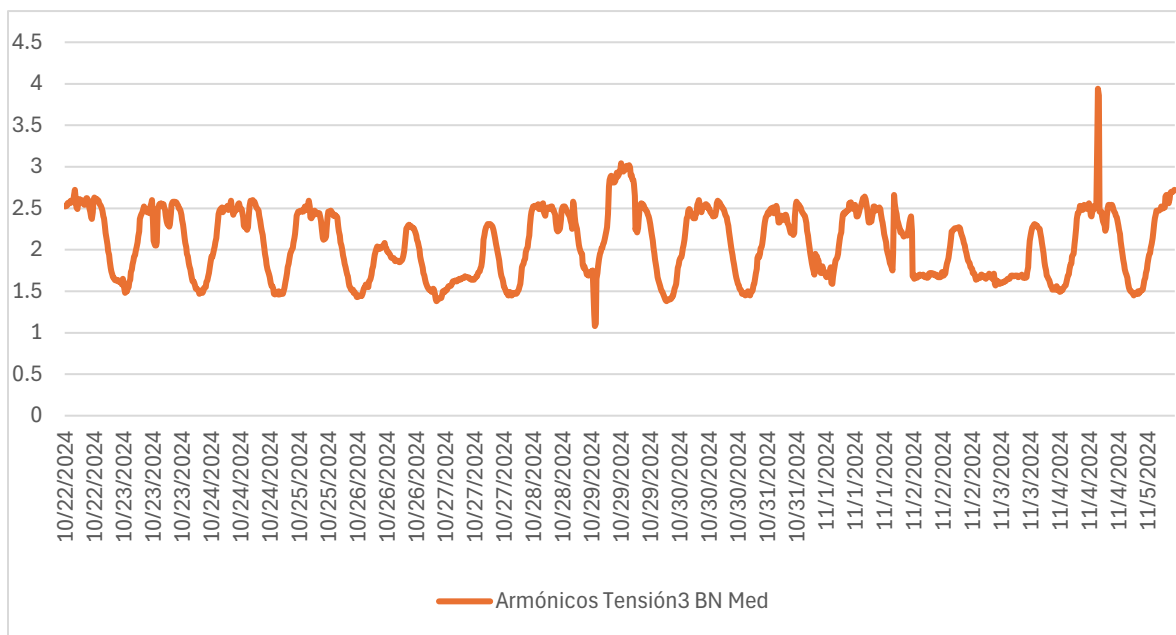


Figura 41

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en porcentaje

**Figura 42**

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en porcentaje

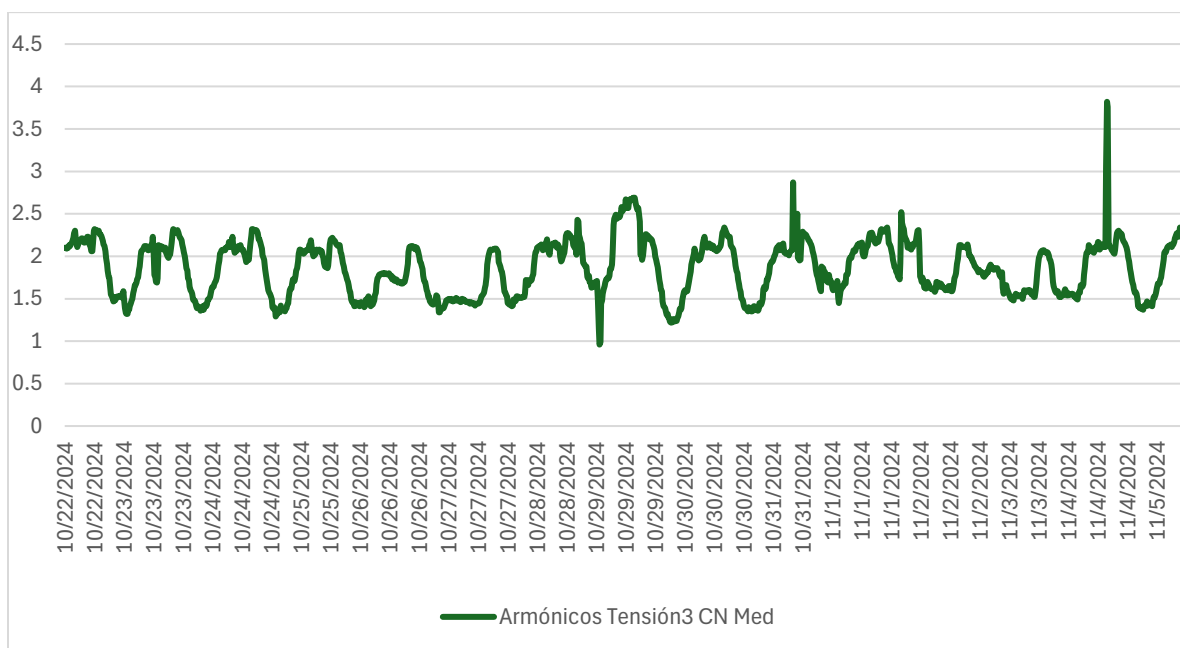


Figura 43

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

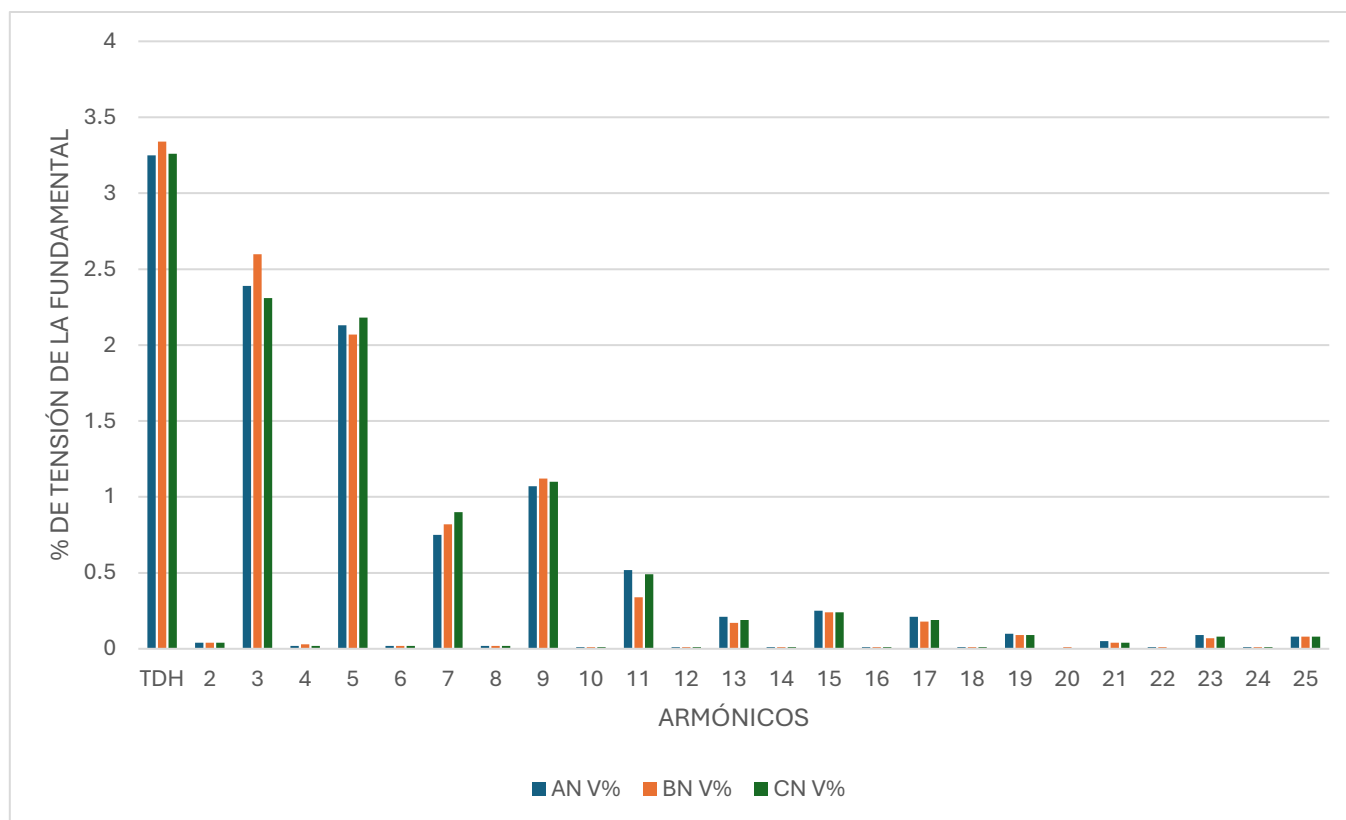


Tabla 20

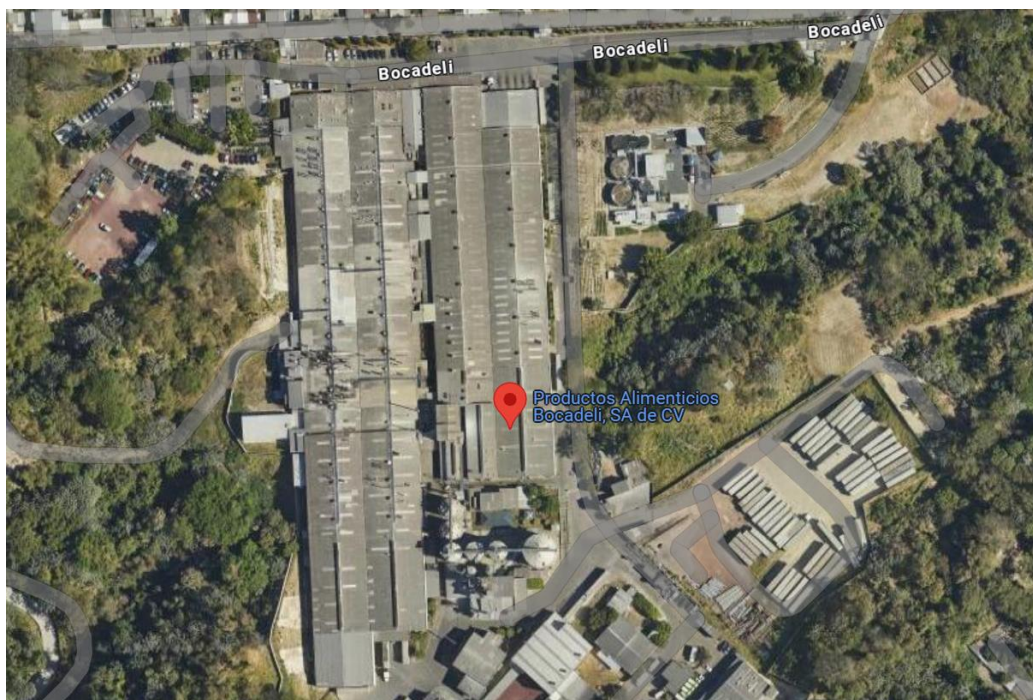
Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	Armónicos de tensión			SIGET	IEEE 519-2022	IEEE 519-1992			
	AN V%	BN V%	CN V%						
TDH	3.25	3.34	3.26	8%	PASA	8%	PASA	5%	PASA
2	0.04	0.04	0.04	2%	PASA		PASA		PASA
3	2.39	2.5975	2.31	5%	PASA		PASA		PASA
4	0.02	0.03	0.02	1%	PASA		PASA		PASA
5	2.13	2.07	2.18	6%	PASA		PASA		PASA
6	0.02	0.02	0.02	0.50%	PASA		PASA		PASA
7	0.75	0.82	0.9	5%	PASA		PASA		PASA
8	0.02	0.02	0.02	0.50%	PASA		PASA		PASA
9	1.07	1.12	1.1	1.50%	PASA		PASA		PASA
10	0.01	0.01	0.01	0.50%	PASA		PASA		PASA
11	0.5175	0.34	0.49	3.50%	PASA		PASA		PASA
12	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
13	0.21	0.17	0.19	3%	PASA	5%	PASA	3%	PASA
14	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
15	0.25	0.24	0.24	0.30%	PASA		PASA		PASA
16	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
17	0.21	0.18	0.19	2%	PASA		PASA		PASA
18	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
19	0.1	0.09	0.09	1.50%	PASA		PASA		PASA
20	0	0.01	0	0.20%	PASA		PASA		PASA
21	0.05	0.04	0.04	0.20%	PASA		PASA		PASA
22	0.01	0.01	0	0.20%	PASA		PASA		PASA
23	0.09	0.07	0.08	1.50%	PASA		PASA		PASA
24	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
25	0.08	0.08	0.08	1.50%	PASA		PASA		PASA

PUNTO 2: Productos Alimenticios Bocadeli S.A. de C.V.

Figura 44

Ubicación correspondiente a empresa productora BOCADELI



COORDENADA: 13°41'08.6"N 89°08'48.6"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 21

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	4 Hilos/3φ en estrella
Tensión nominal	23000 V
Corriente nominal	53.1A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	7 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 45

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

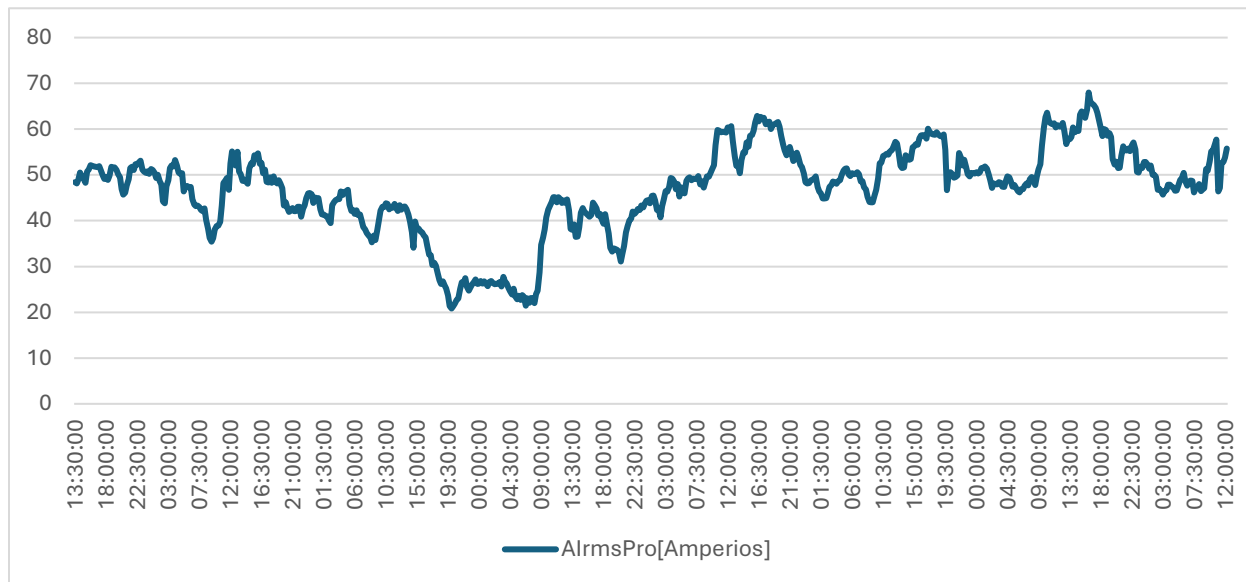


Figura 46

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

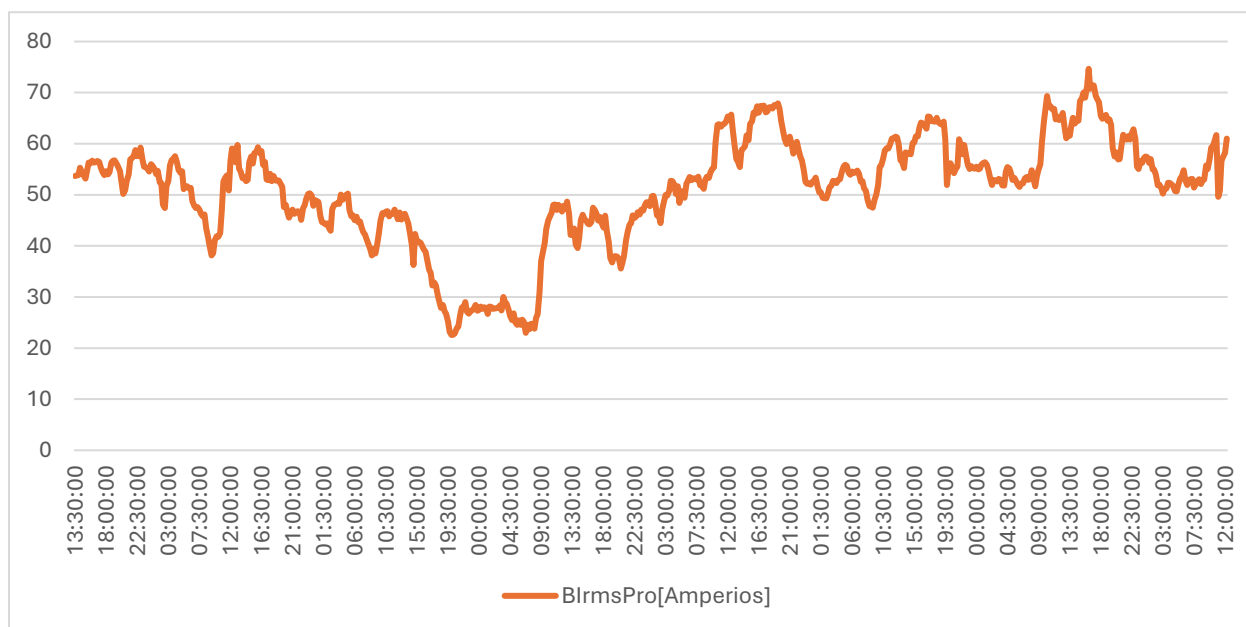
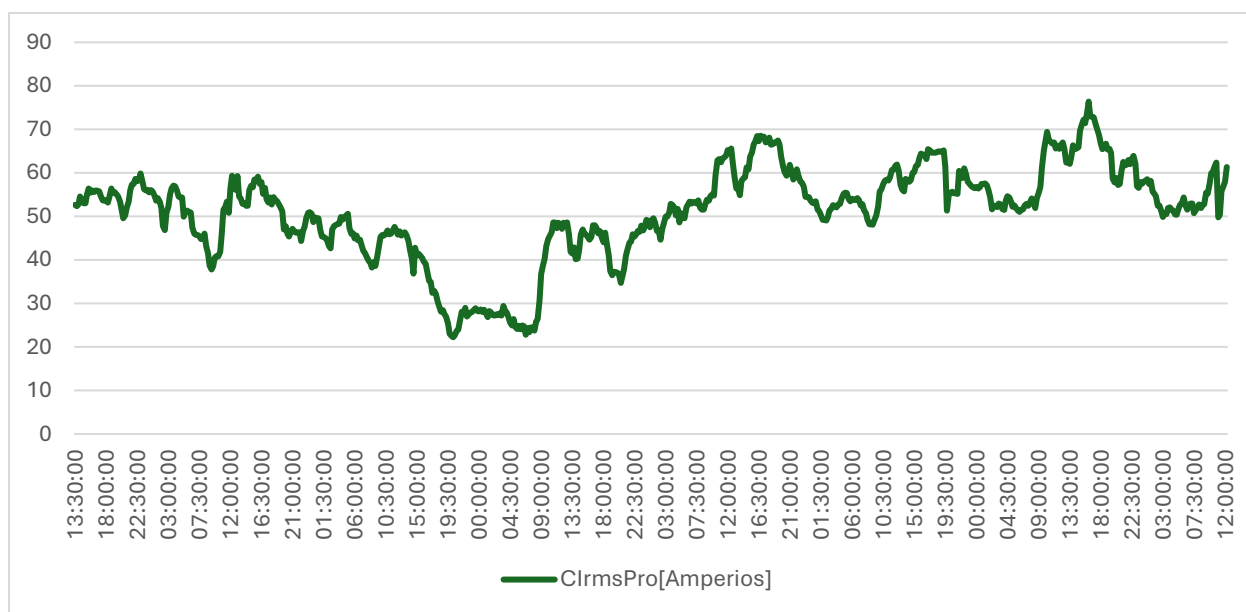
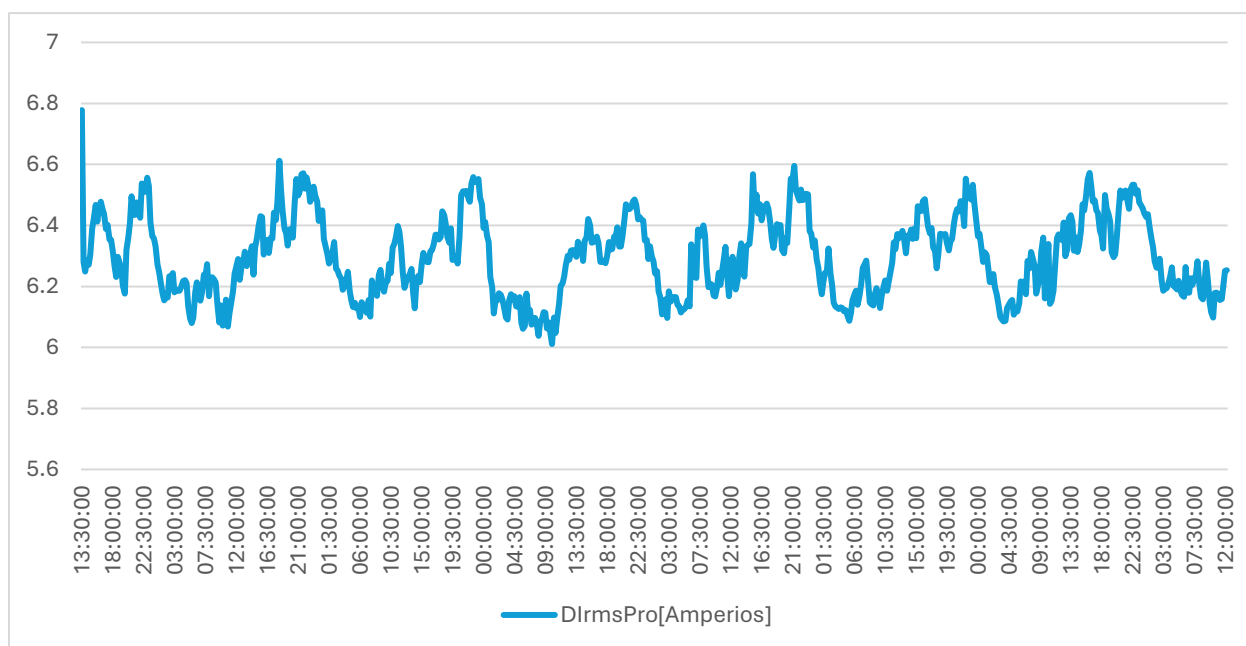


Figura 47

Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios

**Figura 48**

Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total THD de tensión

Figura 49

Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "A" en porcentaje

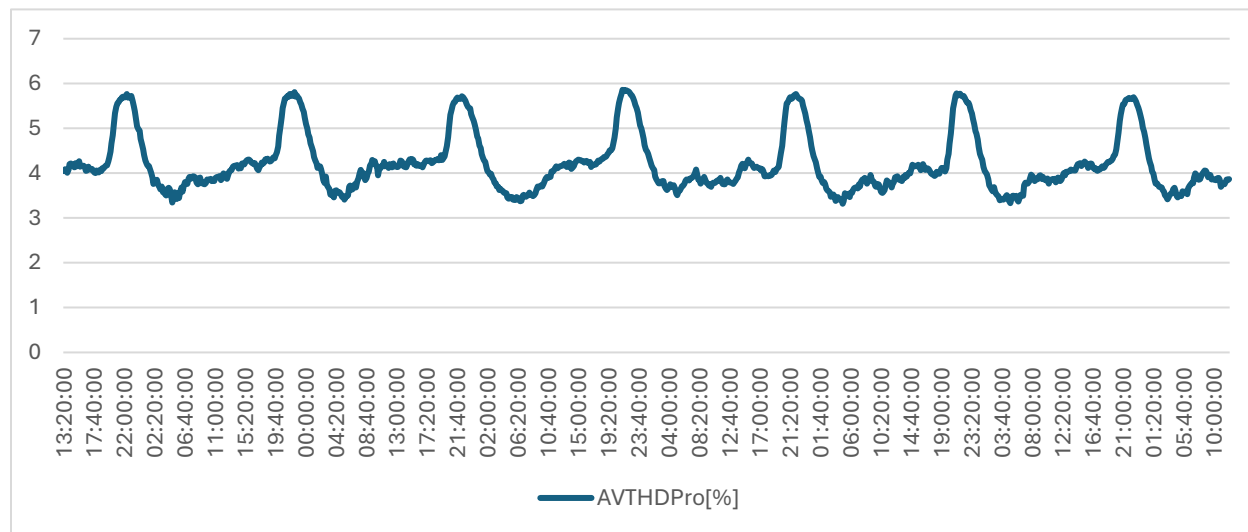


Figura 50

Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "B" en porcentaje

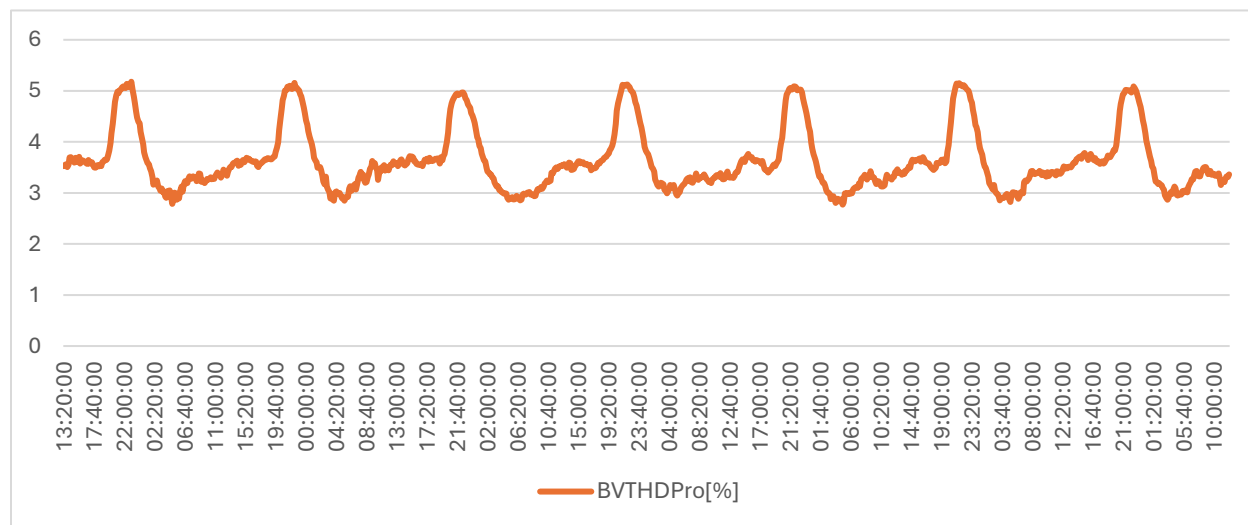
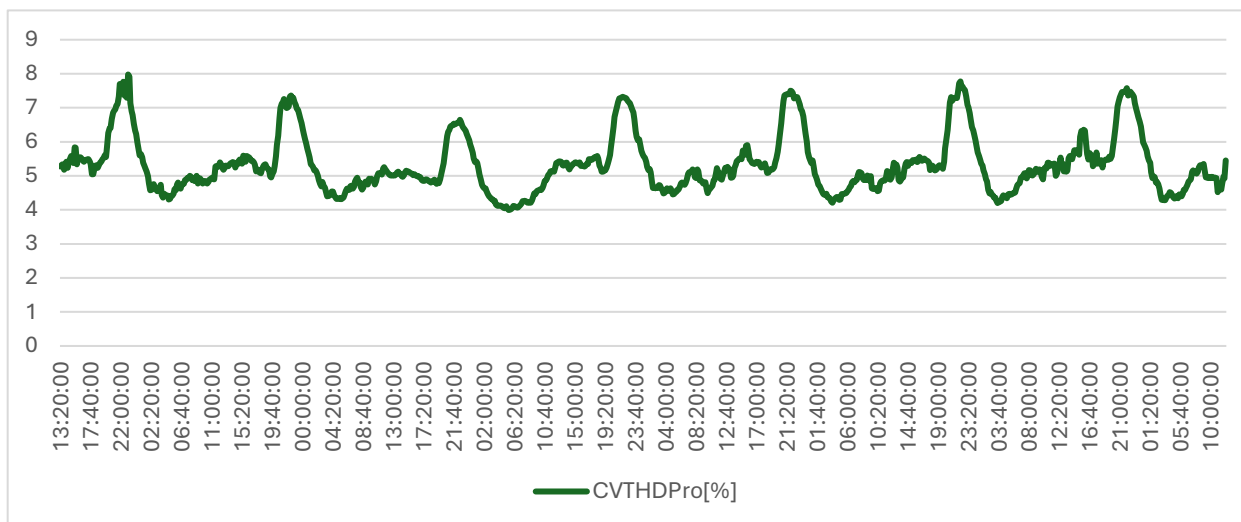


Figura 51

Tendencia del THD de tensión correspondiente a la fase "C" en porcentaje



Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases

Figura 52

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

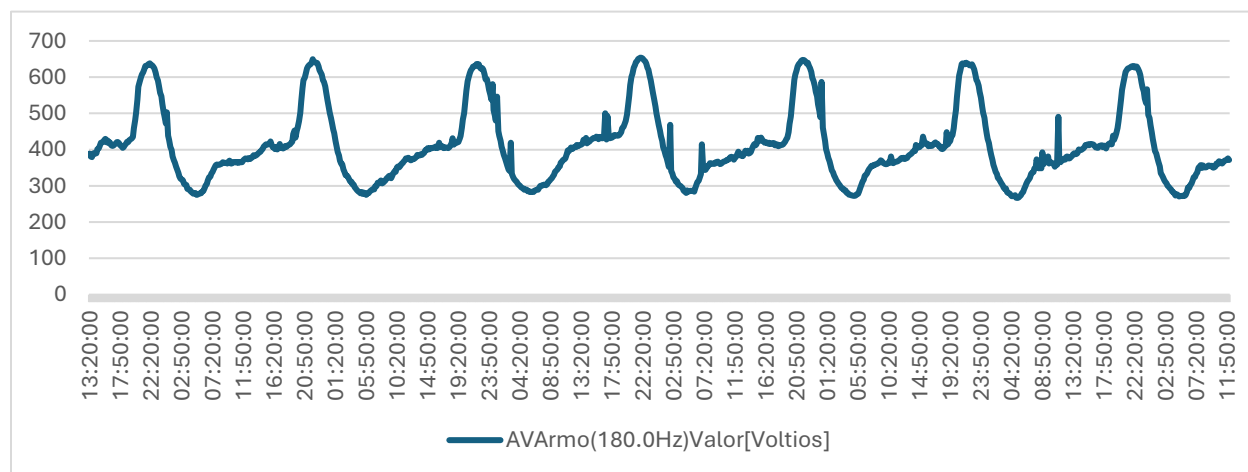
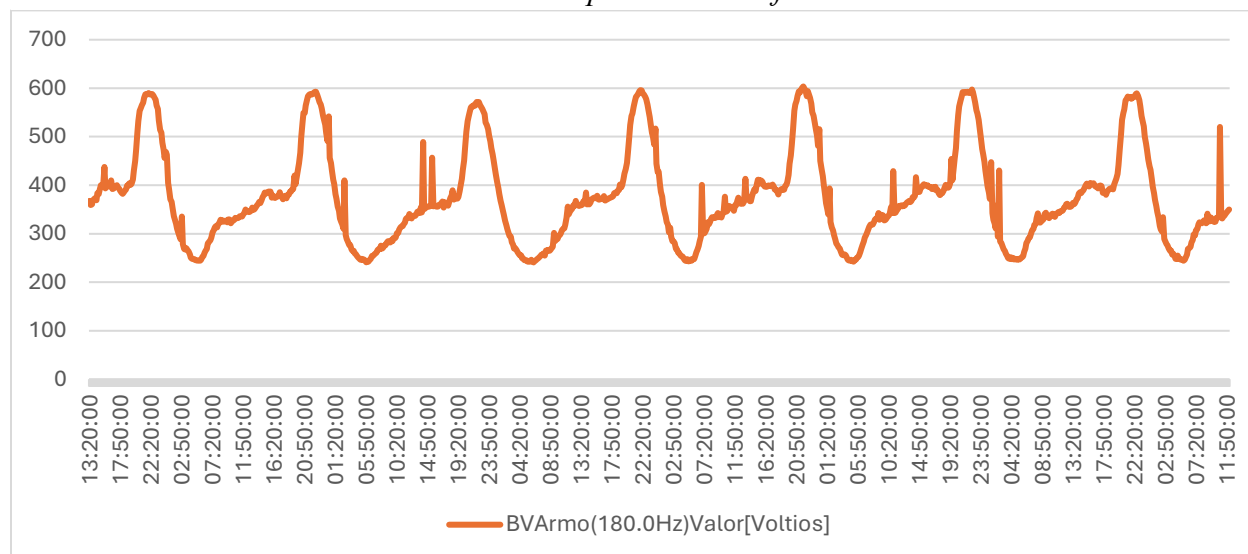


Figura 54

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

**Figura 53**

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios

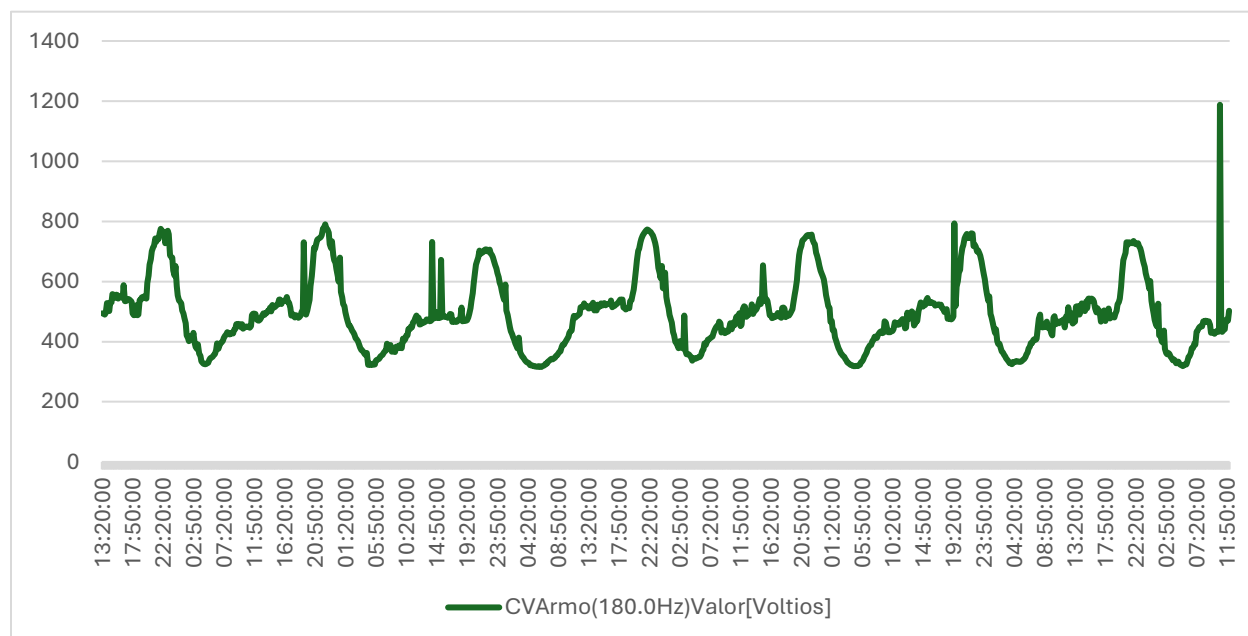


Figura 55

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

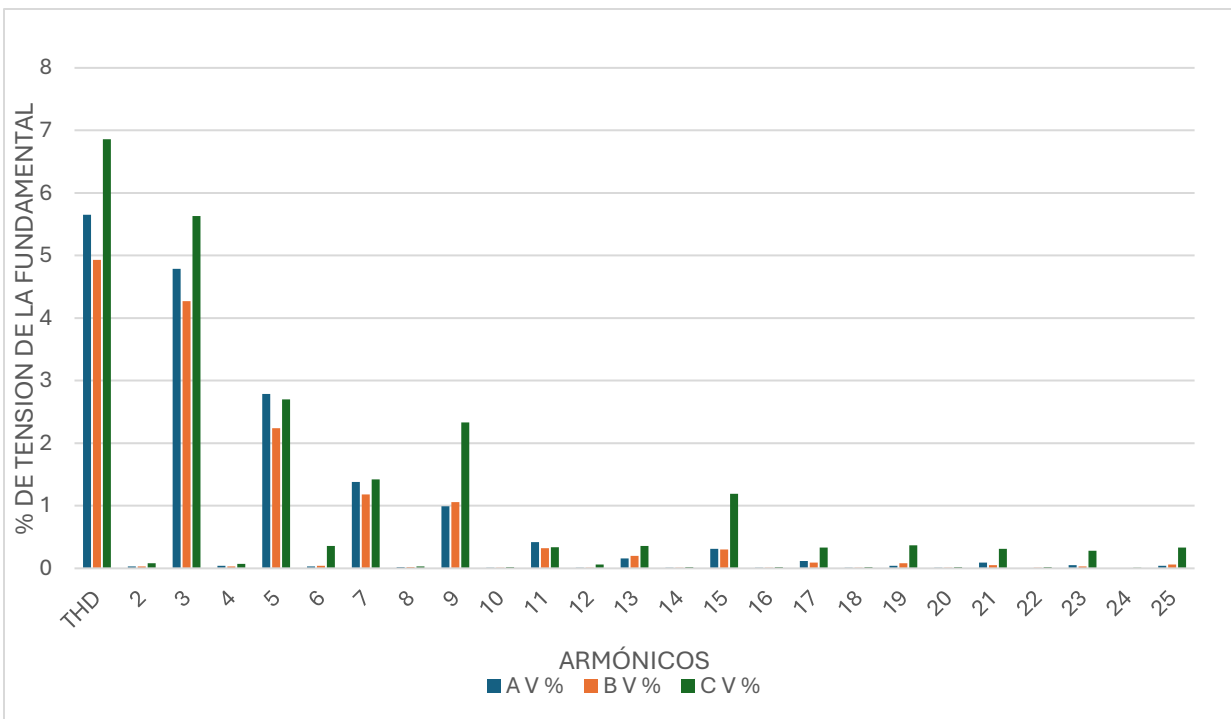


Tabla 22

Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles

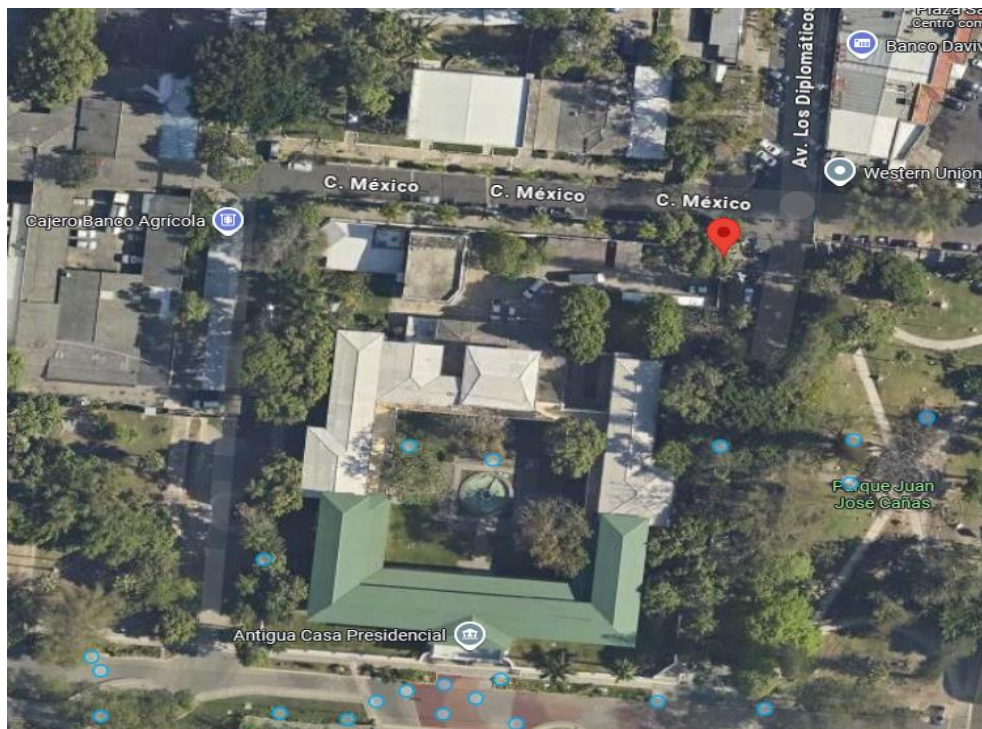
ARM.	A V %	B V %	C V %	Armónicos de tensión					
				SIGET		IEEE519-2022		IEEE519-1992	
THD	5.65	4.93	6.86	8%	PASA	5%	NO PASA	5%	NO PASA
2	0.03	0.03	0.08	2%	PASA		PASA		PASA
3	4.79	4.27	5.63	5%	NO PASA		NO PASA		NO PASA
4	0.04	0.03	0.07	1%	PASA		PASA		PASA
5	2.79	2.24	2.7	6%	PASA		PASA		PASA
6	0.03	0.04	0.36	0.50%	PASA		PASA		PASA
7	1.38	1.18	1.42	5%	PASA		PASA		PASA
8	0.02	0.02	0.03	0.50%	PASA		PASA		PASA
9	0.99	1.06	2.33	1.50%	NO PASA		PASA		PASA
10	0.01	0.01	0.02	0.50%	PASA		PASA		PASA
11	0.42	0.32	0.34	3.50%	PASA		PASA		PASA
12	0.01	0.01	0.06	0.20%	PASA	3%	PASA	3%	PASA
13	0.16	0.2	0.36	3%	PASA		PASA		PASA
14	0.01	0.01	0.02	0.20%	PASA		PASA		PASA
15	0.31	0.3	1.19	0.30%	NO PASA		PASA		PASA
16	0.01	0.01	0.02	0.20%	PASA		PASA		PASA
17	0.12	0.09	0.33	2%	PASA		PASA		PASA
18	0.01	0.01	0.02	0.20%	PASA		PASA		PASA
19	0.04	0.08	0.37	1.50%	PASA		PASA		PASA
20	0.01	0.01	0.02	0.20%	PASA		PASA		PASA
21	0.09	0.05	0.31	0.20%	PASA		PASA		PASA
22	0	0.01	0.02	0.20%	PASA		PASA		PASA
23	0.05	0.03	0.28	1.50%	PASA		PASA		PASA
24	0	0	0.01	0.20%	PASA		PASA		PASA
25	0.04	0.06	0.33	1.50%	PASA		PASA		PASA

de distorsión armónica de tensión permitidos

PUNTO 3: Antigua Casa Presidencial

Figura 56

Ubicación correspondiente a Antigua Casa Presidencial



COORDENADA: 13°41'02"N 89°11'26"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 23

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	1φ
Tensión nominal	240/120 V
Corriente nominal	656.9 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	9 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 57

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

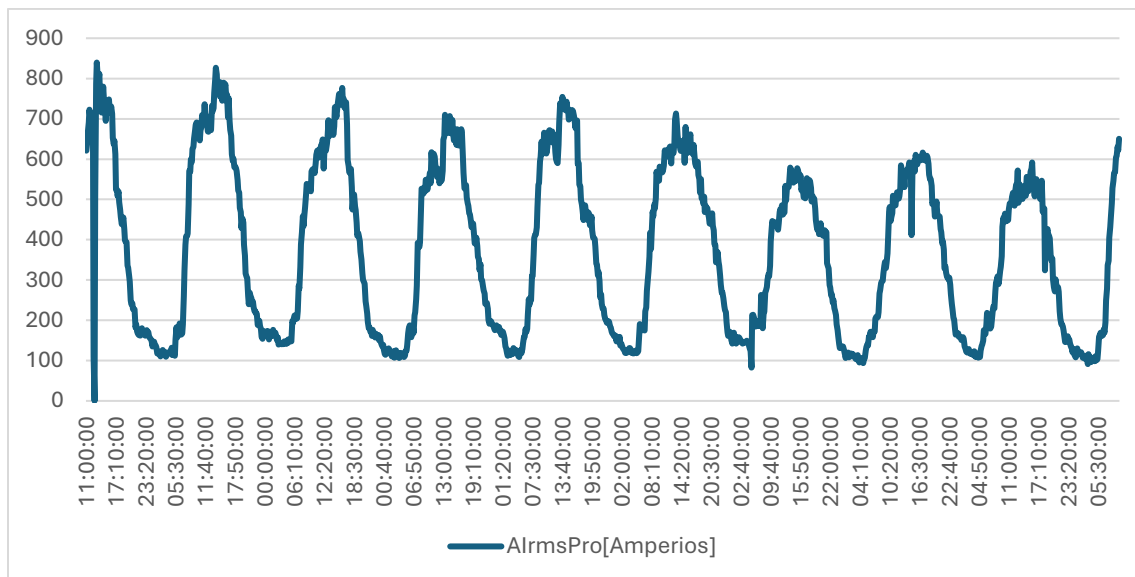


Figura 58

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

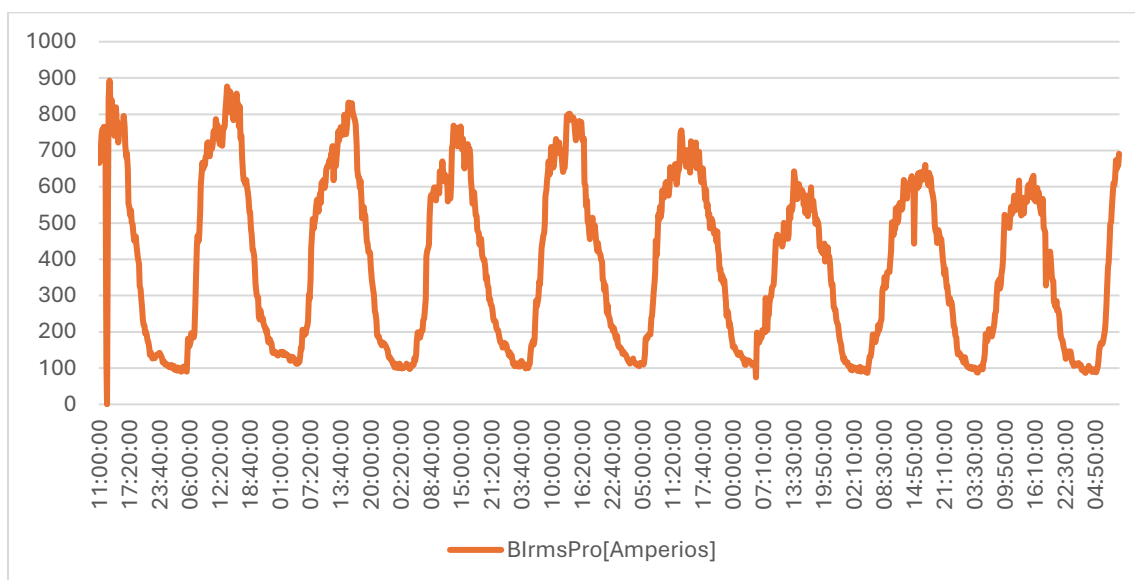
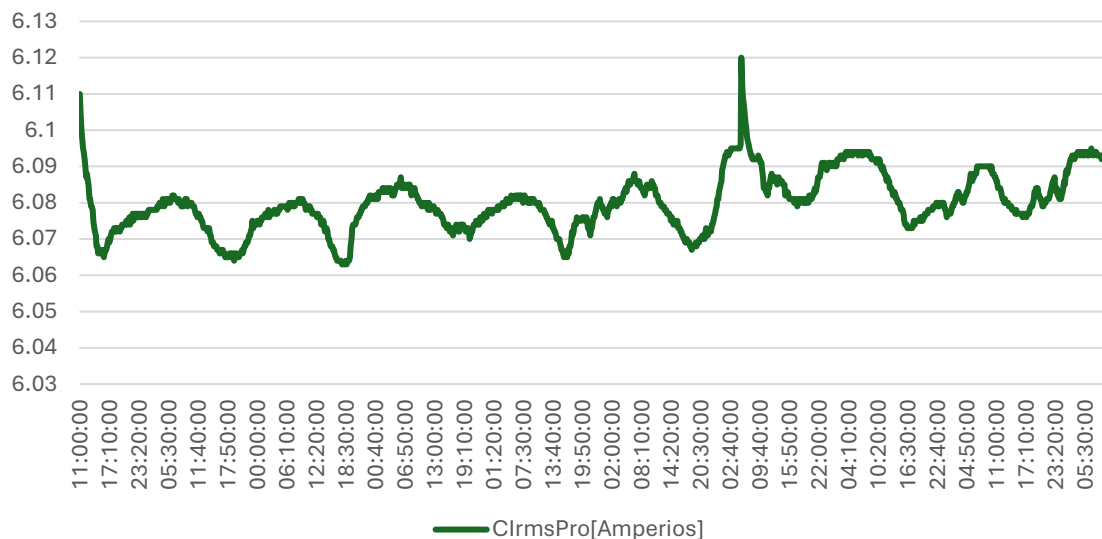


Figura 59

Intensidad de corriente que circula por el conductor Neutro en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica de tensión presente en cada una de las fases

Figura 60

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en Voltios

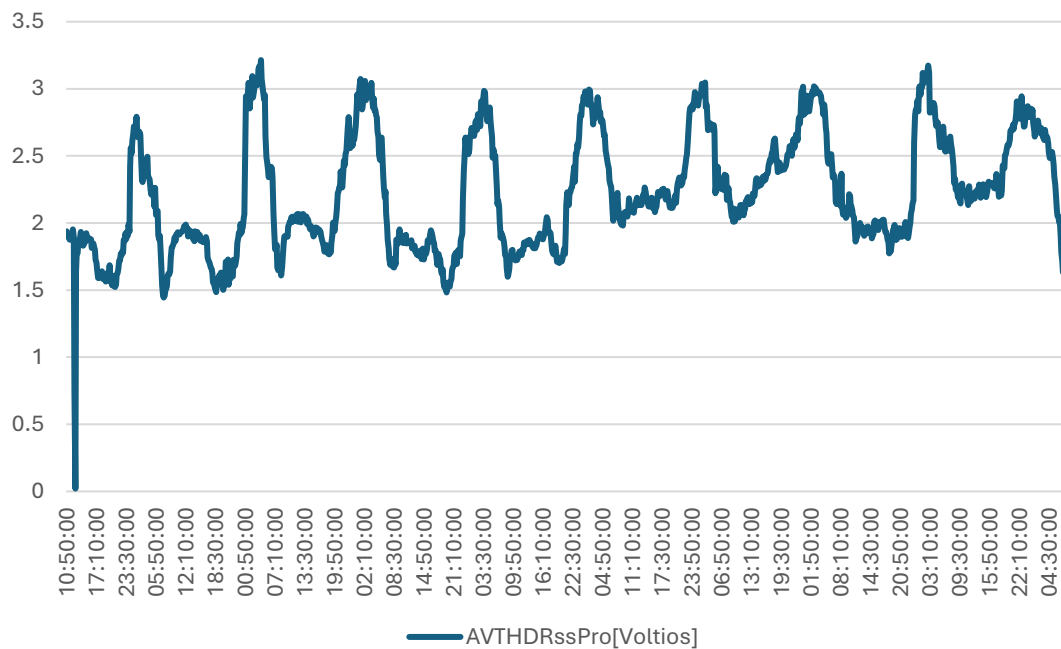
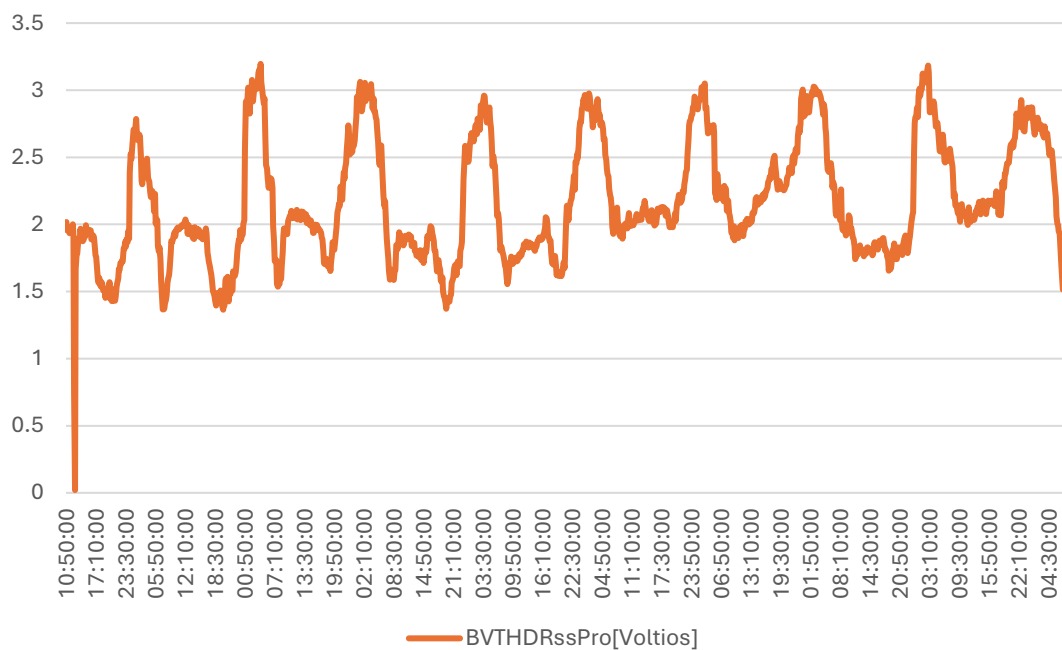
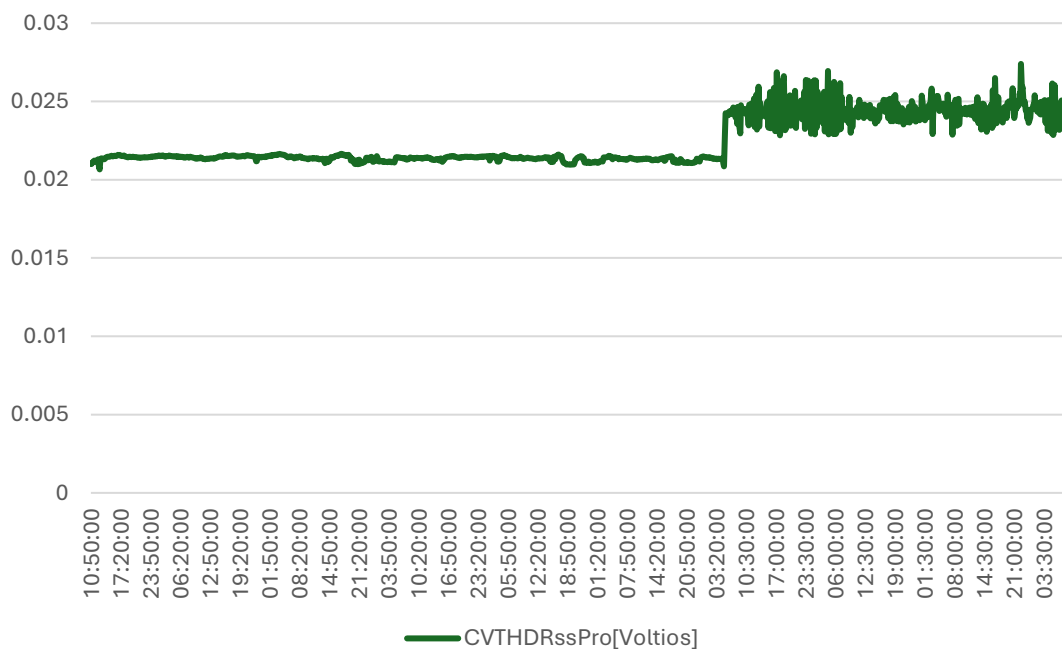


Figura 61

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en Voltios

**Figura 62**

Tendencia del THD de tensión presente en el conductor Neutro en Voltios



Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada una de las fases

Figura 63

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

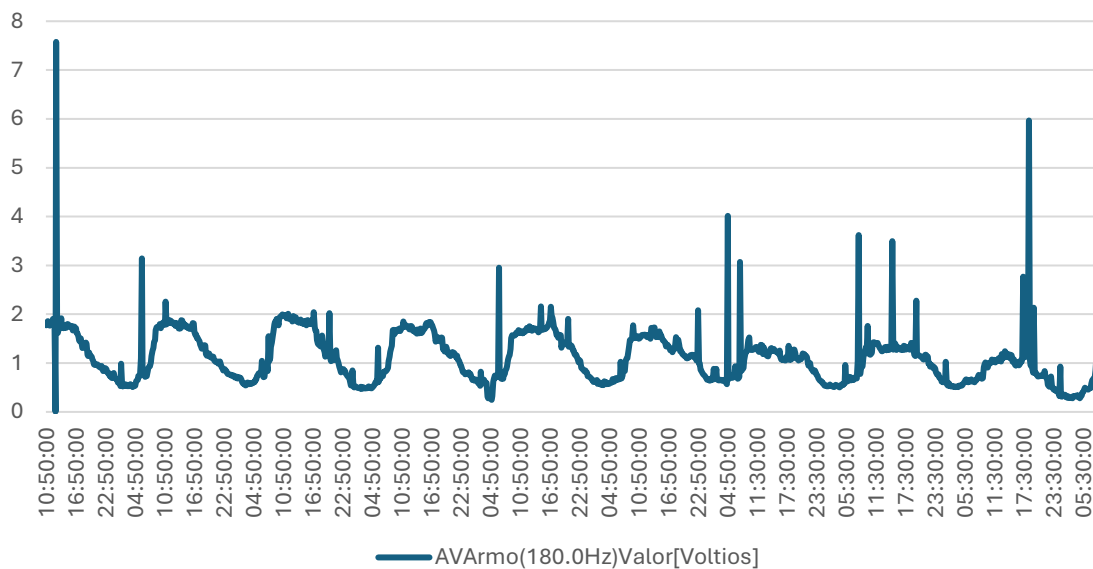


Figura 64

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

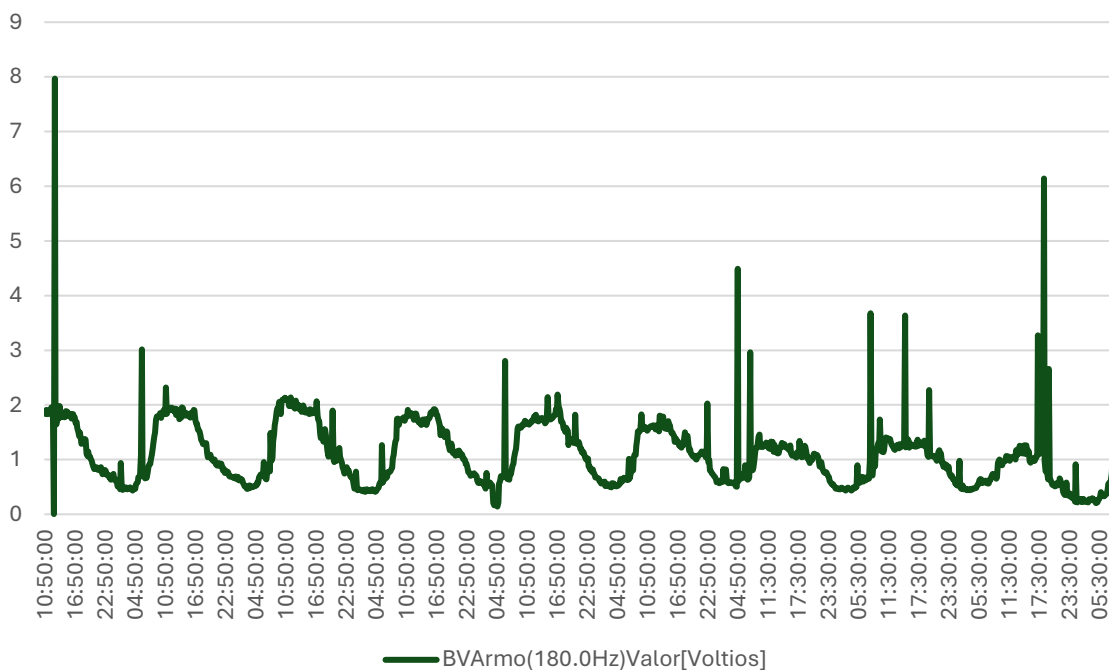


Figura 65

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios

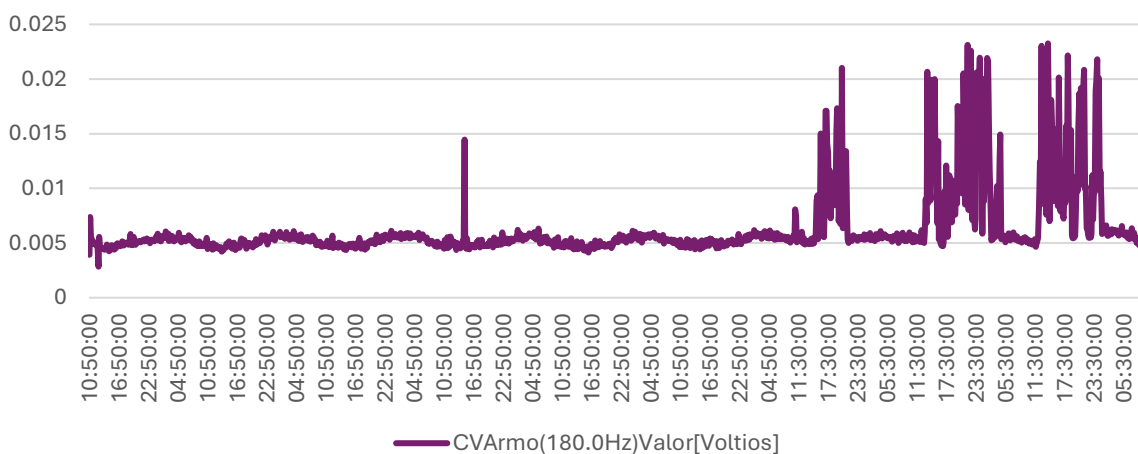


Figura 66

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

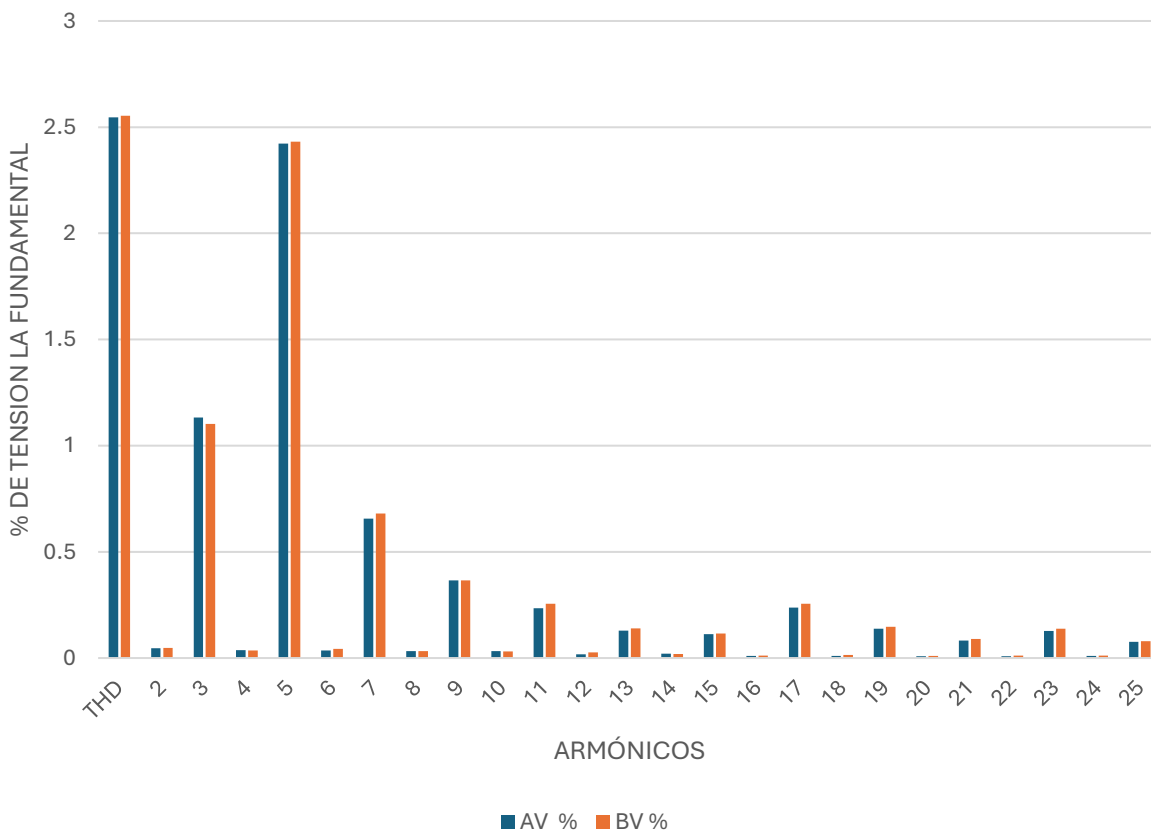


Tabla 24

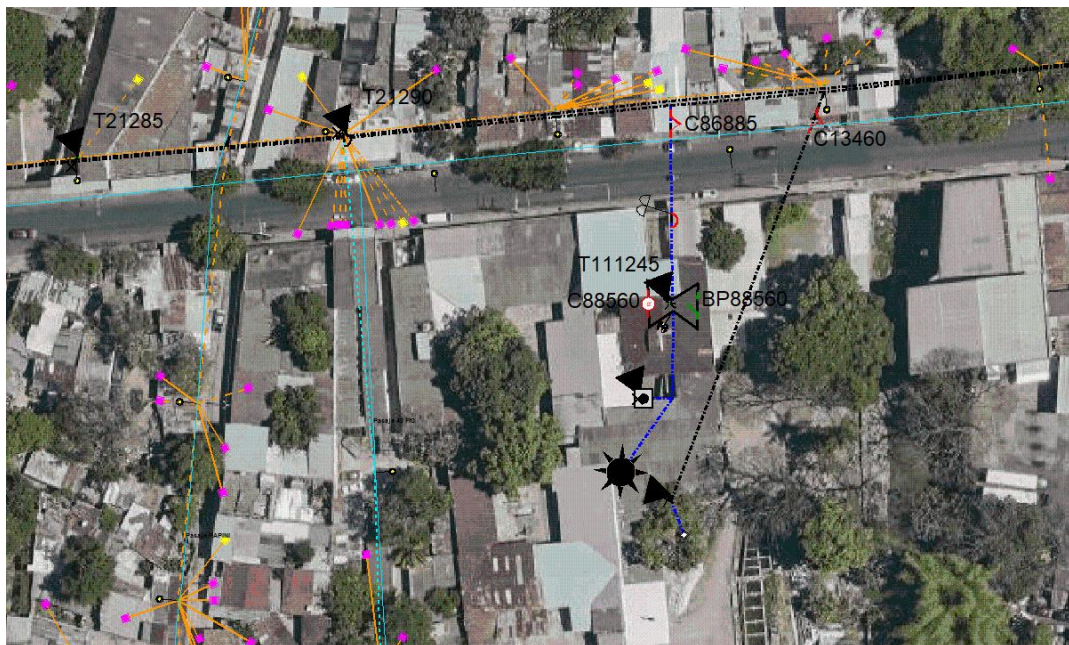
Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	AV %	BV %	Armónicos de tensión					
			SIGET		IEEE 519-2022		IEEE 519-1992	
THD	2.546	2.553	8%	Pasa	8%	Pasa	5%	Pasa
2	0.047	0.048	2%	Pasa		Pasa		Pasa
3	1.133	1.103	5%	Pasa		Pasa		Pasa
4	0.037	0.036	1%	Pasa		Pasa		Pasa
5	2.422	2.432	6%	Pasa		Pasa		Pasa
6	0.036	0.044	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
7	0.657	0.681	5%	Pasa		Pasa		Pasa
8	0.032	0.032	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
9	0.366	0.365	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
10	0.032	0.031	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
11	0.235	0.256	3.50%	Pasa		Pasa		Pasa
12	0.018	0.027	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
13	0.129	0.139	3%	Pasa	5%	Pasa	3%	Pasa
14	0.02	0.019	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
15	0.112	0.115	0.30%	Pasa		Pasa		Pasa
16	0.01	0.012	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
17	0.238	0.255	2%	Pasa		Pasa		Pasa
18	0.01	0.014	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
19	0.138	0.147	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
20	0.008	0.01	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
21	0.083	0.09	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
22	0.009	0.011	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
23	0.128	0.138	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
24	0.01	0.012	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
25	0.077	0.08	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa

PUNTO 4: Planta fotovoltaica MAS SOLAR

Figura 67

Ubicación correspondiente a Planta FV MAS SOLAR



COORDENADA: 13°41'36"N 89°12'00"W

Nota: Imagen proporcionada por (AES CAESS GIS CORPORATIVO, 2024)

Tabla 25

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	3φ en estrella
Tensión nominal	2400V
Corriente nominal	53.1 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	7 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 68

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

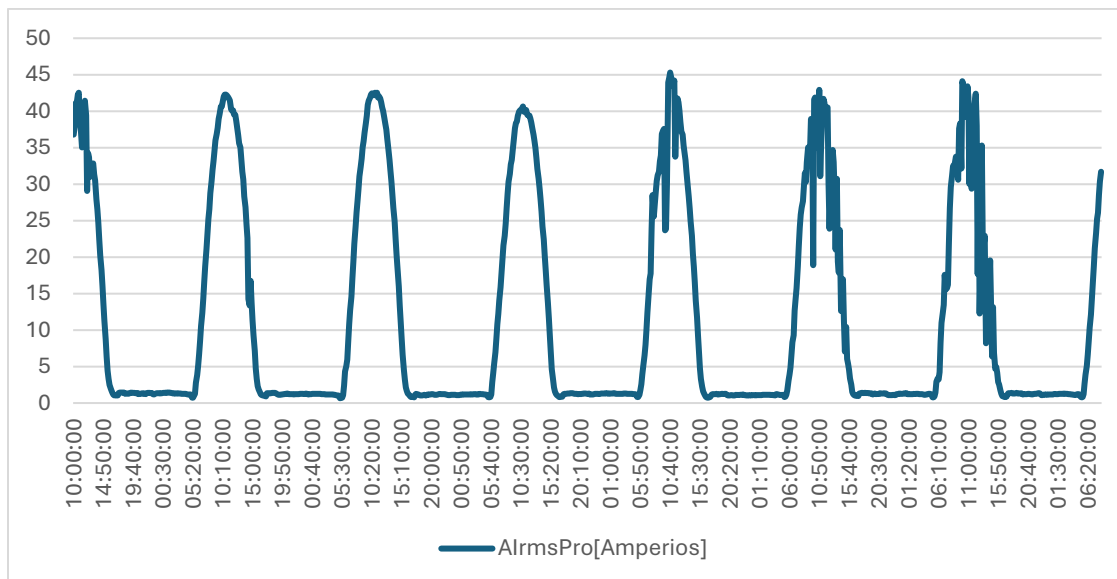


Figura 69

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

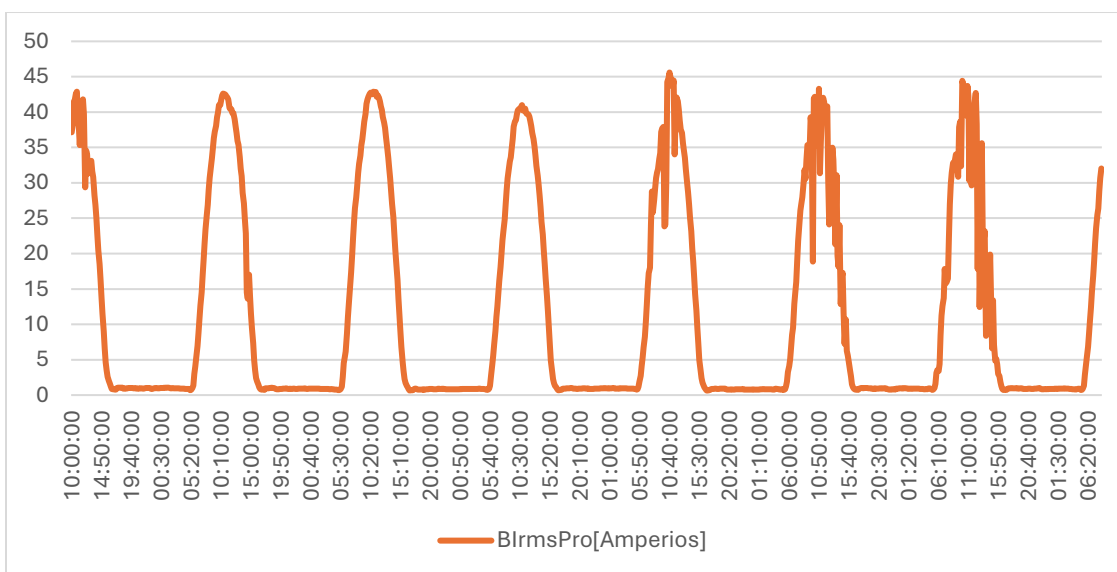
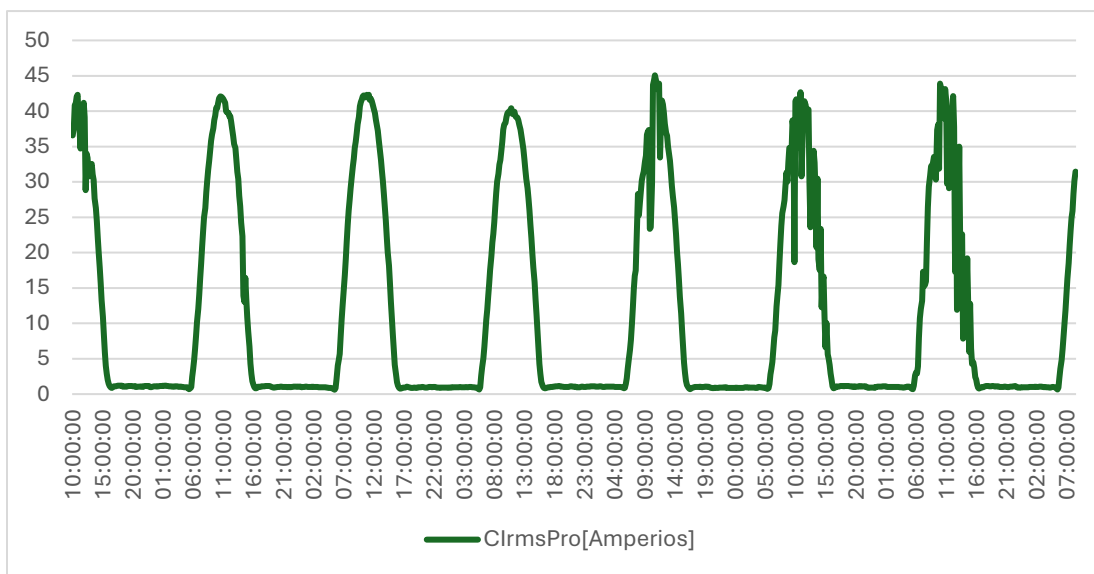


Figura 70

Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 71

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje

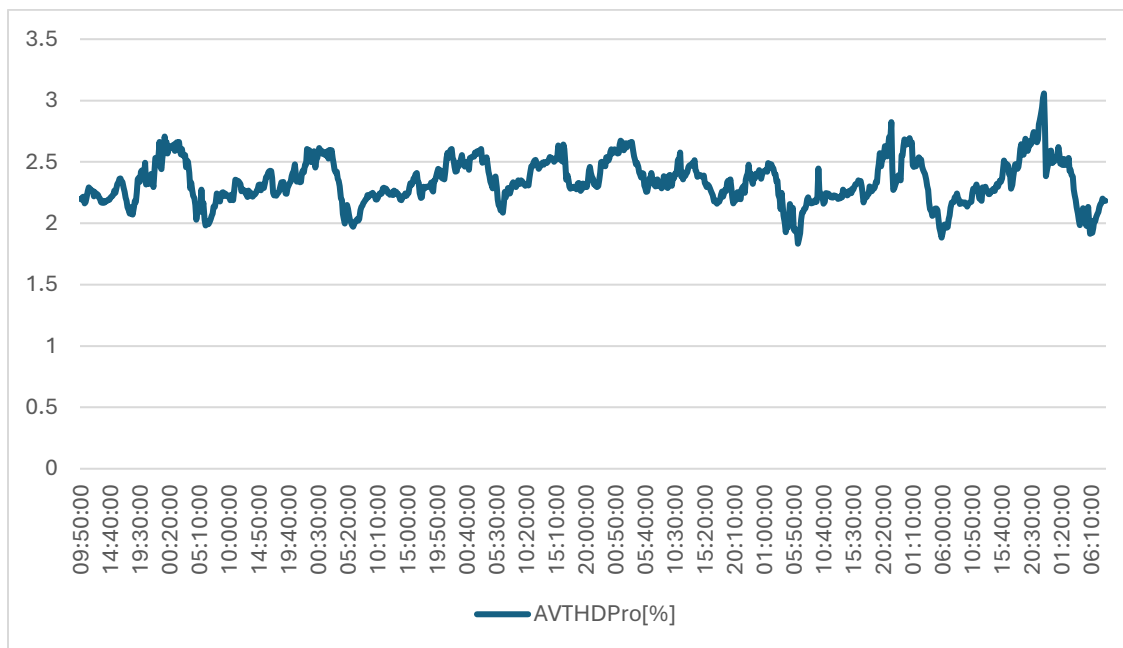
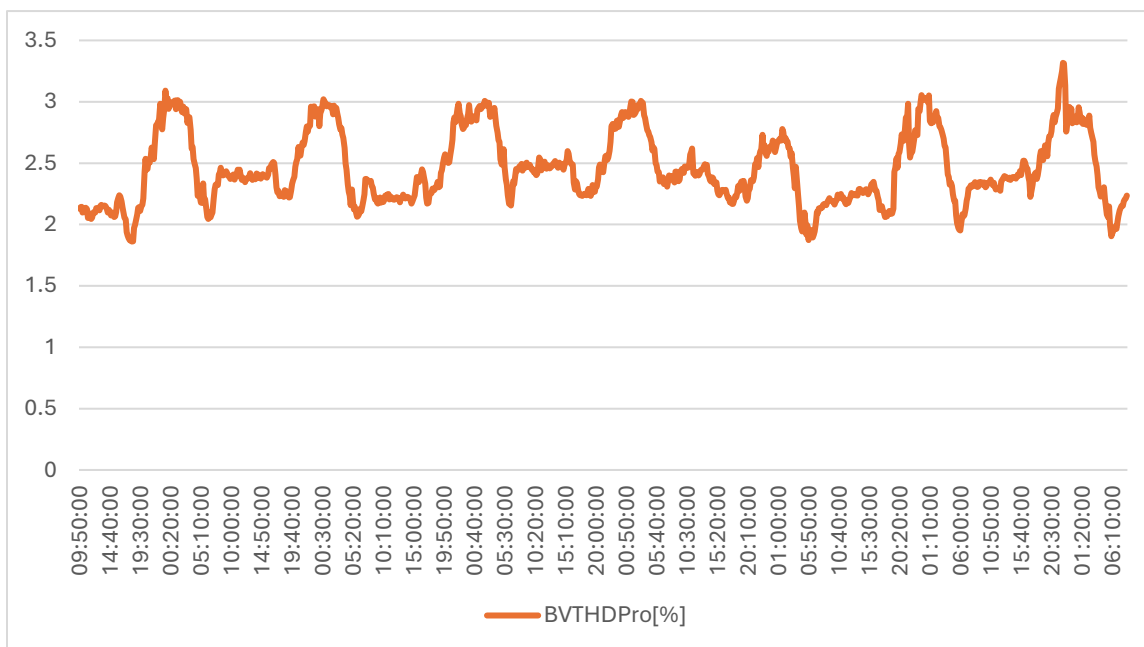
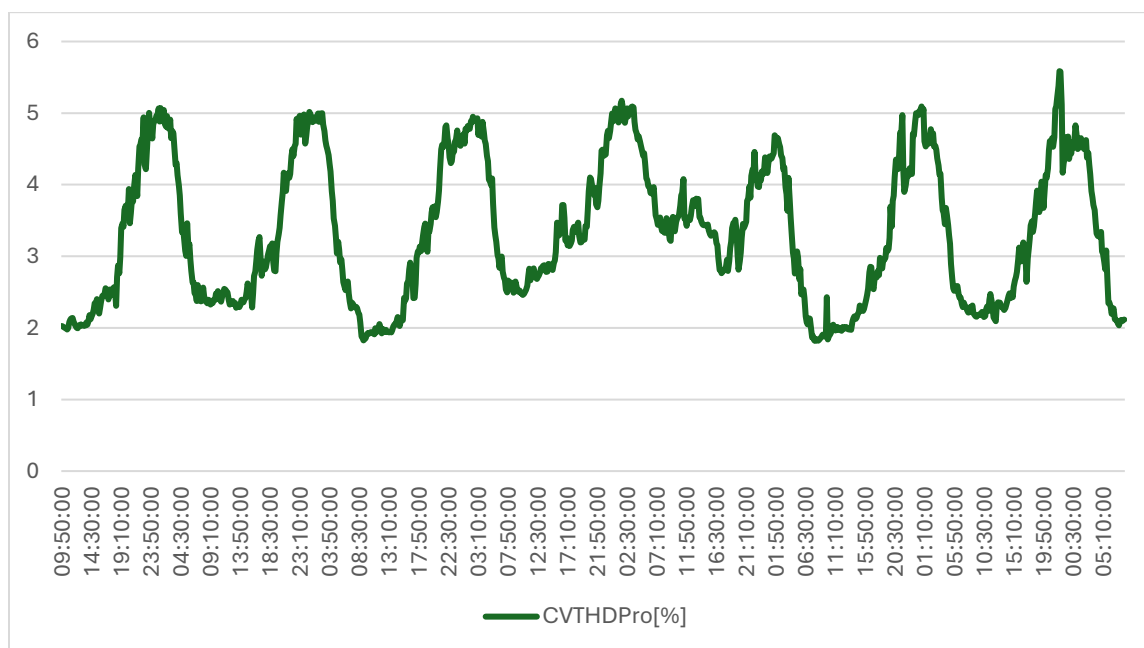


Figura 72

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje

**Figura 73**

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje



Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en cada una de las fases

Figura 74

Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

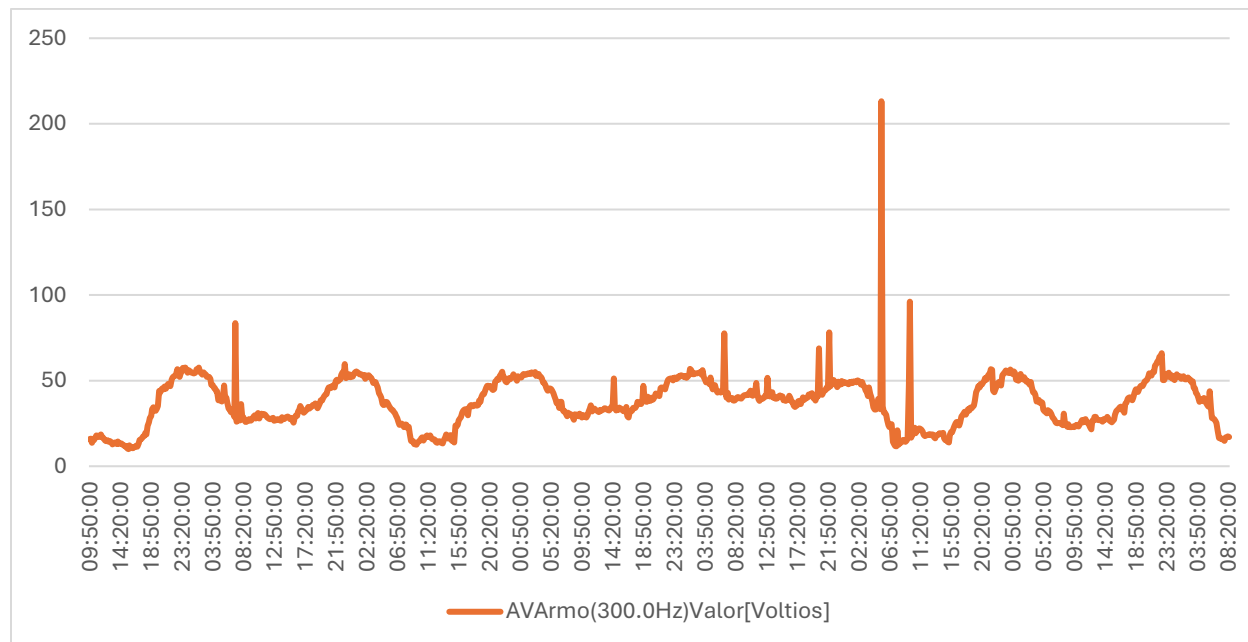


Figura 75

Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

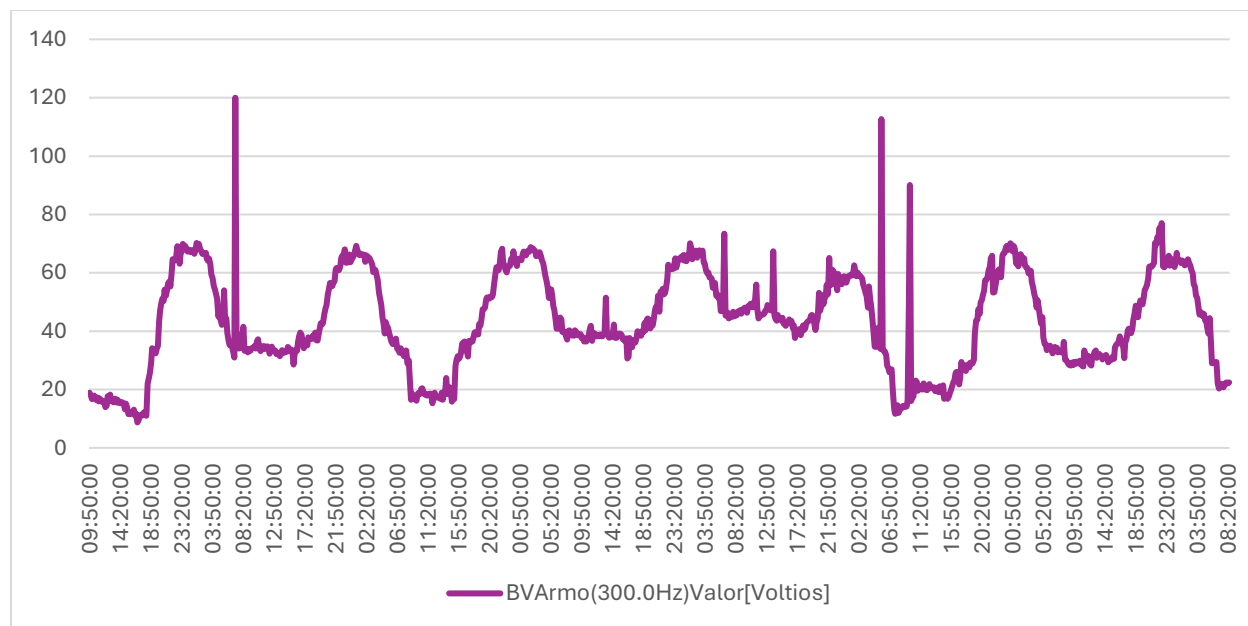


Figura 76

Tendencia de la quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios

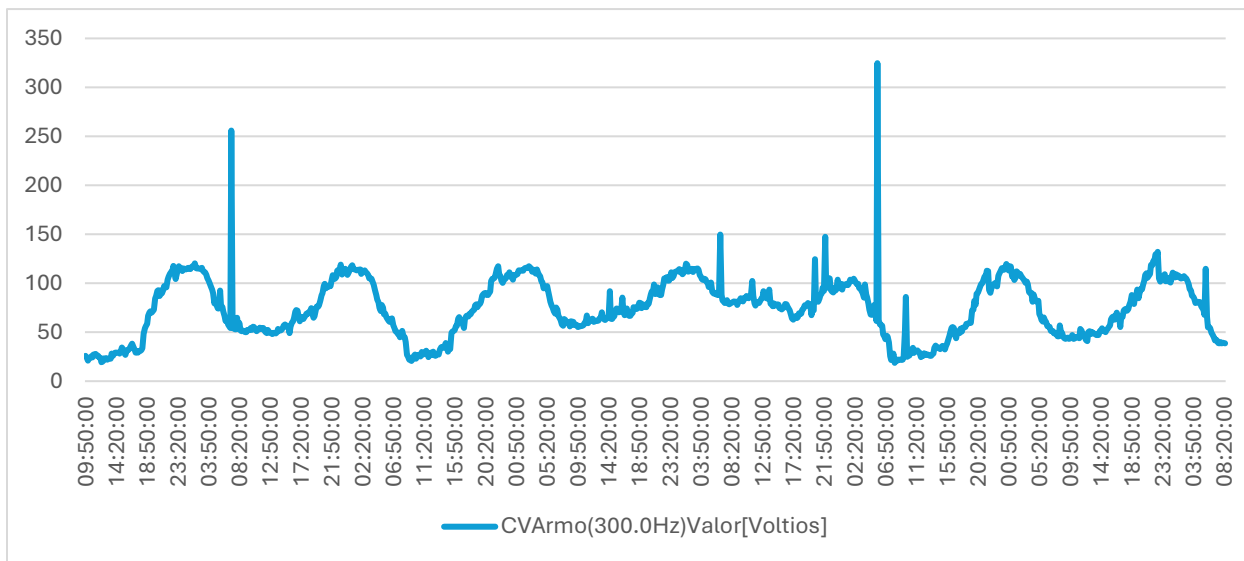


Figura 77

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

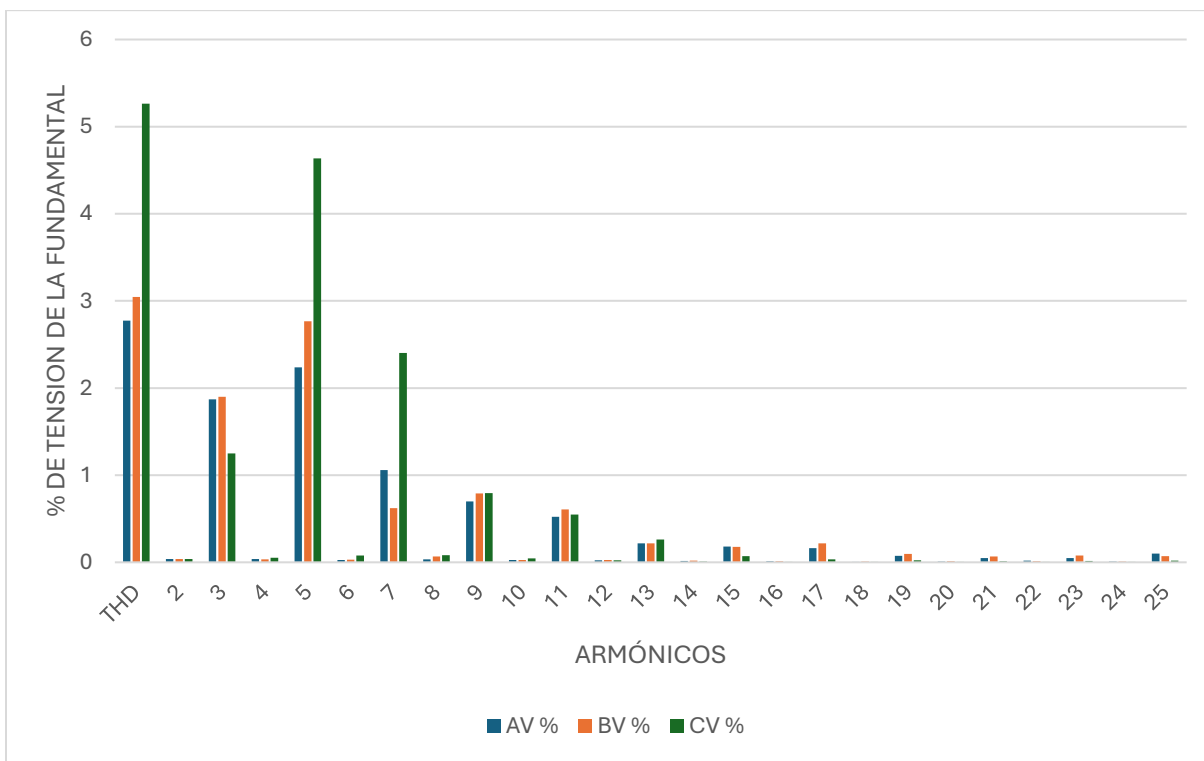


Tabla 26

Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	AV %	BV %	CV %	Armónicos de tensión					
				SIGET	IEEE 519-2022	IEEE 519-1992			
THD	2.772	3.047	5.263	8%	Pasa	5%	No pasa	5%	No pasa
2	0.036	0.037	0.038	2%	Pasa		Pasa		Pasa
3	1.869	1.9	1.251	5%	Pasa		Pasa		Pasa
4	0.037	0.034	0.053	1%	Pasa		Pasa		Pasa
5	2.239	2.765	4.637	6%	Pasa		No pasa		No pasa
6	0.027	0.03	0.079	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
7	1.058	0.621	2.402	5%	Pasa		Pasa		Pasa
8	0.033	0.066	0.083	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
9	0.7	0.791	0.793	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
10	0.027	0.028	0.044	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
11	0.521	0.608	0.55	3.50%	Pasa		Pasa		Pasa
12	0.022	0.027	0.022	0.20%	Pasa	3%	Pasa	3%	Pasa
13	0.216	0.216	0.263	3%	Pasa		Pasa		Pasa
14	0.016	0.019	0.007	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
15	0.18	0.177	0.071	0.30%	Pasa		Pasa		Pasa
16	0.012	0.011	0.006	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
17	0.163	0.216	0.033	2%	Pasa		Pasa		Pasa
18	0.006	0.008	0.006	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
19	0.074	0.098	0.023	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
20	0.009	0.011	0.006	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
21	0.049	0.068	0.011	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
22	0.02	0.012	0.006	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
23	0.047	0.079	0.014	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
24	0.009	0.009	0.006	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
25	0.101	0.072	0.019	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa

PUNTO 5: Plaza libertad

Figura 78

Ubicación correspondiente a transformador de distribución en Plaza Libertad



Coordenada: 13°41'50"N 89°11'21"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 27

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	1φ
Tensión nominal	240/120 V
Corriente nominal	500 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	7 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 79

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

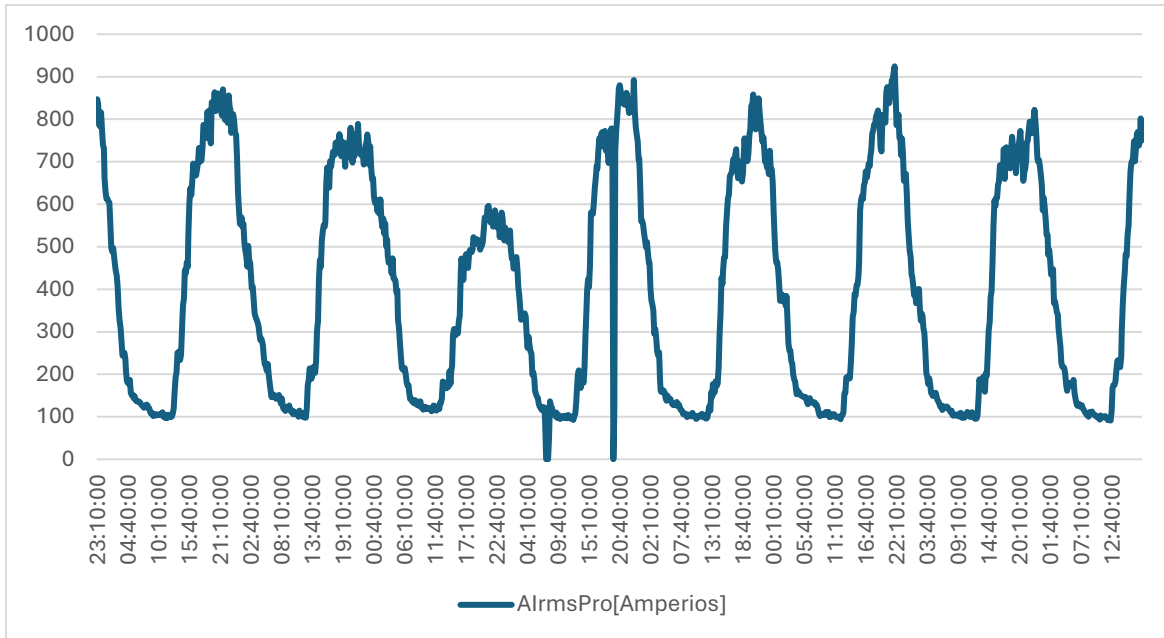


Figura 80

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

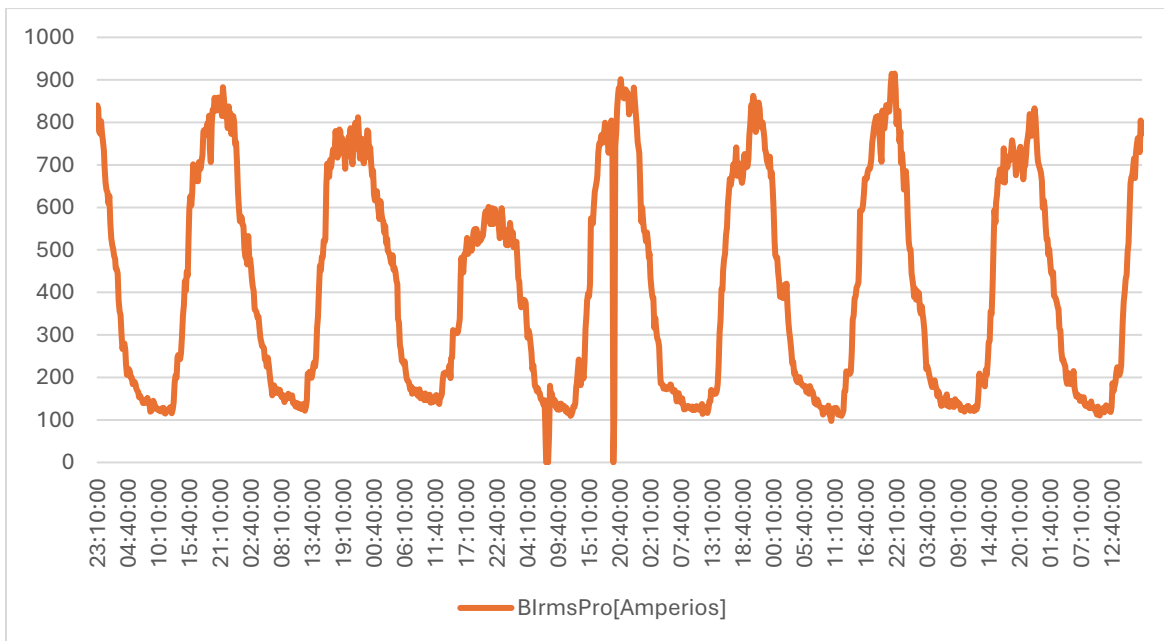
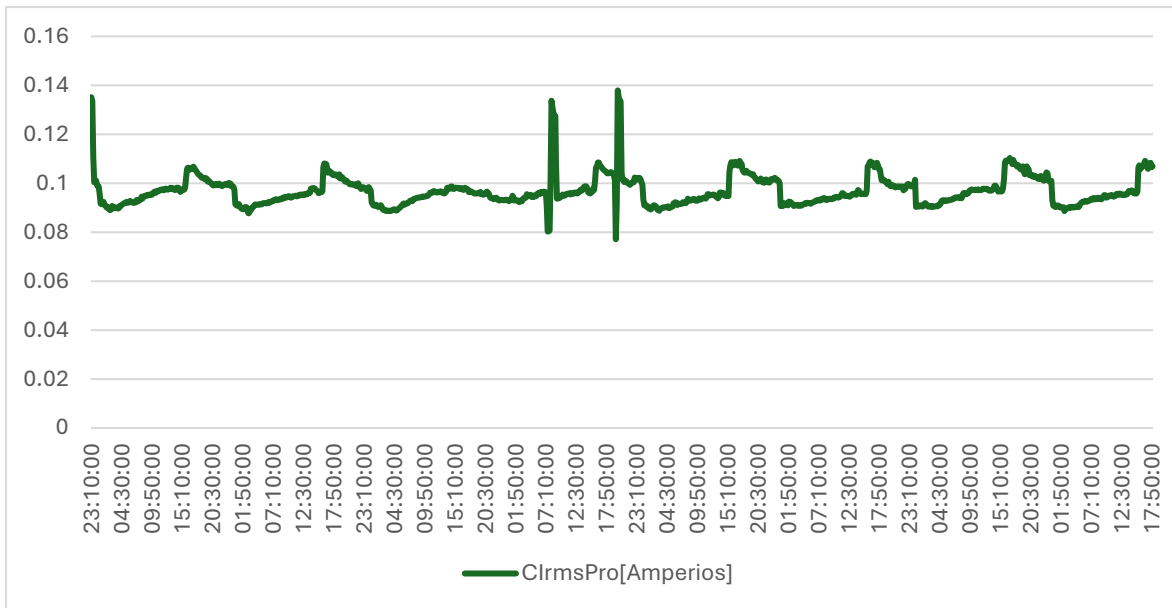


Figura 81

Intensidad de corriente que circula por el conductor "Neutro" en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 82

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en Voltios

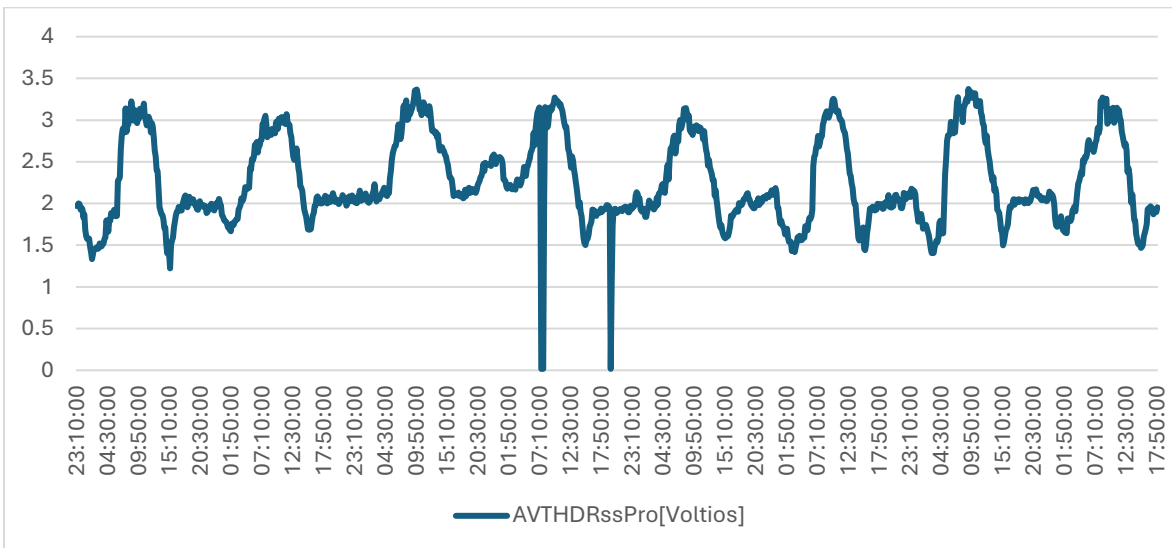
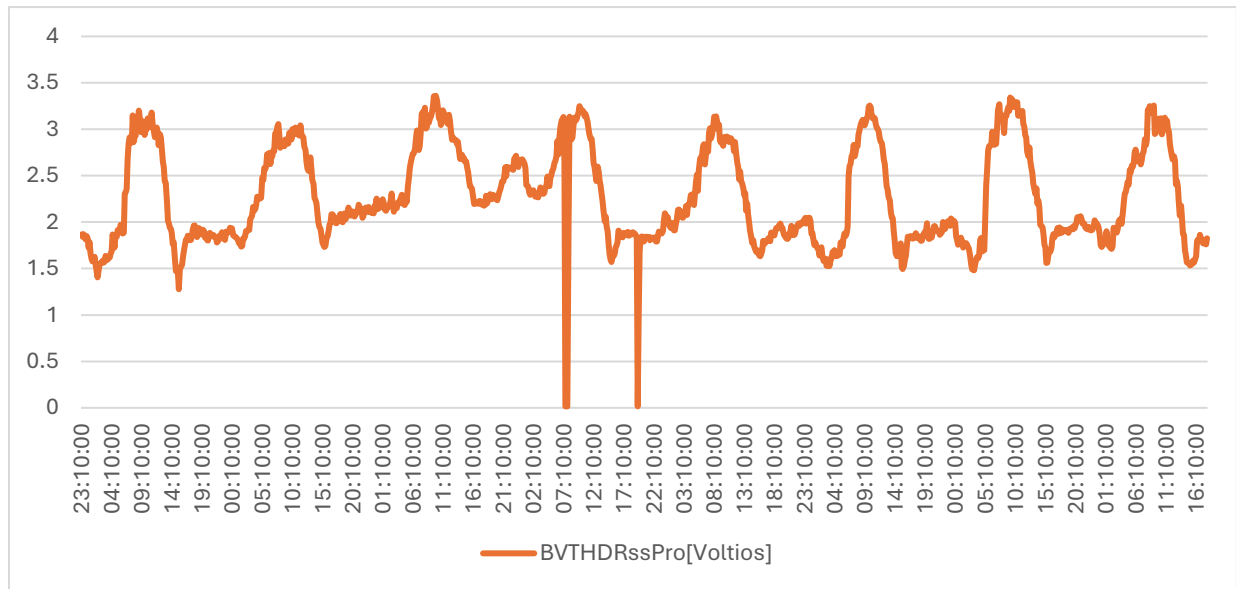
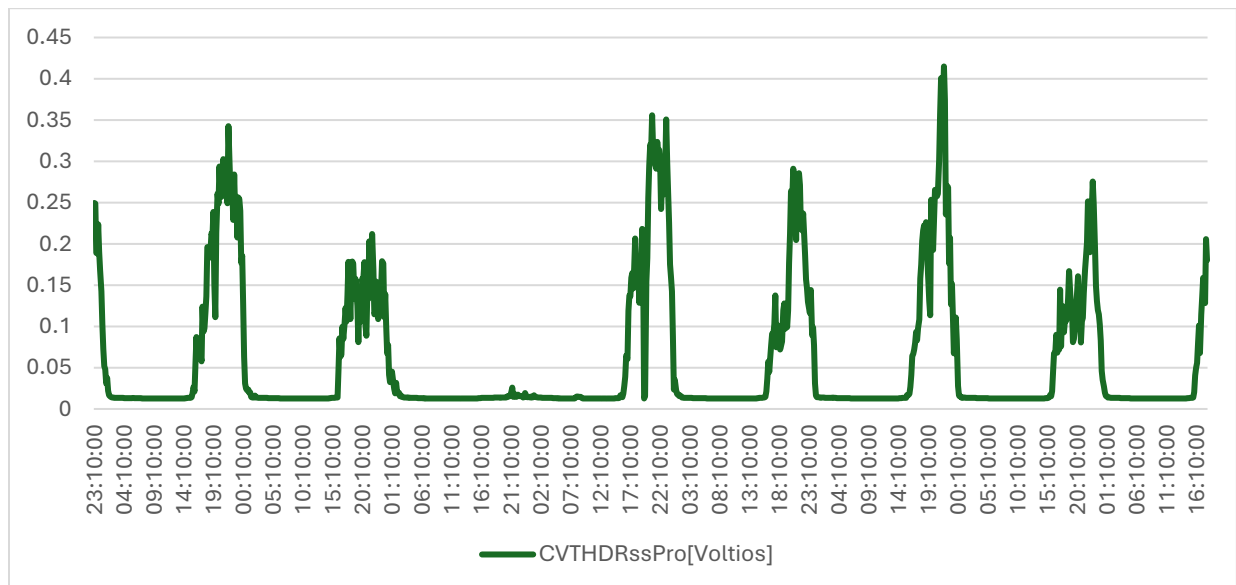


Figura 83

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en Voltios

**Figura 84**

Tendencia del THD de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios



Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión

Figura 85

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

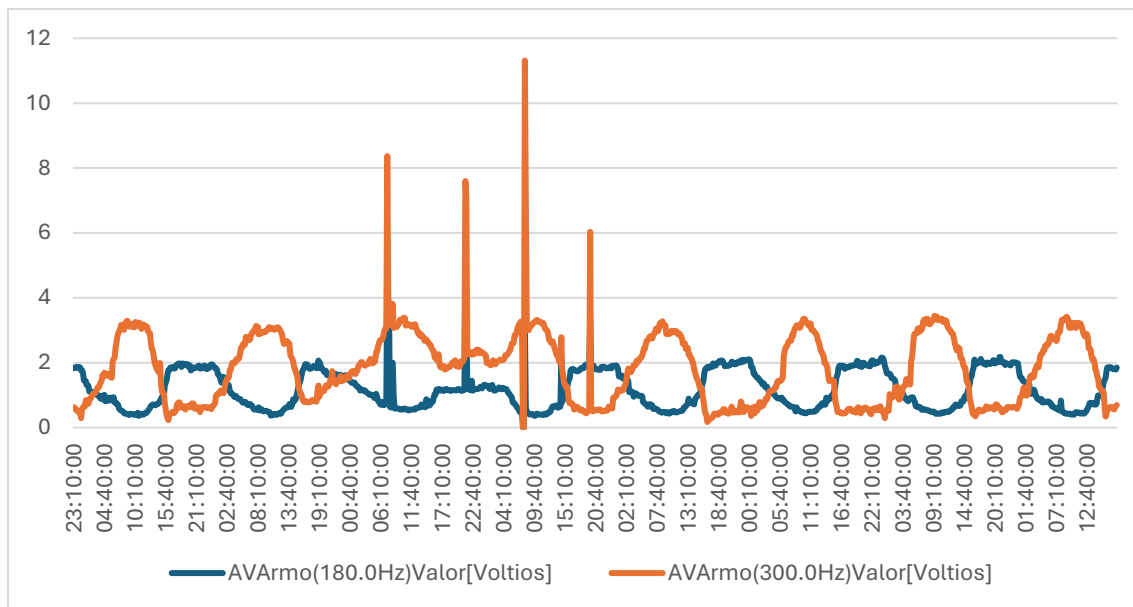


Figura 86

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

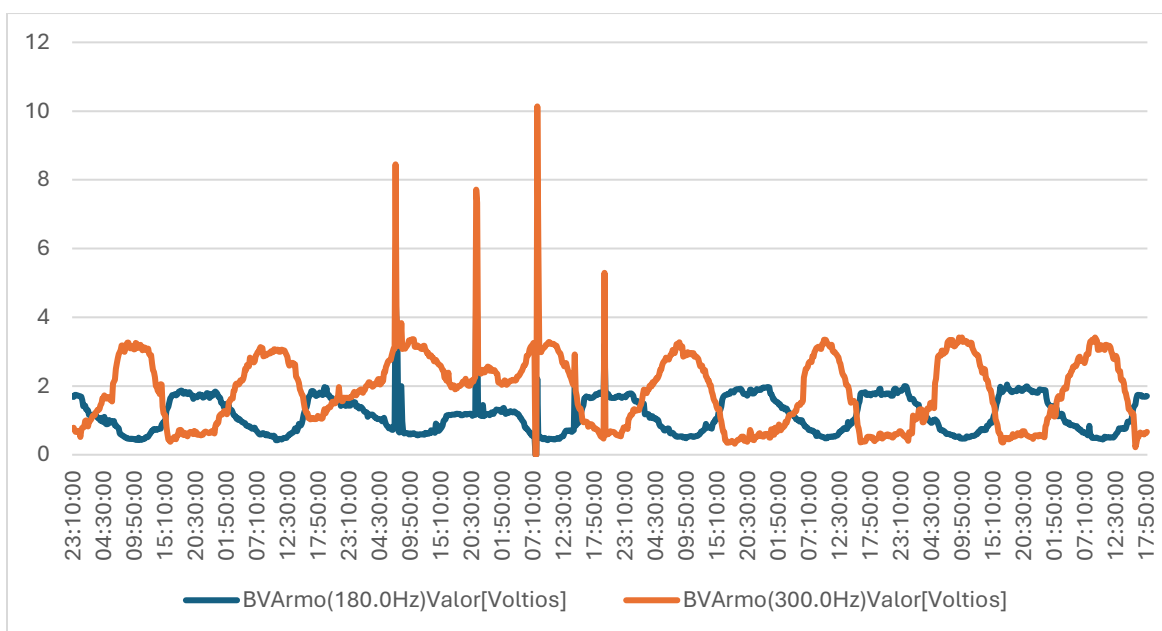


Figura 87

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en el conductor "Neutro" en Voltios

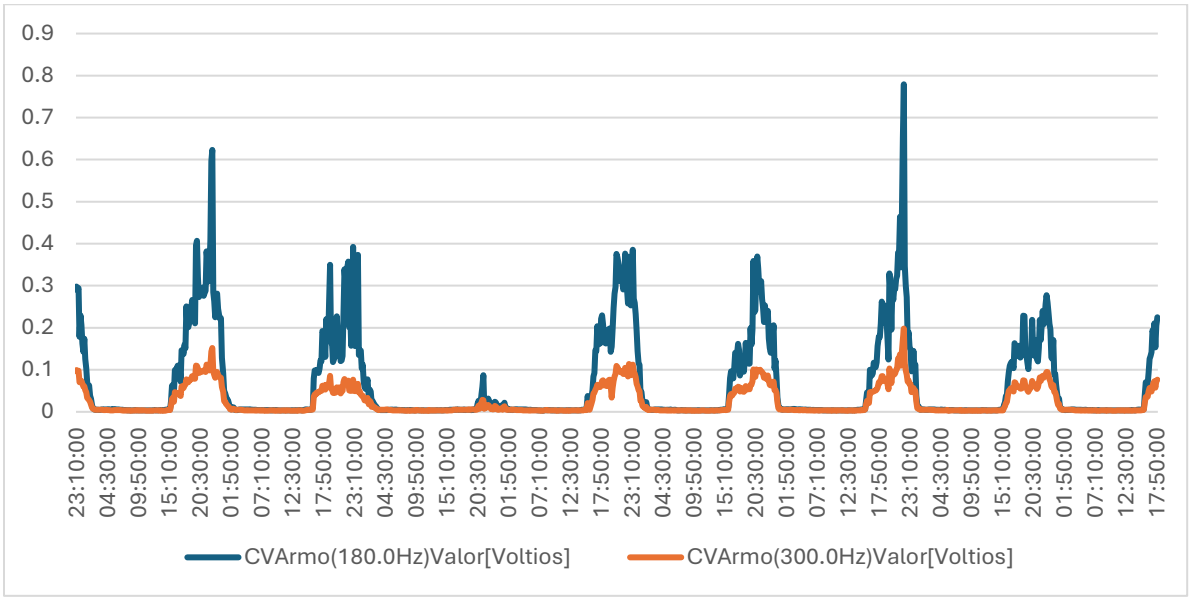


Figura 88

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

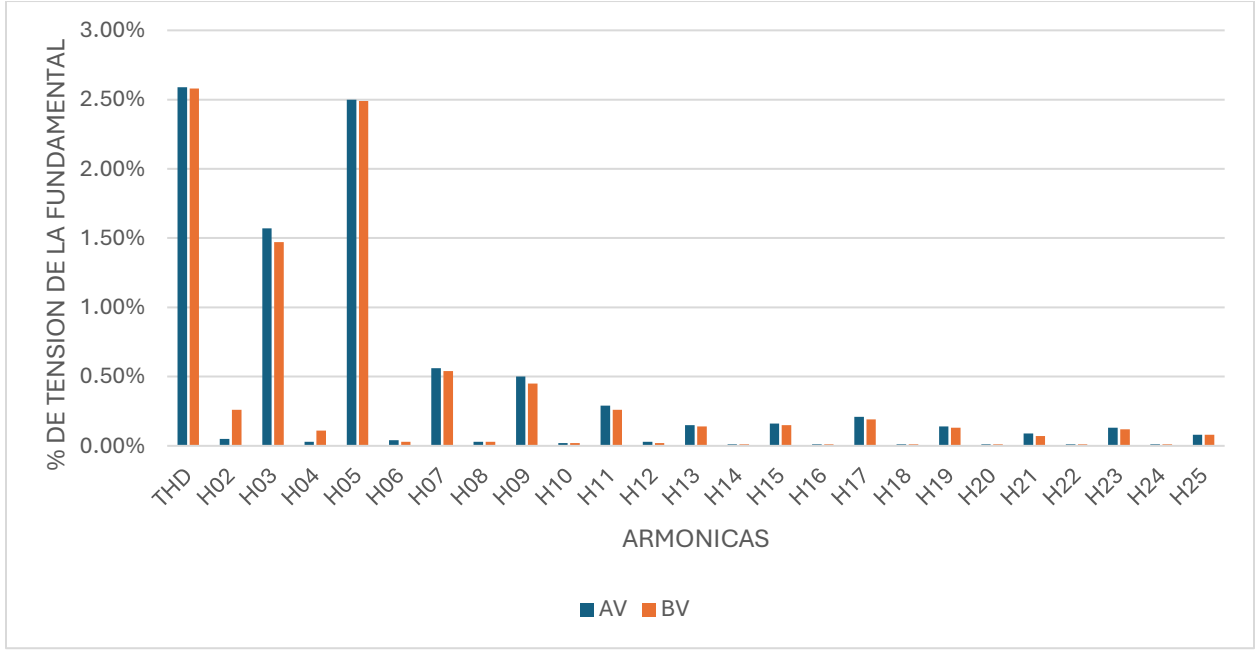


Tabla 28

Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	AV	BV	Armónicos de tensión					
			SIGET		IEEE 519-2022		IEEE 519-1992	
THD	2.59%	2.58%	8%	Pasa	8%	Pasa	5%	Pasa
H02	0.05%	0.26%	2%	Pasa		Pasa		Pasa
H03	1.57%	1.47%	5%	Pasa		Pasa		Pasa
H04	0.03%	0.11%	1%	Pasa		Pasa		Pasa
H05	2.50%	2.49%	6%	Pasa		Pasa		Pasa
H06	0.04%	0.03%	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H07	0.56%	0.54%	5%	Pasa		Pasa		Pasa
H08	0.03%	0.03%	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H09	0.50%	0.45%	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H10	0.02%	0.02%	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H11	0.29%	0.26%	3.50%	Pasa	5%	Pasa	3%	Pasa
H12	0.03%	0.02%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H13	0.15%	0.14%	3%	Pasa		Pasa		Pasa
H14	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H15	0.16%	0.15%	0.30%	Pasa		Pasa		Pasa
H16	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H17	0.21%	0.19%	2%	Pasa		Pasa		Pasa
H18	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H19	0.14%	0.13%	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H20	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H21	0.09%	0.07%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H22	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H23	0.13%	0.12%	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
H24	0.01%	0.01%	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
H25	0.08%	0.08%	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa

PUNTO 6: Biblioteca Nacional de El Salvador (BINAES)**Figura 89**

Ubicación correspondiente a la Biblioteca Nacional de El Salvador



Coordenada: 13°41'49"N 89°11'29"W

Nota: Imagen tomada de (*Google Earth*, 2025)

Tabla 29

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	3φ en estrella
Tensión nominal	14400
Corriente nominal	100 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	7 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada una de las fases

Figura 90

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

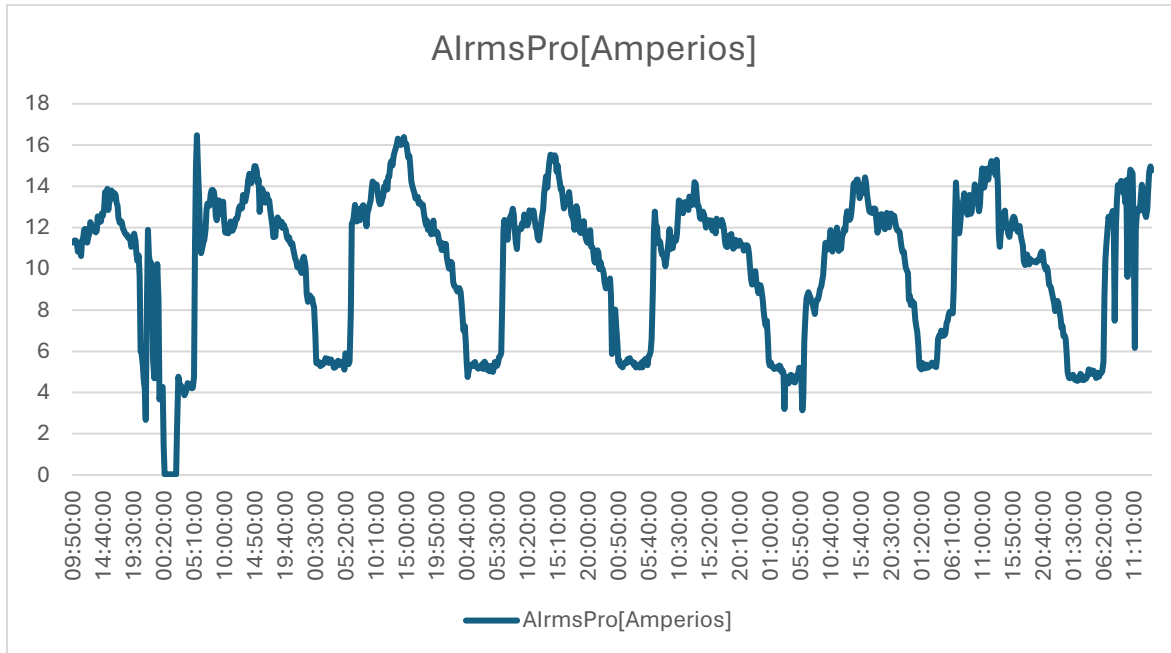


Figura 91

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

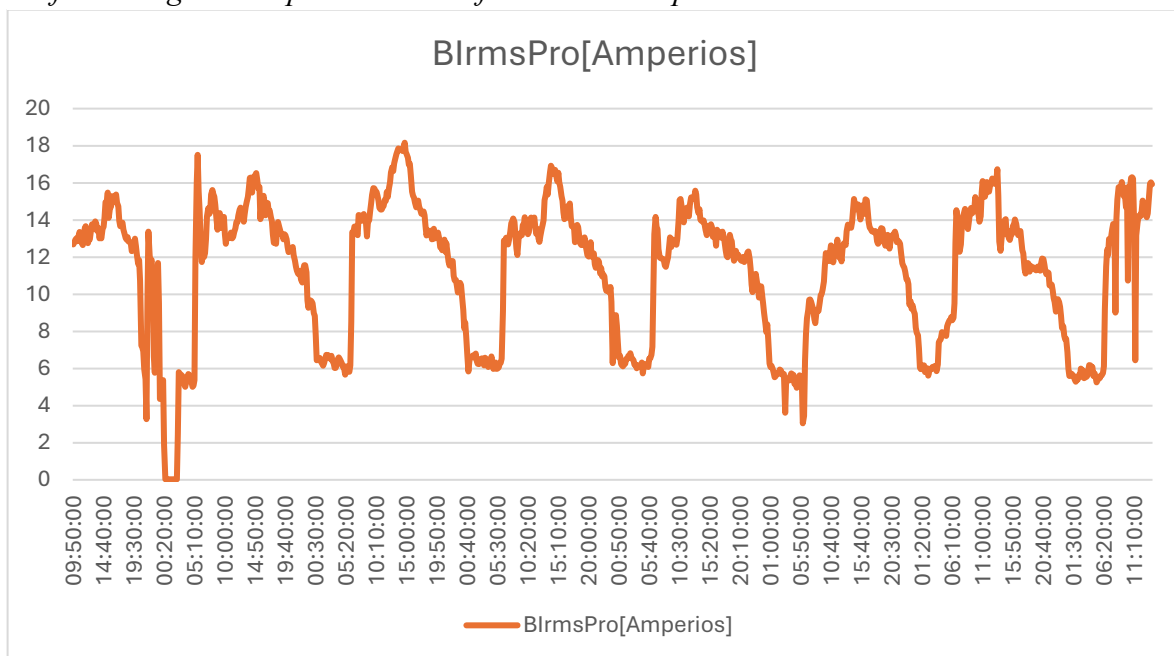
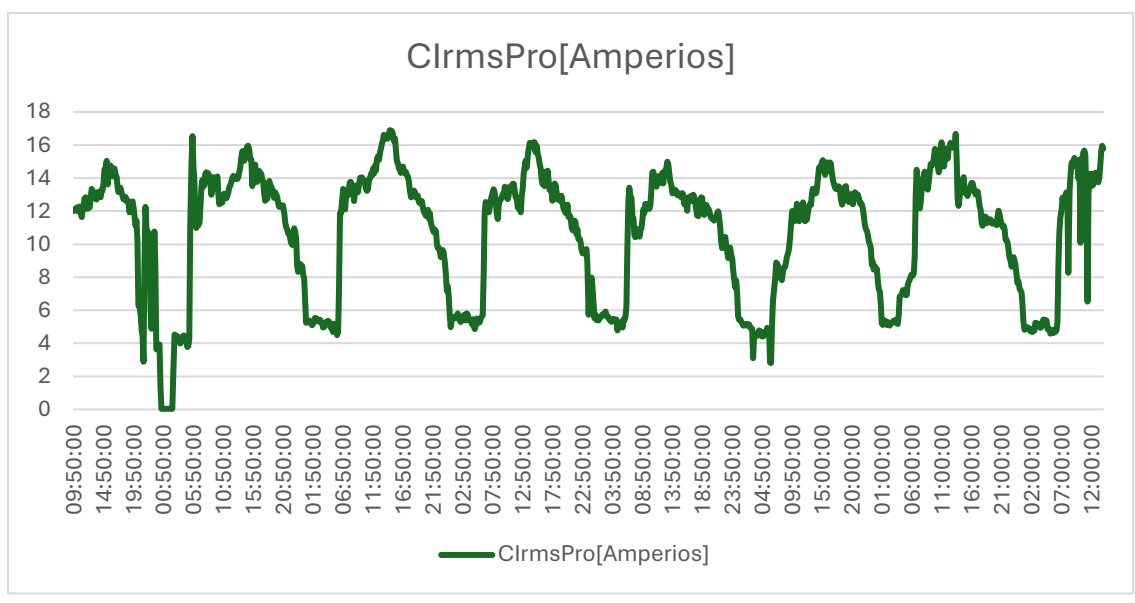


Figura 92

Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 93

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje

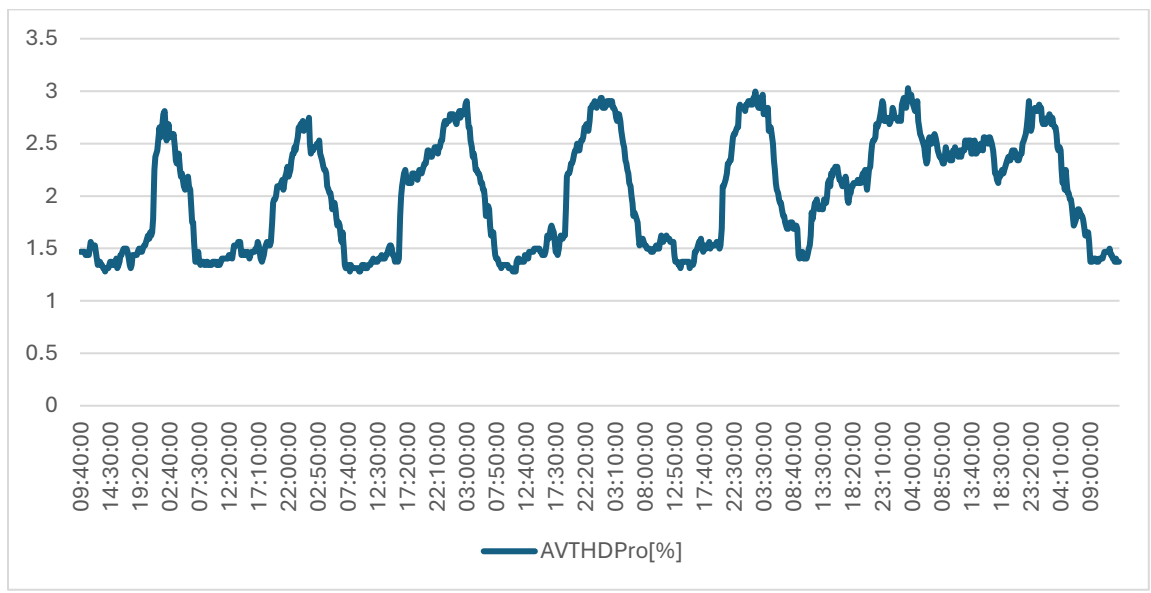
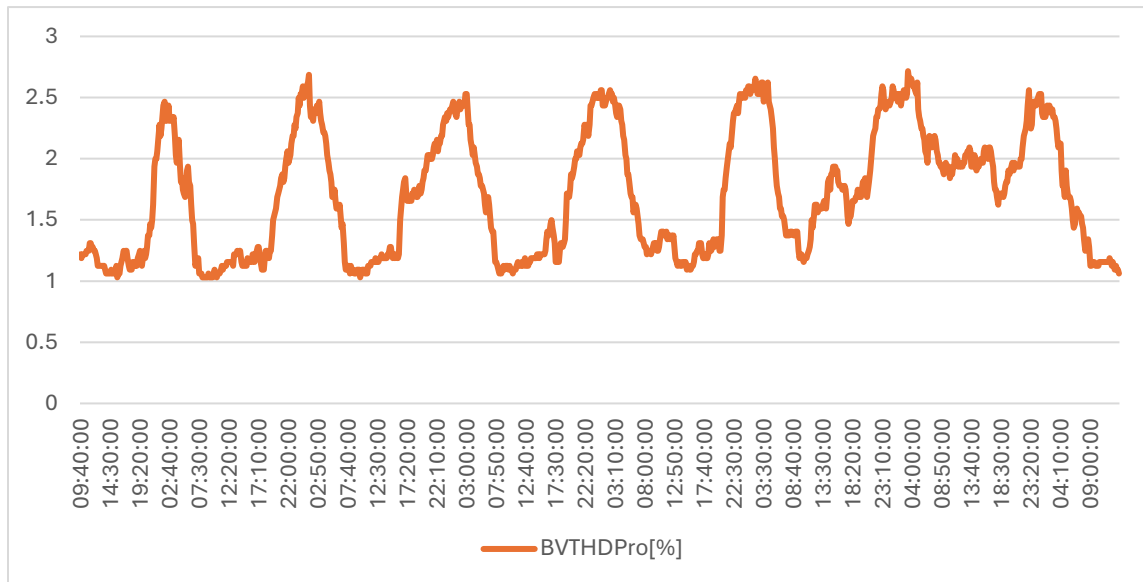
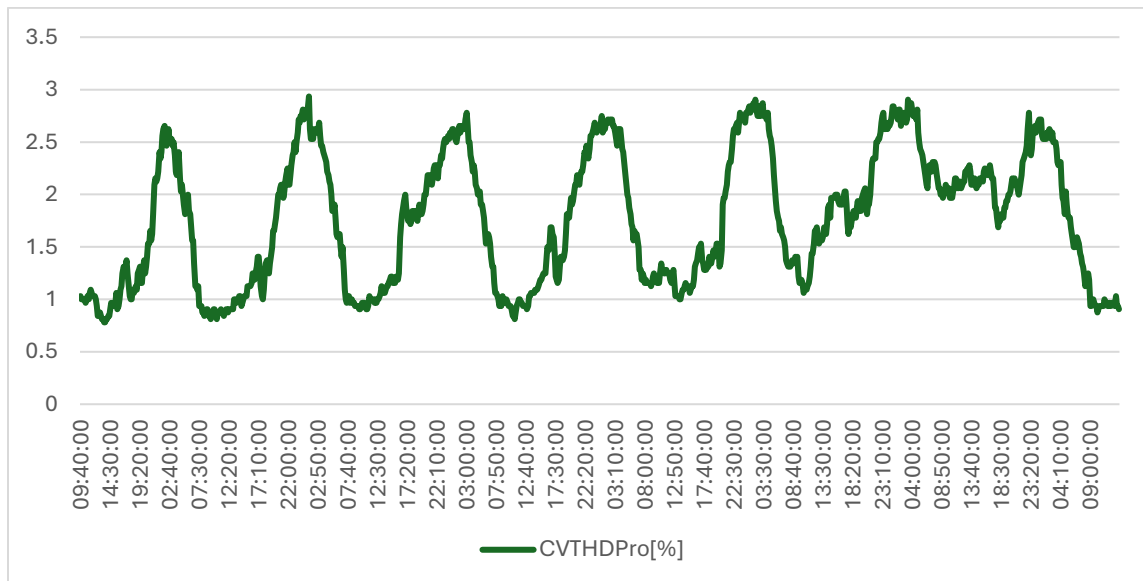


Figura 94

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje

**Figura 95**

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje



Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión

Figura 96

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

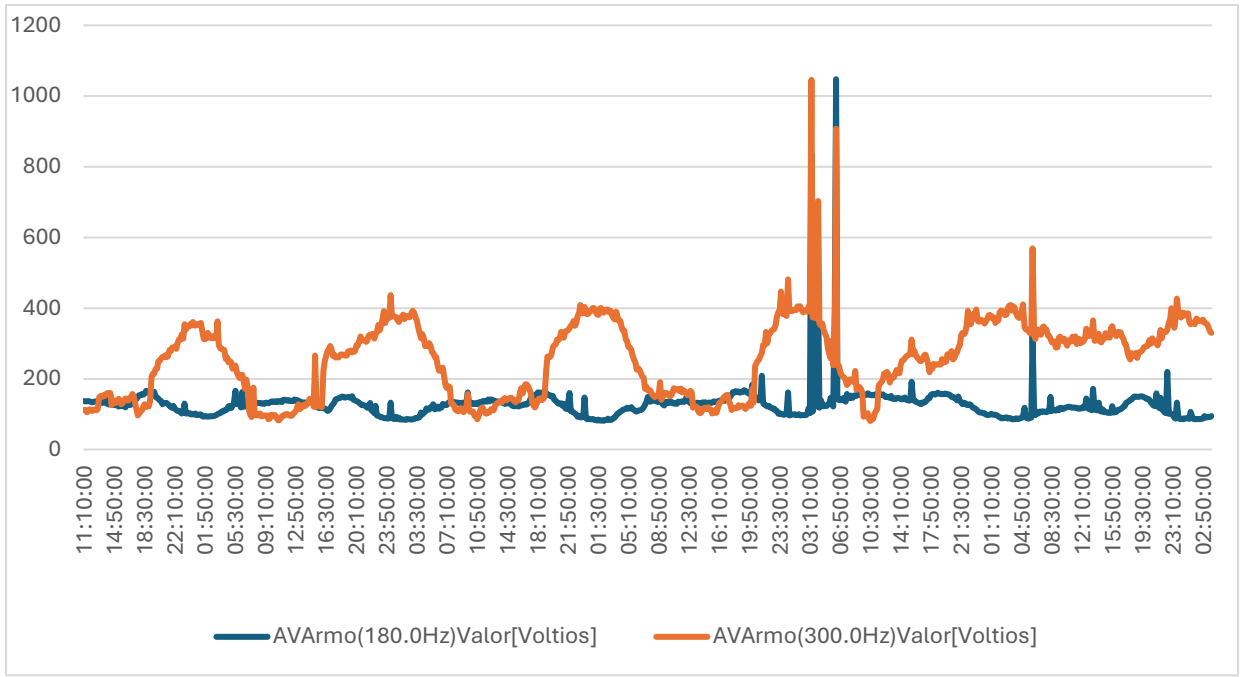


Figura 97

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

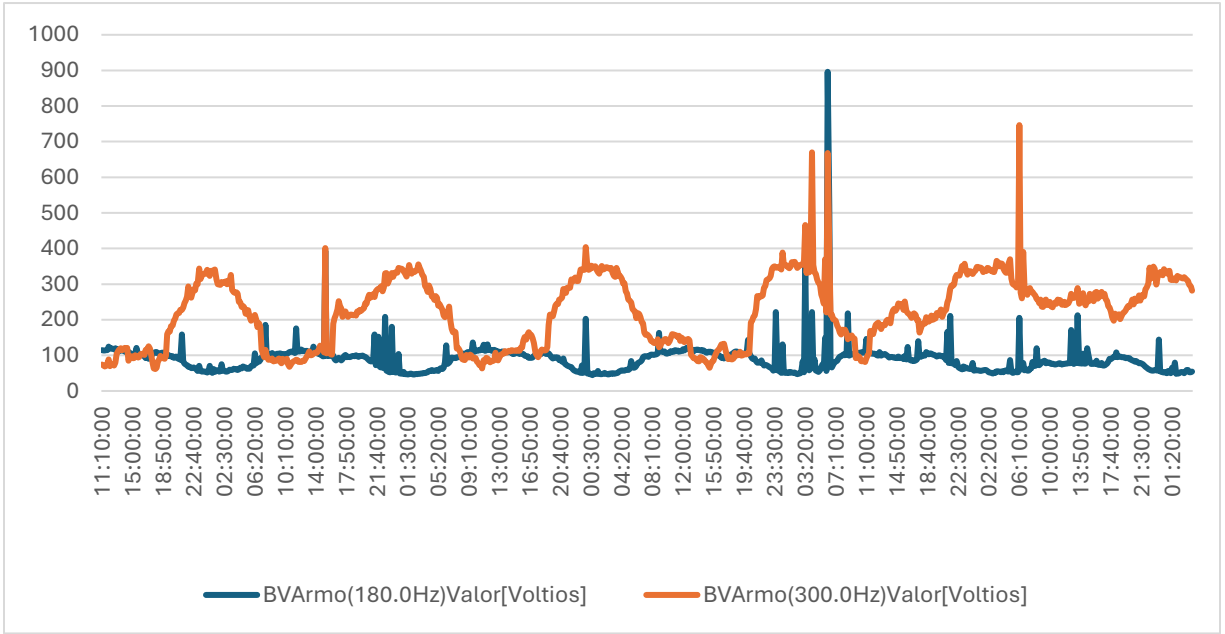


Figura 98

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios

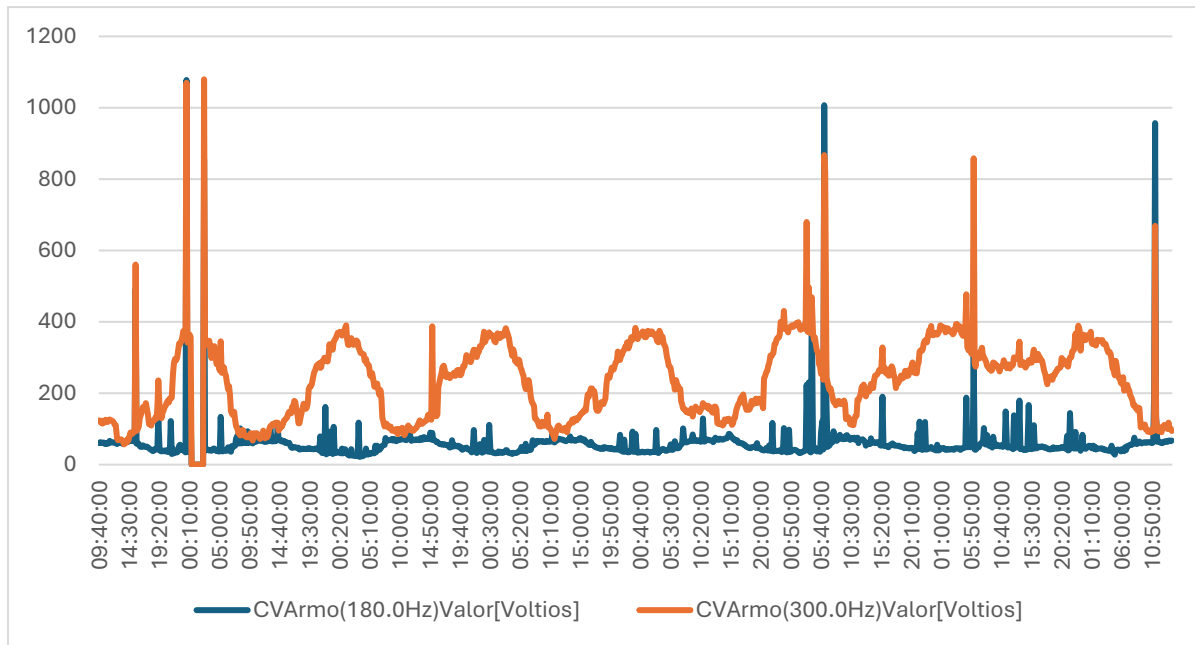


Figura 99

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

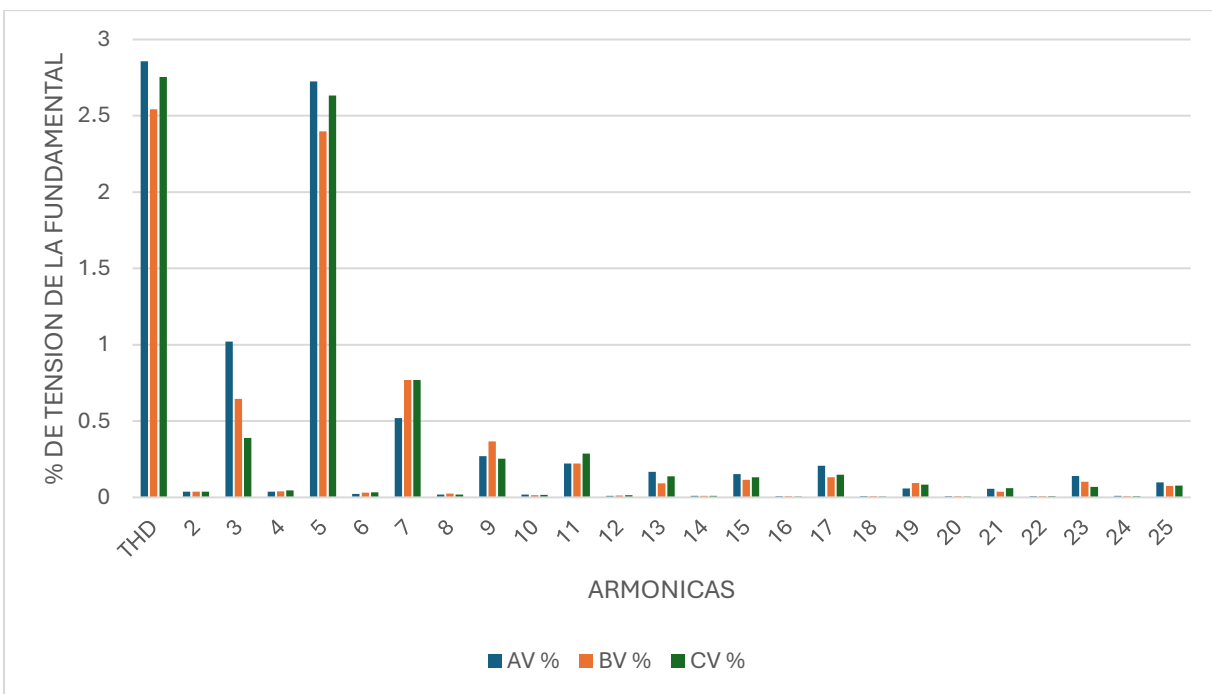


Tabla 30

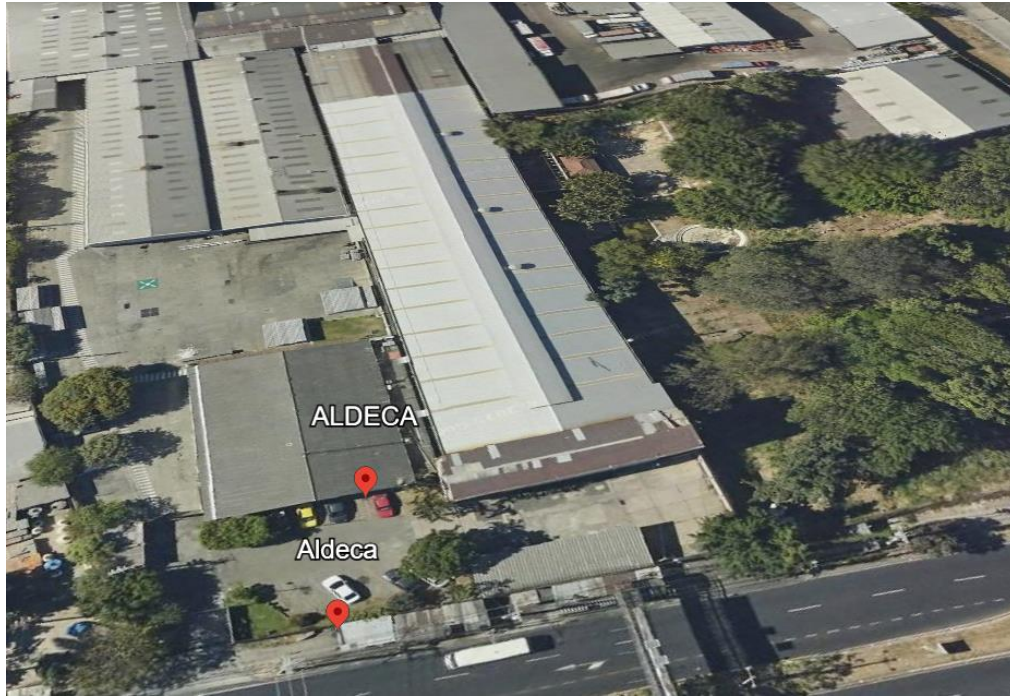
Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	AV %	BV %	Armónicos de tensión			IEEE 519-2022	IEEE 519-1992		
			CV %	SIGET					
THD	2.857	2.542	2.754	8%	Pasa	5%	Pasa	5%	Pasa
2	0.038	0.038	0.037	2%	Pasa		Pasa		Pasa
3	1.02	0.645	0.389	5%	Pasa		Pasa		Pasa
4	0.037	0.04	0.046	1%	Pasa		Pasa		Pasa
5	2.726	2.399	2.632	6%	Pasa		Pasa		Pasa
6	0.023	0.031	0.034	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
7	0.519	0.77	0.77	5%	Pasa		Pasa		Pasa
8	0.018	0.025	0.018	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
9	0.27	0.366	0.253	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
10	0.018	0.015	0.016	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa
11	0.222	0.221	0.287	3.50%	Pasa	3%	Pasa	3%	Pasa
12	0.011	0.012	0.014	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
13	0.167	0.093	0.138	3%	Pasa		Pasa		Pasa
14	0.01	0.01	0.01	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
15	0.153	0.116	0.131	0.30%	Pasa		Pasa		Pasa
16	0.008	0.008	0.007	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
17	0.207	0.132	0.148	2%	Pasa		Pasa		Pasa
18	0.008	0.008	0.007	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
19	0.059	0.095	0.084	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
20	0.009	0.008	0.007	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
21	0.056	0.038	0.06	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
22	0.009	0.009	0.008	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
23	0.14	0.102	0.069	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa
24	0.01	0.009	0.009	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa
25	0.099	0.076	0.077	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa

PUNTO 7: Aluminio de Centro América S.A. de C.V.

Figura 100

Ubicación correspondiente a empresa ALDECA



Coordenada: 13°41'49"N 89°08'30"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 31

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	3φ En estrella
Tensión nominal	13200 V
Corriente nominal	20 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	15 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada fase

Figura 101

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

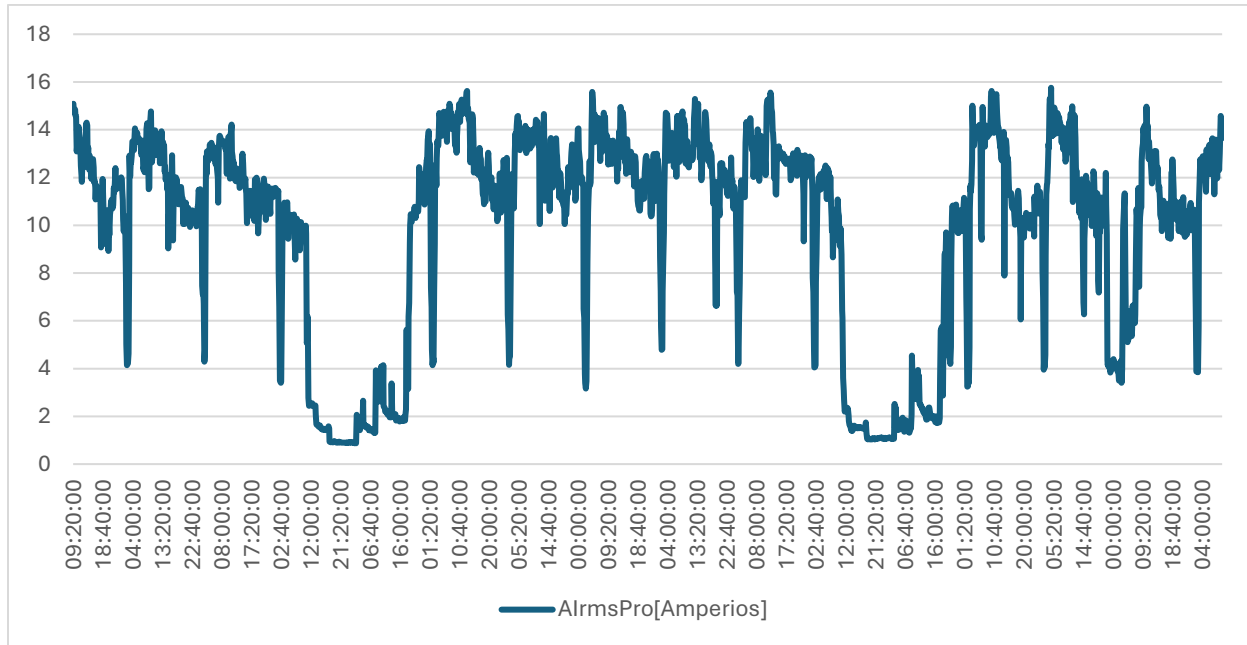


Figura 102

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

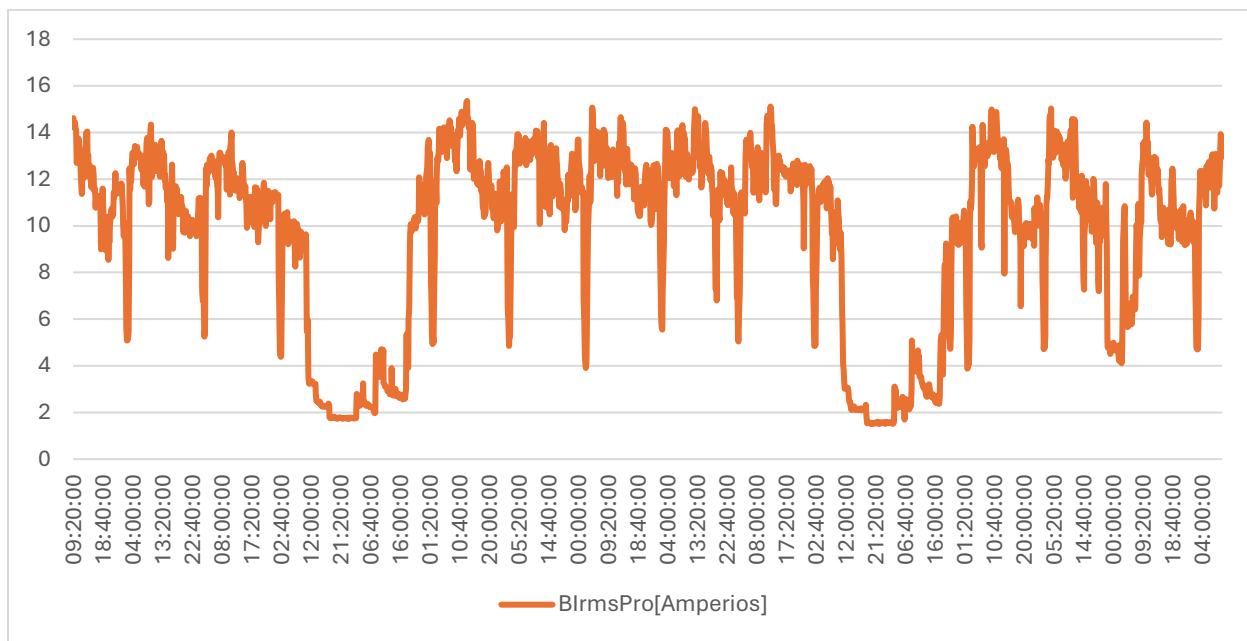
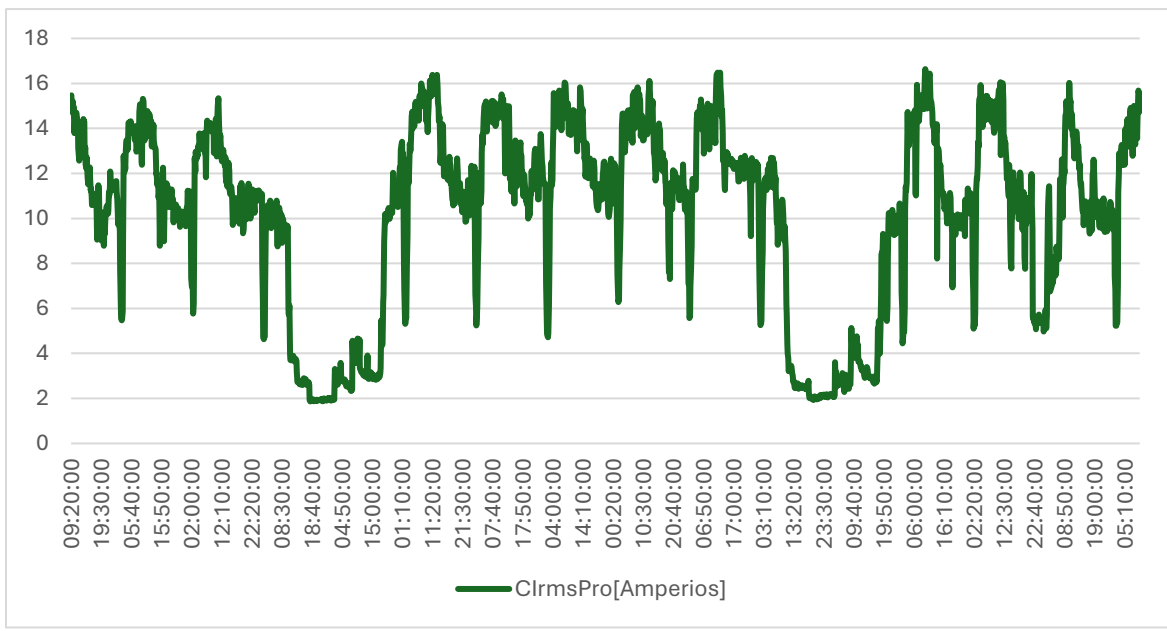


Figura 103

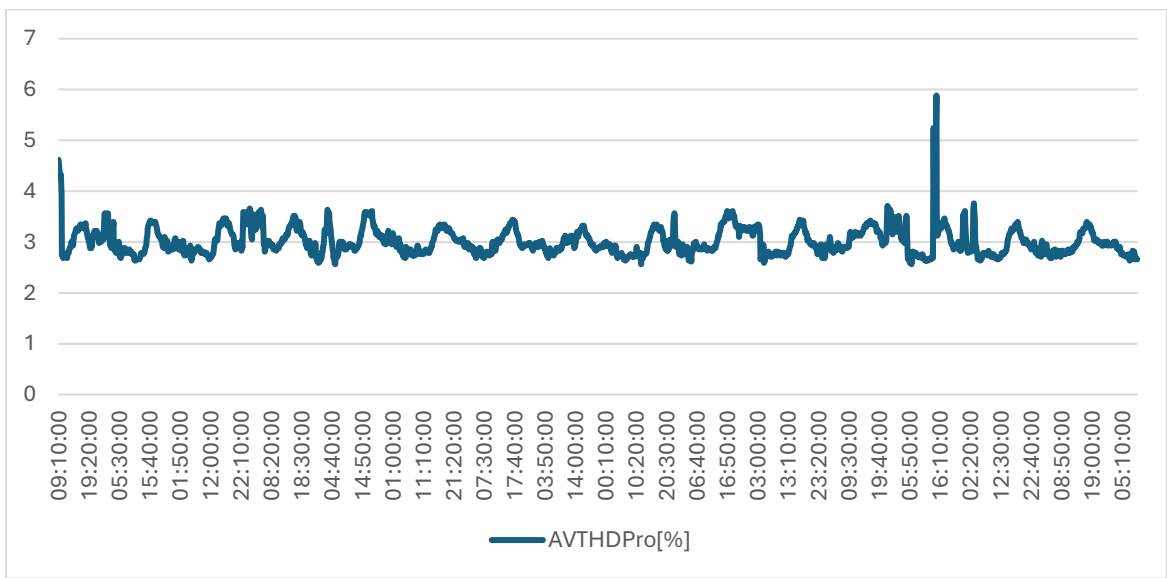
Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 104

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje



Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión

Figura 107

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "A" en

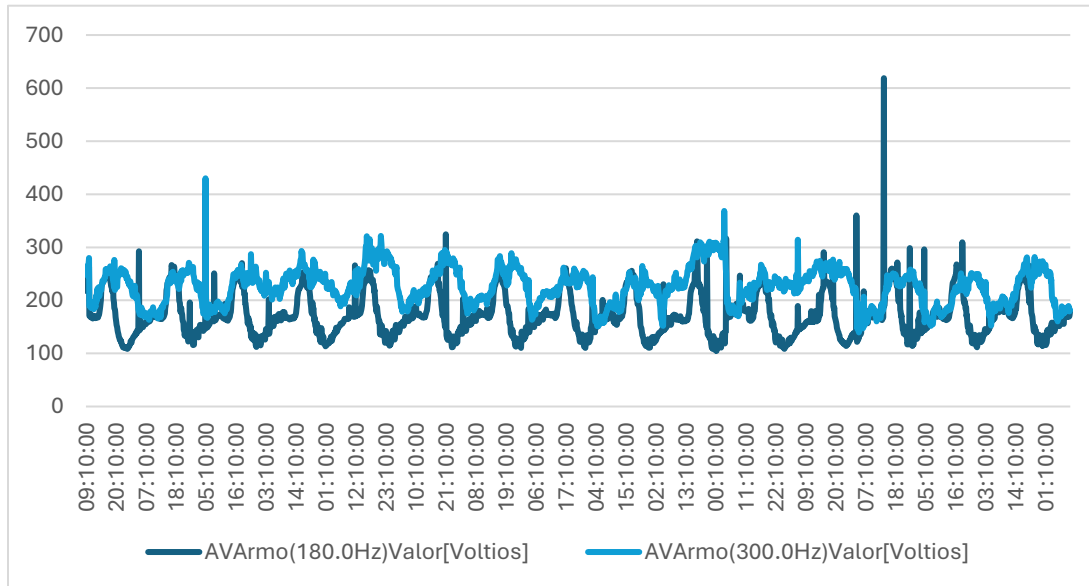


Figura 108

Tendencia de la tercera y quinta armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

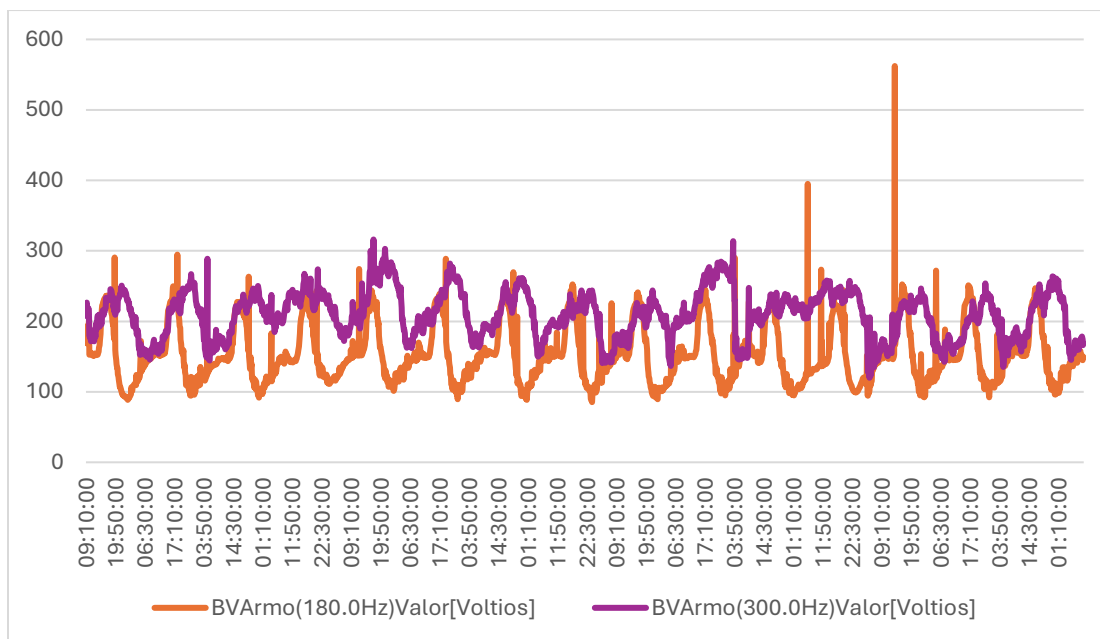


Figura 109

Tendencia de la tercera y la quinta armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios

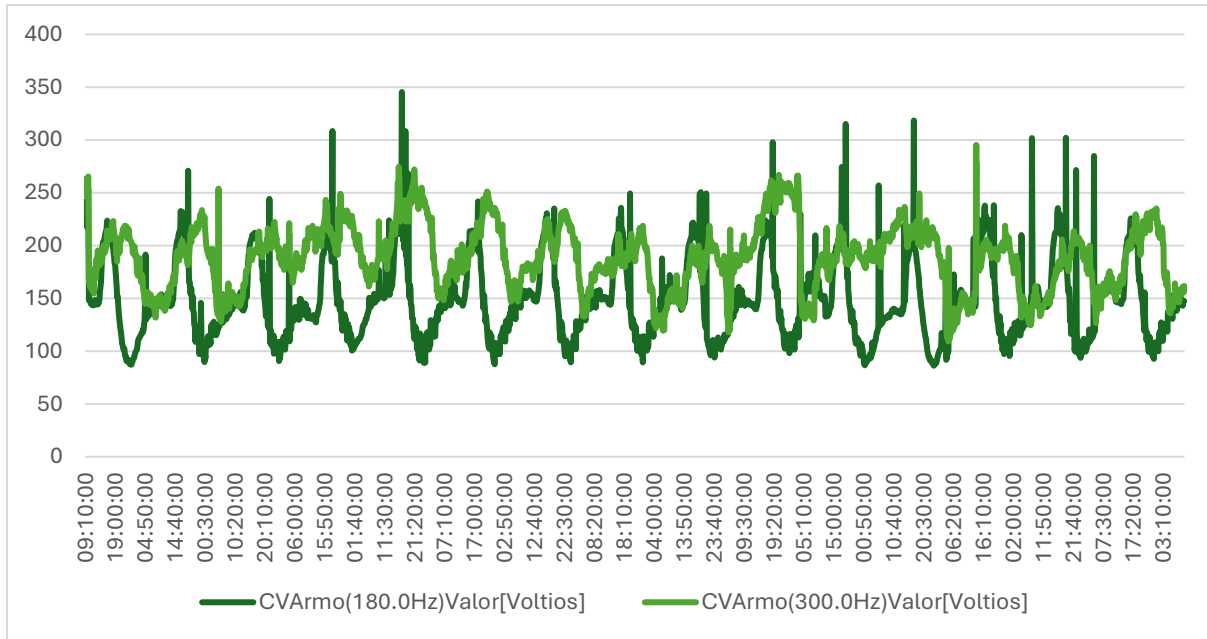


Figura 110

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

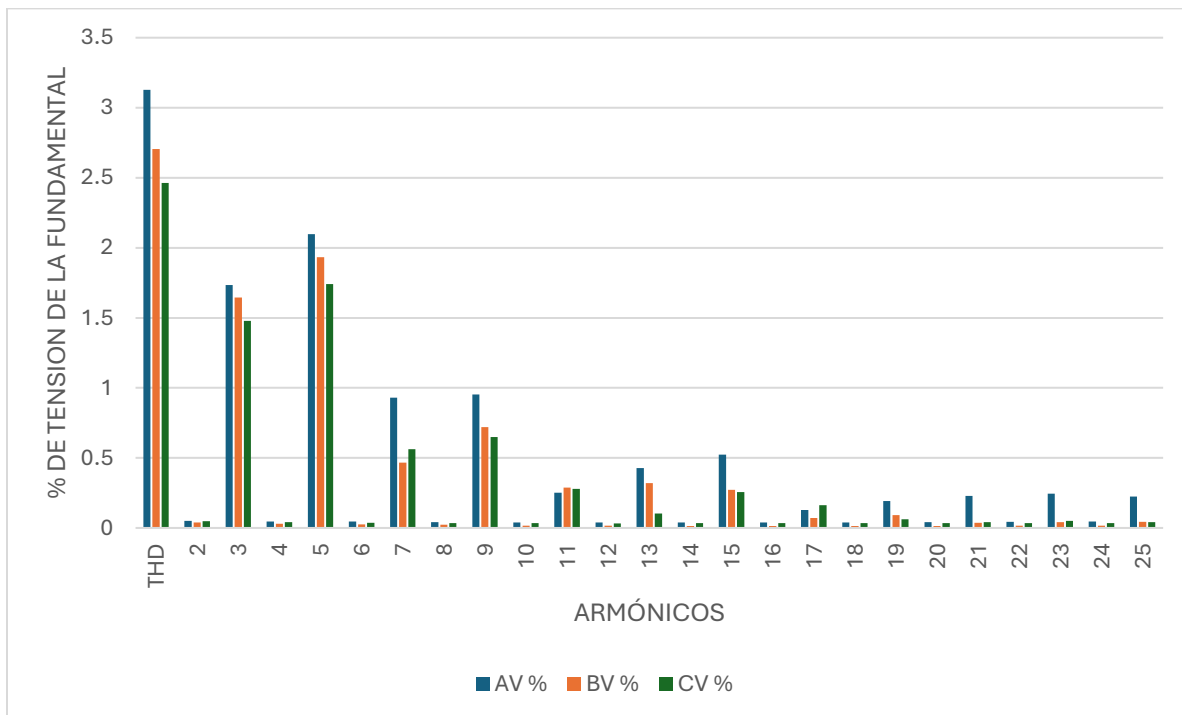


Tabla 32

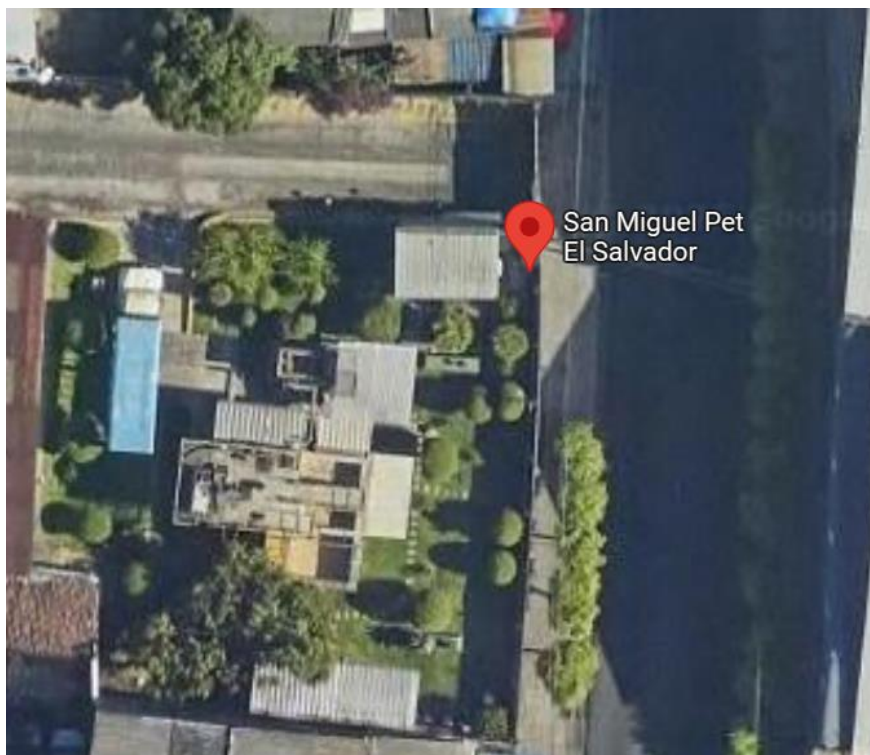
Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 correspondiente a los niveles de distorsión armónica de tensión permitidos

ARM.	AV %	BV %	Armónicos de tensión			SIGET	IEEE 519-2022		IEEE 519-1992	
			CV %							
THD	3.128	2.705	2.463	8%	Pasa	5%	Pasa	5%	Pasa	
2	0.051	0.04	0.048	2%	Pasa		Pasa		Pasa	
3	1.734	1.645	1.479	5%	Pasa		Pasa		Pasa	
4	0.045	0.029	0.041	1%	Pasa		Pasa		Pasa	
5	2.098	1.932	1.741	6%	Pasa		Pasa		Pasa	
6	0.045	0.025	0.036	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
7	0.93	0.467	0.562	5%	Pasa		Pasa		Pasa	
8	0.042	0.024	0.034	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
9	0.953	0.721	0.65	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
10	0.038	0.016	0.034	0.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
11	0.252	0.287	0.279	3.50%	Pasa	3%	Pasa	3%	Pasa	
12	0.038	0.016	0.033	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
13	0.427	0.319	0.102	3%	Pasa		Pasa		Pasa	
14	0.039	0.015	0.034	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
15	0.524	0.271	0.255	0.30%	Pasa		Pasa		Pasa	
16	0.038	0.015	0.034	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
17	0.128	0.072	0.162	2%	Pasa		Pasa		Pasa	
18	0.039	0.015	0.034	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
19	0.191	0.092	0.063	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
20	0.042	0.015	0.034	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
21	0.229	0.037	0.041	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
22	0.044	0.016	0.035	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
23	0.245	0.042	0.051	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa	
24	0.046	0.017	0.035	0.20%	Pasa		Pasa		Pasa	
25	0.223	0.043	0.041	1.50%	Pasa		Pasa		Pasa	

PUNTO 8: San Miguel Industrias PET S.A. de C.V.

Figura 111

Ubicación correspondiente a compañía SMI PET



COORDENADA: 13°42'45"N 89°11'18"W

Nota: Imagen tomada de (Google Earth, 2025)

Tabla 33

Resumen de datos de la configuración del punto de medición

Datos de configuración	
Topología de medición	4Hilos/3φ En estrella
Tensión nominal	23000V
Corriente nominal	25.6 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Duración de medición	7 días

Perfil de carga del punto de medición correspondiente a cada fase y neutro

Figura 112

Perfil de carga correspondiente a la fase "A" en Amperios

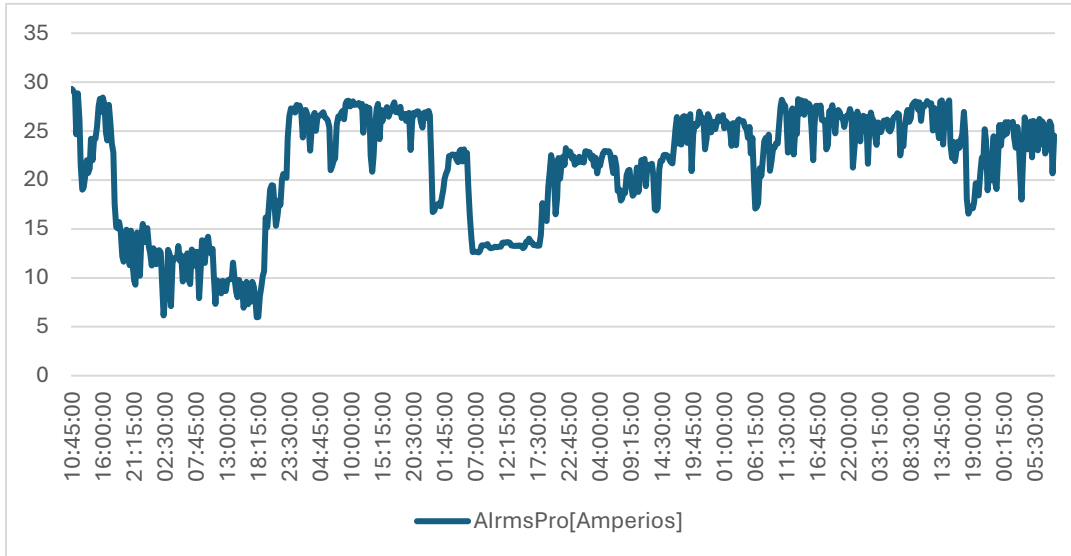


Figura 113

Perfil de carga correspondiente a la fase "B" en Amperios

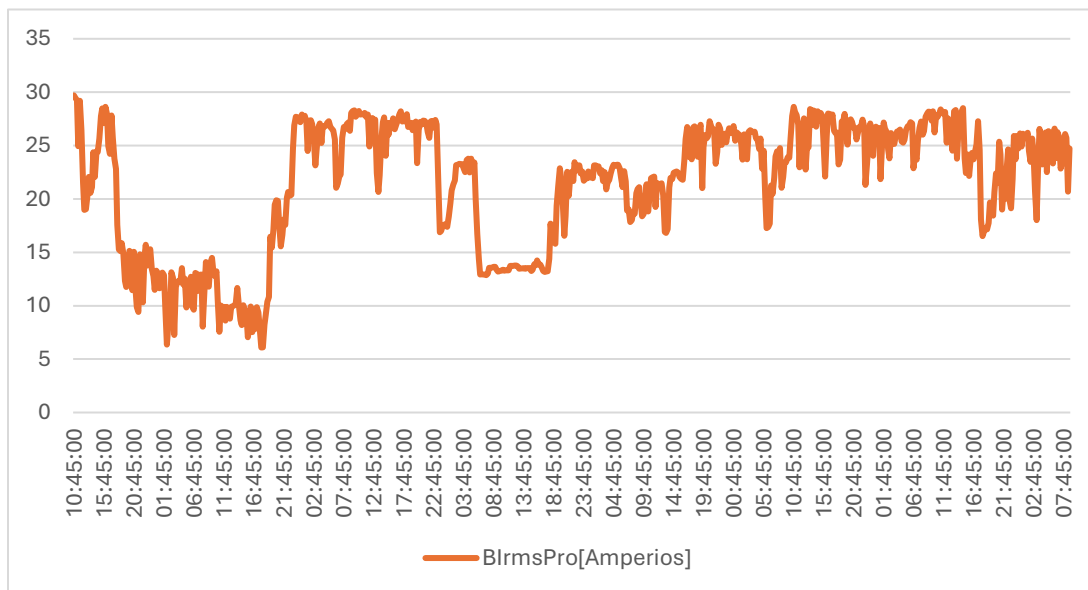
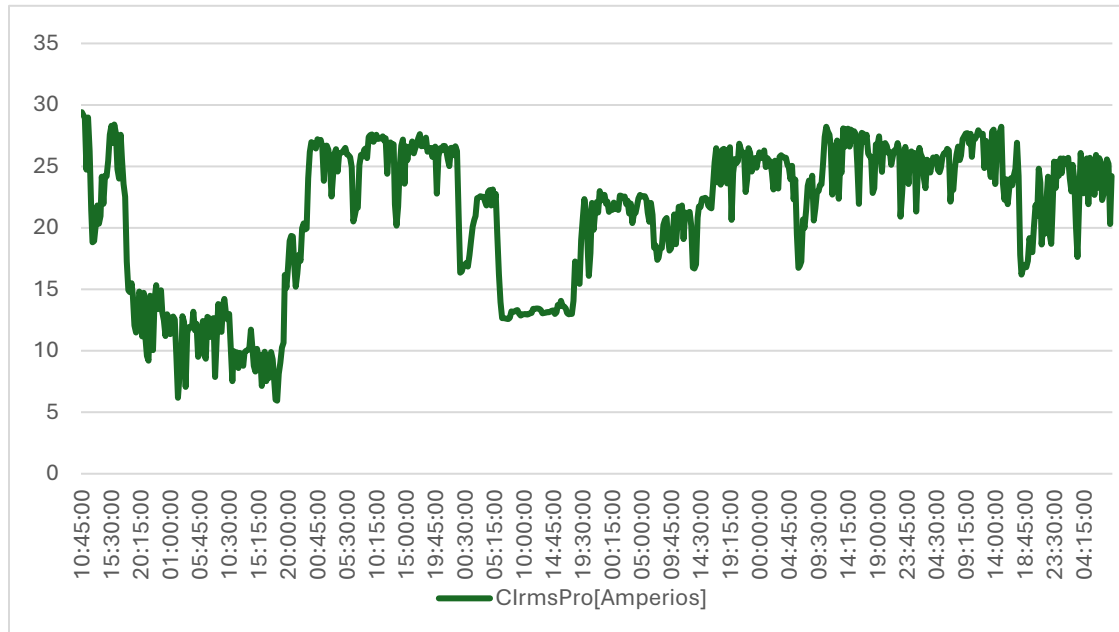
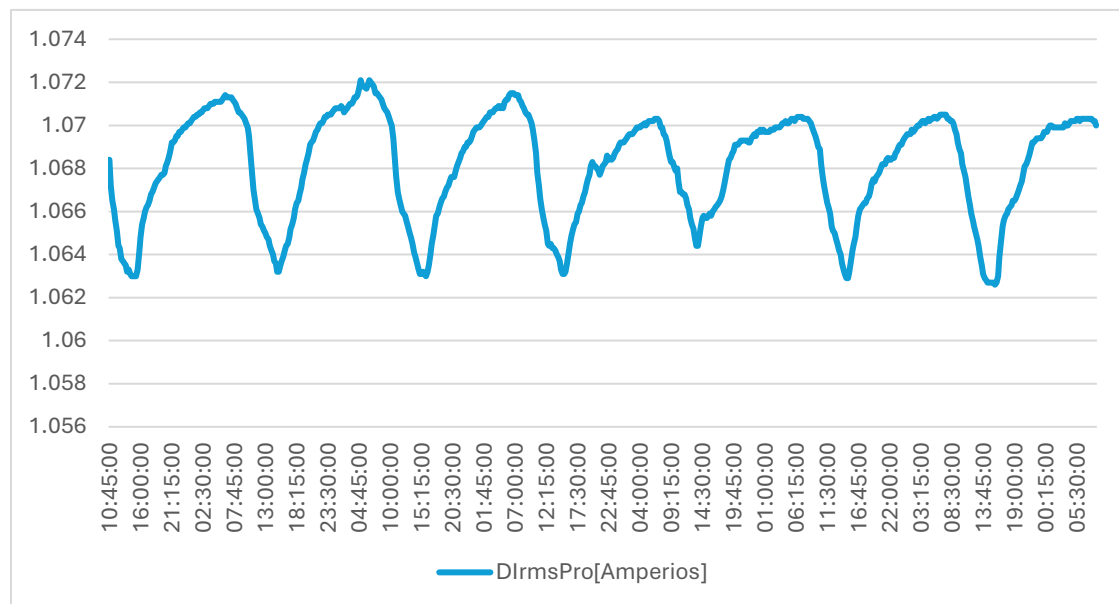


Figura 114

Perfil de carga correspondiente a la fase "C" en Amperios

**Figura 115**

Intensidad de corriente que circula por el conductor "Neutro" en Amperios



Tendencia de la distorsión armónica total (THD) de tensión

Figura 116

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "A" en porcentaje

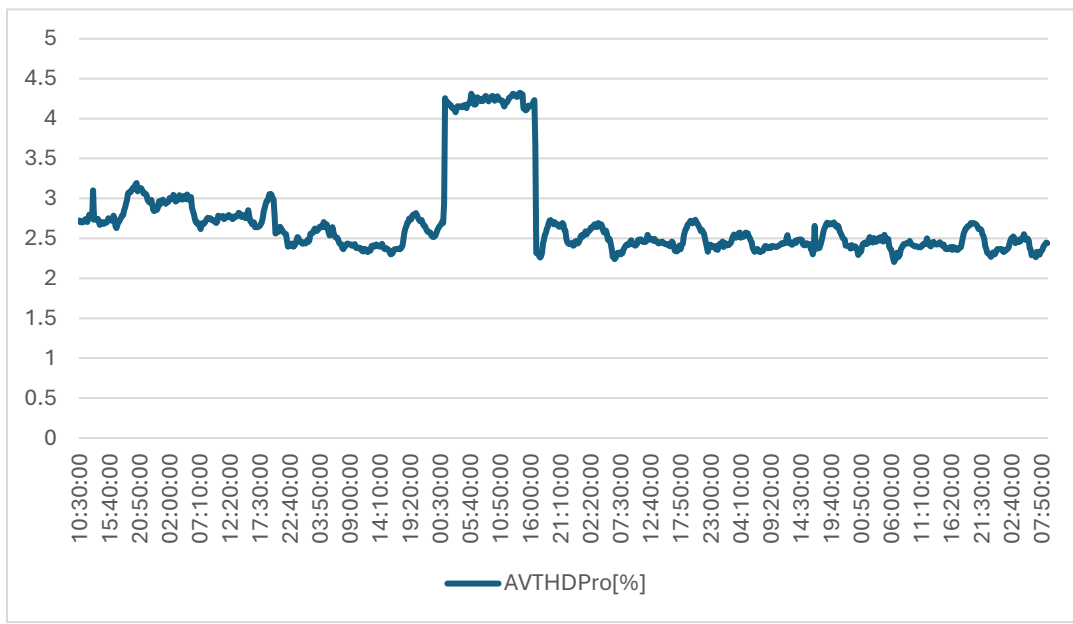


Figura 117

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "B" en porcentaje

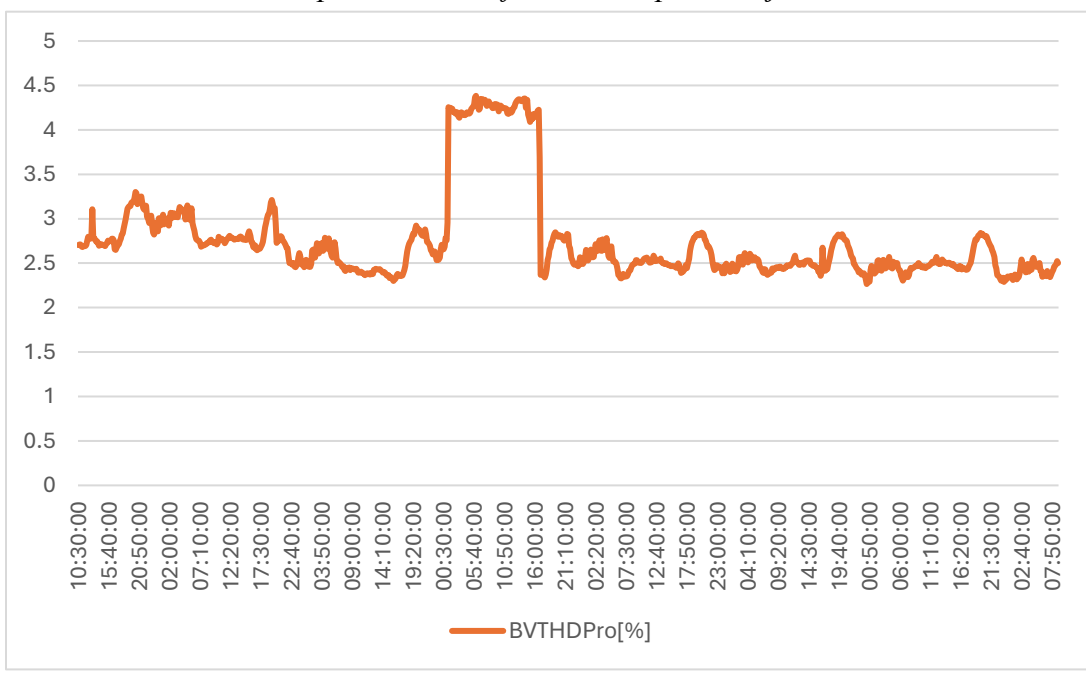
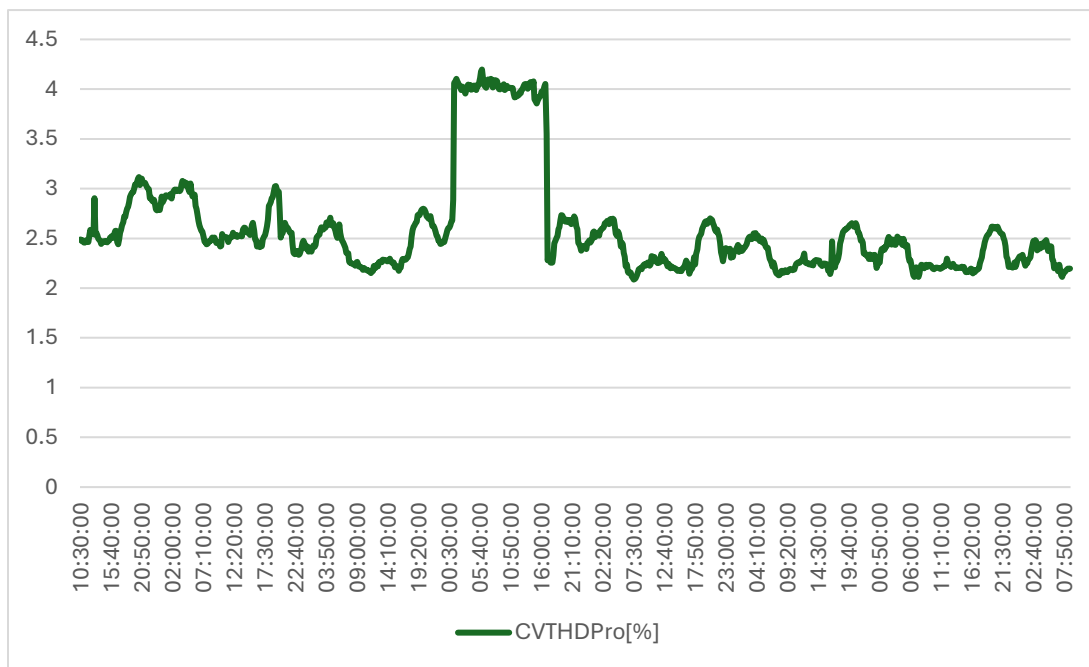


Figura 118

Tendencia del THD de tensión presente en la fase "C" en porcentaje



Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en cada fase

Figura 119

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "A" en Voltios

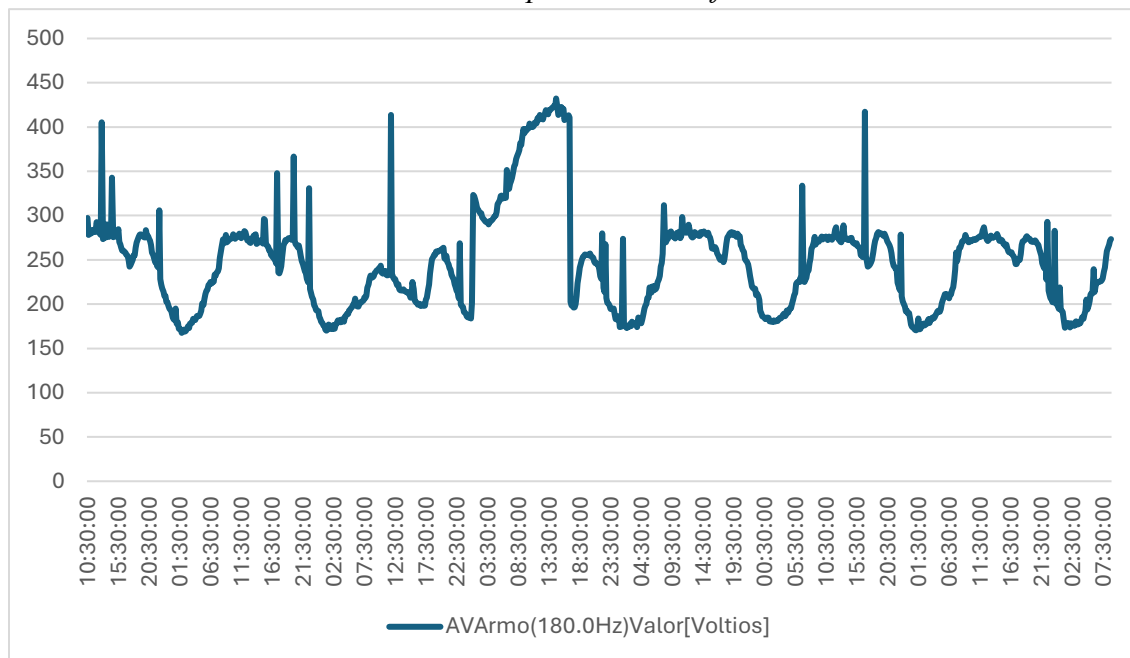
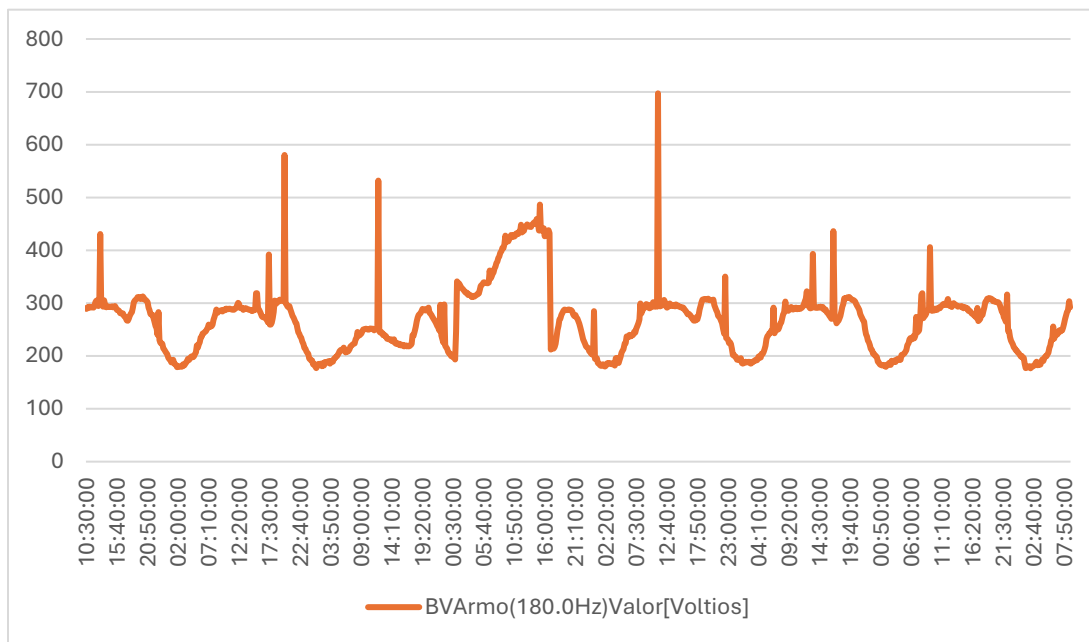


Figura 120

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "B" en Voltios

**Figura 121**

Tendencia de la tercera armónica de tensión presente en la fase "C" en Voltios

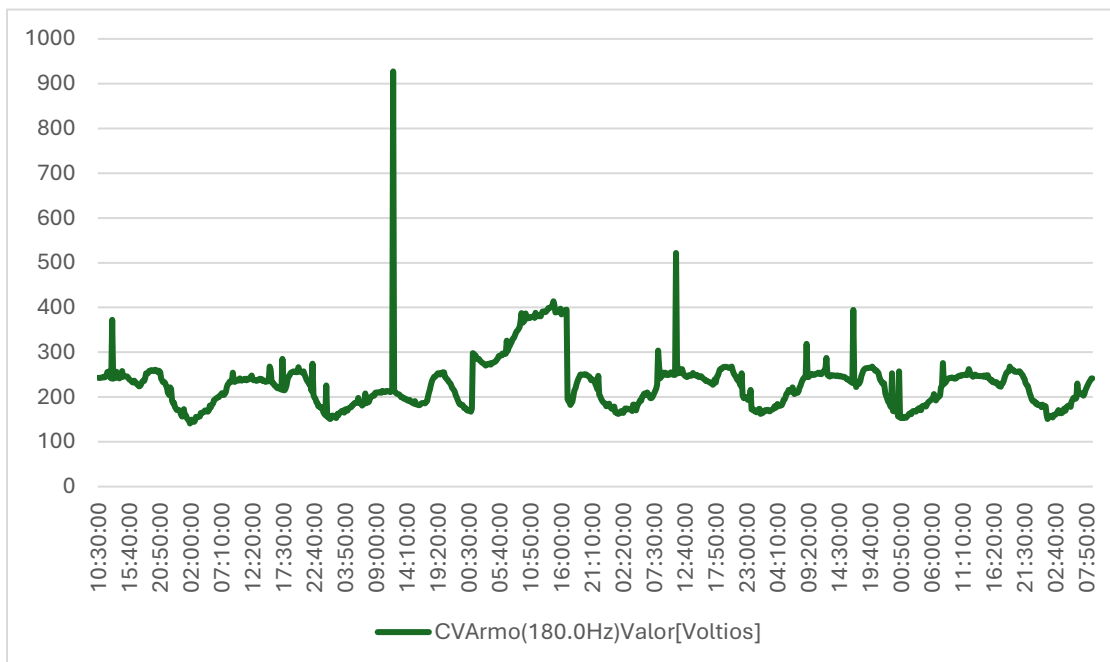


Figura 122

Espectro en frecuencia con transformada rápida de Fourier (FFT)

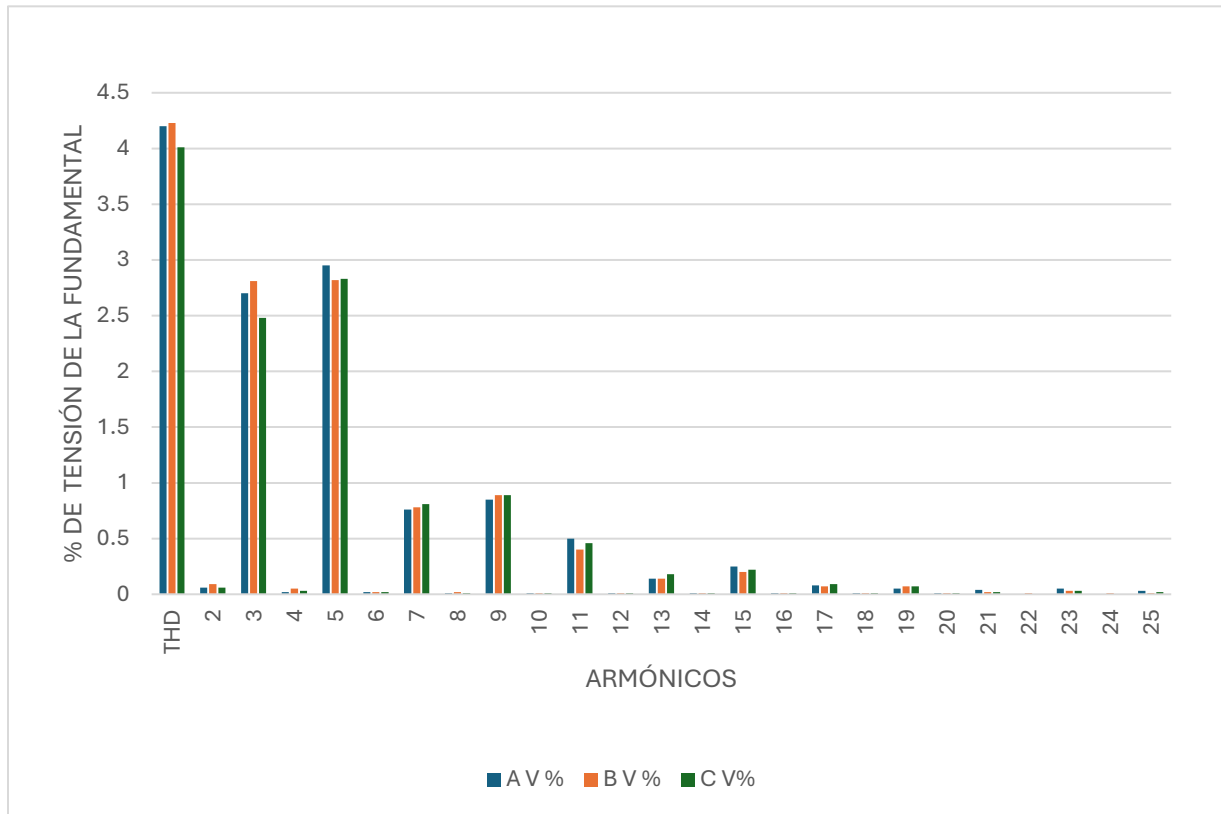


Tabla 34

Comparación entre normativa de SIGET e IEEE 519 1992 y 2022 sobre los niveles de distorsión armónica permitidos

ARM.	Armónicos de tensión			SIGET	IEEE 519-2022	IEEE519-1992
	A V %	B V %	C V%			
THD	4.2	4.23	4.01	8%	5%	5%
2	0.06	0.09	0.06	2%	PASA	PASA
3	2.7	2.81	2.48	5%	PASA	PASA
4	0.02	0.05	0.03	1%	PASA	PASA
5	2.95	2.82	2.83	6%	PASA	PASA
6	0.02	0.02	0.02	0.50%	PASA	PASA
7	0.76	0.78	0.81	5%	PASA	PASA
8	0.01	0.02	0.01	0.50%	PASA	PASA
9	0.85	0.89	0.89	1.50%	PASA	PASA
10	0.01	0.01	0.01	0.50%	PASA	PASA
11	0.5	0.4	0.46	3.50%	3%	3%
12	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA	PASA
13	0.14	0.14	0.18	3%	PASA	PASA
14	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA	PASA
15	0.25	0.2	0.22	0.30%	PASA	PASA
16	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA	PASA
17	0.08	0.07	0.09	2%	PASA	PASA
18	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA	PASA
19	0.05	0.07	0.07	1.50%	PASA	PASA
20	0.01	0.01	0.01	0.20%	PASA	PASA
21	0.04	0.02	0.02	0.20%	PASA	PASA
22	0	0.01	0	0.20%	PASA	PASA
23	0.05	0.03	0.03	1.50%	PASA	PASA
24	0	0.01	0	0.20%	PASA	PASA
25	0.03	0.01	0.02	1.50%	PASA	PASA

VERIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN EN CADA PUNTO DE MEDICIÓN

Punto 2:

H03 fase C: 5.63%

H09 fase C 2.33 %

H15 fase C: 1.19%

Punto 4:

H05 fase C: 4.64 %

Tabla 35

Verificación de los niveles de distorsión armónica de tensión presentes en cada uno de los puntos de medición con respecto a la normativa de SIGET e IEEE 519

Punto de medición	Nivel de tensión	Datos de medición		Límites permisibles	
		V	Configuración	SIGET	IEEE519-2022
1	BT	207 V	3φ en estrella	PASA	PASA
2	MT	23000 V	3φ en estrella	NO PASA	NO PASA
3	BT	240 V	1φ tres hilos	PASA	PASA
4	MT	2400 V	3φ en estrella	PASA	NO PASA
5	BT	240 V	1φ tres hilos	PASA	PASA
6	MT	14400 V	3φ en estrella	PASA	PASA
7	MT	13200 V	3φ en estrella	PASA	PASA
8	MT	23000 V	3φ en estrella	PASA	PASA

Al evaluar los resultados de la tabla 35, se observa que la mayoría de los puntos de medición cumplen con los límites de distorsión armónica establecidos por SIGET e IEEE 519-2022. Sin embargo, hay algunos puntos que no cumplen con uno o ambos estándares, lo que indica posibles áreas de mejora o atención para garantizar la calidad y estabilidad del sistema eléctrico.

V MÉTODOS PARA MINIMIZAR LOS ARMÓNICOS

Mejorar la calidad de energía está relacionado directamente con la corrección de la forma de onda de tensión y corriente de la red de distribución, por lo cual, mitigar los armónicos se vuelve crucial debido a factores que afectan la eficiencia, la vida útil de los equipos y la estabilidad del sistema de distribución eléctrica. Los métodos más utilizados para minimizar los armónicos son utilizando filtros pasivos, filtros activos y transformadores de puesta a tierra.

FILTROS PARA ARMÓNICOS

Un filtro electrónico es un elemento capaz de atenuar frecuencias del espectro de una señal de entrada y permitir el paso de las demás, modificando su amplitud como su fase. Se denomina espectro de una señal a su descomposición en una escala de amplitudes respecto de la frecuencia, y se hace por medio de las series de Fourier (*AMP OP Y FILTROS*, n.d.). Los filtros pueden clasificarse en activos o pasivos según empleen o no fuentes controladas, es decir, elementos activos, tales como amplificadores y sus derivados.

FILTROS PASIVOS

Se componen de elementos pasivos, tales como resistencias, inductores y capacitores, que no necesitan de alimentación externa. Su funcionamiento consiste en desplazar las corrientes armónicas a través de un trayecto que posea una baja impedancia, originada por la combinación de elementos inductivos y capacitivos. Este tipo de filtro no puede ser sobrecargado y se limita únicamente a minimizar los armónicos impares. Su tamaño es más grande en comparación a los filtros activos y producen una mayor disipación de calor.

En la compensación de energía reactiva de carácter inductivo, como se sabe, consiste en la puesta de bancos de capacitores en paralelo con la carga que consume energía reactiva, cuya capacidad varia de forma escalonada para adaptarse al consumo variable de dicha energía. Este procedimiento es eficaz y muy utilizado, pero, con la masiva aparición de armónicos en la red eléctrica, estos sistemas convencionales de compensación quedan afectados.

Justamente los armónicos generados y presentes en la red eléctrica, como son de mayor frecuencia que la fundamental, tienden a circular por los bancos de capacitores del sistema, originando la sobre carga de estos hasta extremos peligrosos que pueden resultar destructivos. Por

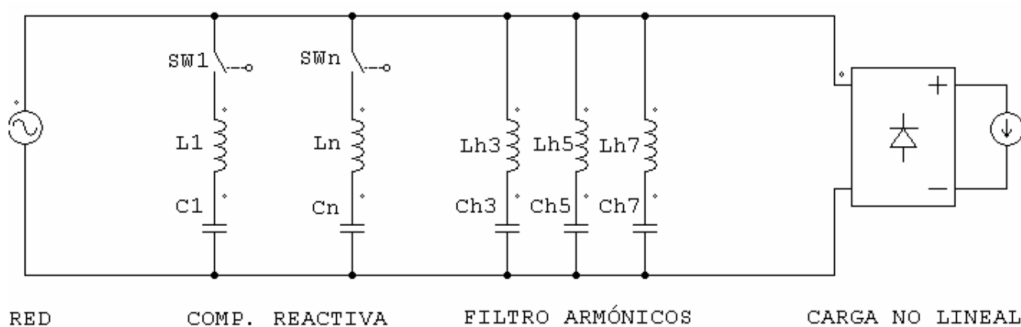
lo cual, ante la sospecha de armónicos se deben tomar precauciones para minimizar la circulación de corriente por el sistema capacitivo de compensación. Estas precauciones consisten en insertar una inductancia en serie con los bancos de capacitores, de tal manera que la frecuencia propia de resonancia del conjunto $L - C$ no coincida con la de ningún armónico posible.

Para mitigar los armónicos creados por una determinada carga no lineal, se debe facilitar el paso de estos a través de caminos de baja impedancia situados en paralelo con la carga. Por lo cual, se instala este tipo de filtro cuya frecuencia de resonancia coincida con la de los armónicos presentes, y dimensionado de tal manera que sea capaz de absorber los valores de corriente correspondientes de cada armónico.

En caso de compensar simultáneamente la energía reactiva y eliminar los armónicos, el sistema debe ser una combinación de bancos de capacitores con inductores (L) en serie de protección y en paralelo con conjuntos de filtros $L - C$ de armónicos en conexión fija a la red, como se indica en la figura 123.

Figura 123

Compensación pasiva de energía reactiva y eliminación de armónicos



Nota: Tomado de (Julián et al., 2009)

El sistema se ha utilizado con éxito y funciona correctamente, siempre que la red o la carga permanezca constante o sufra pocas alteraciones. Pero cuando hay variaciones en la carga y se incrementa o varía el orden los armónicos, o en la propia red, al cambiar el estado de carga, la impedancia de línea o el contenido armónico debido a la presencia de otras cargas conectadas a ella, o por alteraciones de los circuitos resonantes, debido al envejecimiento de los componentes, el sistema, además de resultar ineficaz, corre el riesgo de destrucción por sobrecarga o por la aparición de sobretensiones debidas a resonancias imprevistas. Por ello, y dado que la red como

las cargas conectadas a ella cambian con el tiempo, al igual que el contenido armónico, el sistema de filtrado pasivo debe ser desestimado en general y en particular cuando la presencia de armónicos es crítica.

Clasificación de Filtros Pasivos

Los más comunes son el serie o paralelo. El filtro pasivo serie, se caracteriza por producir una resonancia en paralelo y bloquea los armónicos de corriente, pues tiene una alta impedancia a la frecuencia de sintonía. El filtro pasivo paralelo, se caracteriza por producir una resonancia serie atrapando con ella las perturbaciones de tensión, dado el bajo camino de impedancia que provoca.

FILTROS ACTIVOS

Cuentan con técnicas de control y dispositivos electrónicos de potencia, para suministrar la corriente armónica hacia la carga no lineal, de tal manera que el consumo de corriente sea limpio. En general, se usan para suministrar tensiones variables, solucionando los problemas que pueden presentarse en los filtros pasivos (Rosero & Orizondo, 2023).

Debido a los cambios impredecibles de carga y a las apariciones de resonancias no deseadas entre el filtro pasivo instalado y la impedancia de la línea, es necesario implementar un filtro activo que se adapte a estos cambios que varían con el tiempo, ya que este posee una estructura de convertidor estático conectado a un elemento de almacenamiento de energía en corriente continua y un algoritmo de control para dicho convertidor.

El principio de funcionamiento se basa en su estructura de inversor, la cual está conformada por elementos de conmutación que permiten el paso de las señales hacia la red y que contrarrestan los armónicos presentes en dicha red, permitiendo que la señal de corriente sea lo más sinusoidal posible y sin distorsiones.

Además de la eliminación de armónicos presentes en la red eléctrica, realiza otras funciones correctivas como: eliminación de corriente del neutro, eliminación de armónicos de tensión en los puntos de conexión de la carga, la corrección del factor de potencia, la compensación total o parcial de energía reactiva, el equilibrio de la corriente que circula por las fases, el equilibrio de tensión entre fases y con el neutro, la regulación de tensión y reducción del flicker (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013).

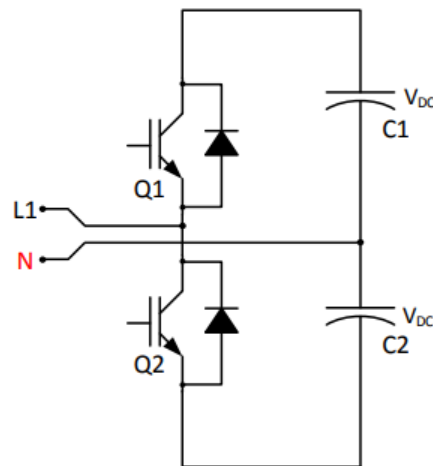
Como se mencionó con anterioridad, está conformado por una etapa de potencia, es decir, por un convertidor estático conectado a un elemento de almacenamiento de energía continua y una etapa de control para el convertidor. Se tiene el elemento de almacenamiento de energía continua, que puede ser inductivo o capacitivo. En el primer caso, el dispositivo de almacenamiento es un inductor y el nivel de energía del filtro se obtiene mediante la medida de corriente continua de la bobina. En el segundo caso, la energía disponible para la compensación se almacena en un capacitor y se establece el nivel de energía del filtro mediante la medida de tensión continua.

La configuración del filtro dependerá si el sistema es monofásico, bifásico o trifásico, ya que de esto depende si el convertidor será:

Monofásico de una rama o medio puente:

Figura 124

Convertidor monofásico o medio puente

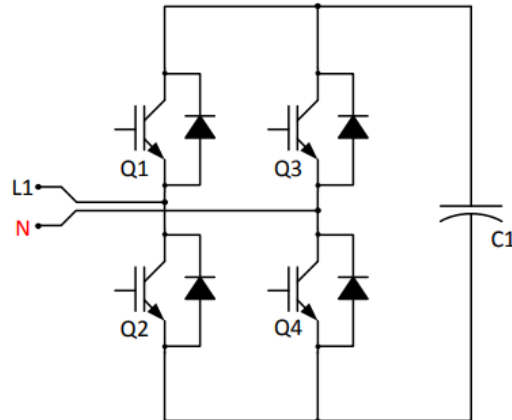


Nota: Tomado de (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013)

Monofásico de dos ramas o puente completo:

Figura 125

Convertidor monofásico de puente completo

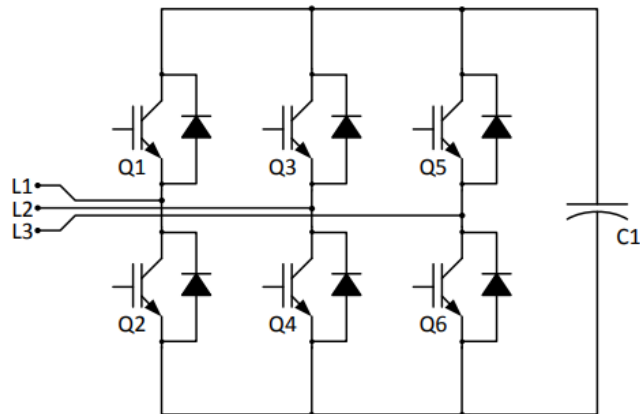


Nota: Tomado de (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013)

Convertidor trifásico de tres ramas:

Figura 126

Convertidor trifásico de tres hilos

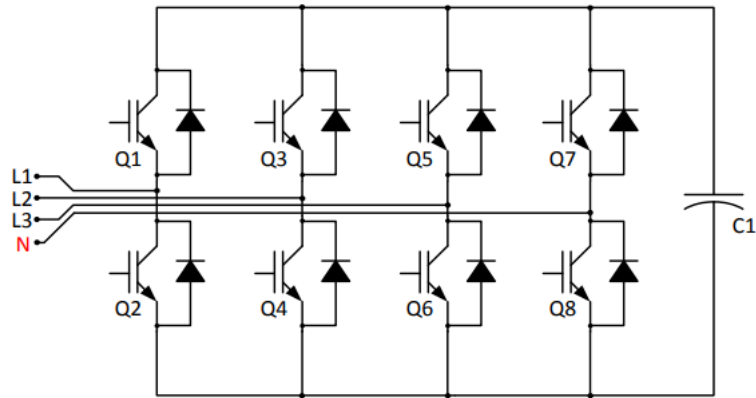


Nota: Tomado de (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013)

Convertidor trifásico de cuatro ramas con conexión a neutro:

Figura 127

Convertidor trifásico de cuatro hilos con compensación de neutro

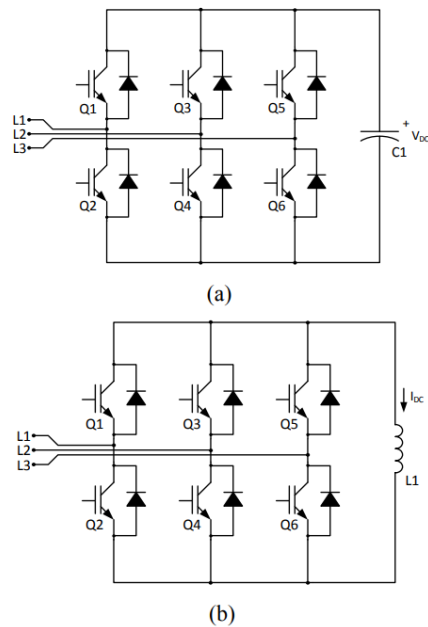


Nota: Tomado de (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013)

Convertidor trifásico con dispositivos de almacenamiento:

Figura 128

Convertidor trifásico, dispositivo de almacenamiento a) Capacitivo b) Inductivo



Nota: Tomado de (Bueno Muñoz & Fajardo Muzo, 2013)

Clasificación de Filtros Activos

Se pueden clasificar en serie o paralelo y es posible encontrar en algunos sistemas de acondicionamiento una combinación de ambos. La combinación de estos se conoce como híbridos.

El filtro activo paralelo, es utilizado para eliminar corrientes armónicas, compensar la potencia reactiva y equilibrar corrientes desbalanceadas. Inyecta corrientes de compensación para cancelar los armónicos y/o componentes reactivos en el punto de conexión. Además, es utilizado como un compensador estático de potencia reactiva (STATCON) en la red eléctrica para estabilizar y mejorar la forma de tensión. El filtro activo serie, se conecta antes de la carga, en serie con la alimentación mediante un transformador, es utilizado para eliminar los armónicos de tensión y balancear la tensión en los terminales de la línea.

Si bien los filtros activos brindan una compensación dinámica y eficaz de los armónicos en las redes de distribución, sus principales limitaciones radican en la complejidad técnica, los costos elevados y la necesidad de un modelo de red preciso para preservar su eficiencia frente a variaciones en las condiciones del sistema.

TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA

Es un transformador destinado principalmente para 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 utilizadas son Wye – Delta o Zig – Zag (estrella interconectada). Este tipo de transformador está clasificado para soportar una corriente de cortocircuito específica durante un período de tiempo determinado sin exceder los límites de temperatura especificado (Alberto et al., 2022).

La importancia de este tipo de transformadores, se debe a que se utiliza una conexión estrella aterrizada del lado de la fuente con el objetivo de proteger a los generadores, quedando una conexión delta del lado de la carga (transmisión, distribución), lo cual provoca que la línea se vea sin una referencia efectiva a tierra, lo que genera como consecuencia sobretensiones y que las fallas línea a tierra (L – T) no sean percibidas por las protecciones causando una falla sostenida, además, no se puede hablar de una conexión estrella a estrella debido a que esta permite la filtración de armónicos.

En una condición ideal de operación (sin armónicos, sin fallas y en condiciones balanceadas) este tipo de transformador no debería conducir corriente ya que opera en vacío, no obstante, cuando ocurre una falla, el equipo dirige la corriente al neutro del sistema para ser drenada a tierra y provocar la apertura de las protecciones según la falla.

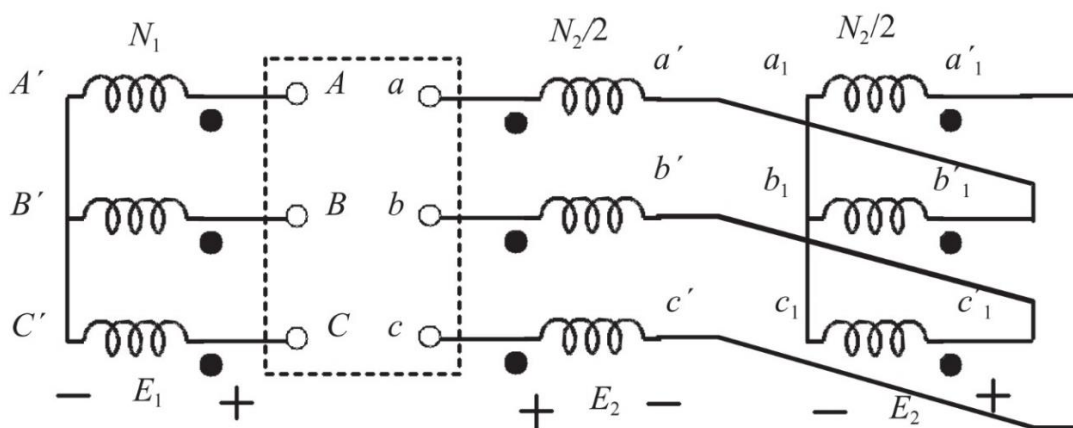
CONEXIÓN ZIG – ZAG

Un transformador con este tipo de conexión está conformado con una relación 1:1 con el primario y secundario conectados entre sí, la conexión zig – zag 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 tal razón este tipo de 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 129

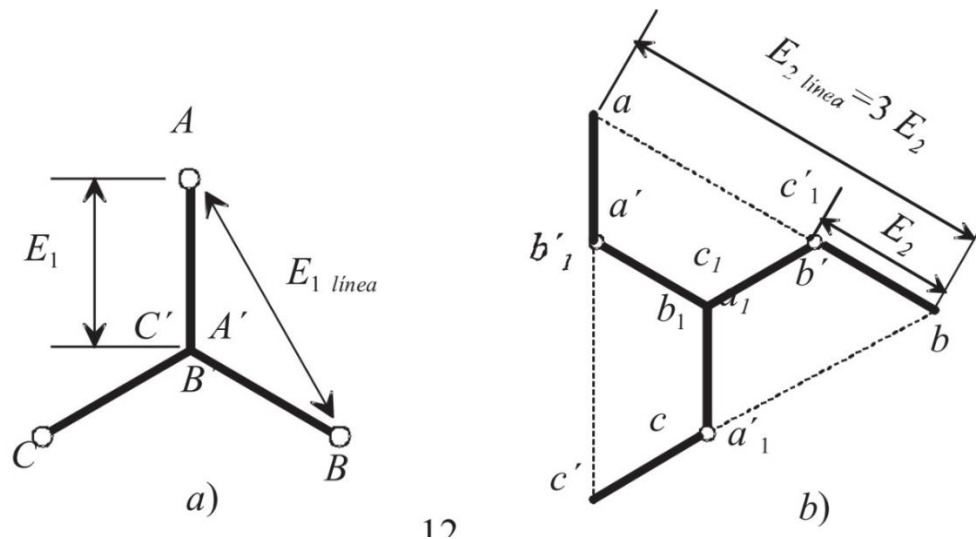
Transformador con conexión estrella zig – zag



Nota: Tomado de (Mora, 2008)

Figura 130

Diagrama vectorial de las F.E.M, a) lado primario b) lado secundario



Nota: Tomado de (Mora, 2008)

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

1. Tensión
2. Frecuencia
3. Impedancia
4. Corriente térmica nominal
5. Corriente continua nominal
6. Tensión del circuito del sistema
7. Nivel de aislamiento de impulso básico (BIL) y clase de aislamiento
8. Servicio (Interior o exterior)
9. Tiempo (duración)

La principal limitación de los transformadores de puesta a tierra en las redes de distribución es su capacidad reducida para dirigir altas corrientes de falla a tierra, junto con la necesidad de un sistema de protección y conexión a tierra correctamente diseñado para garantizar la seguridad y el funcionamiento estable del sistema.

SIMULACIÓN CON SOFTWARE ATP DRAW

El software Alternative Transient Program (ATP), es una herramienta de simulación gratuita diseñado para simular fenómenos transitorios electromagnéticos y electromecánicos de sistemas eléctricos. Utilizado para el diseño, especificación de equipos y definición de parámetros eléctricos, ya sea en sistemas monofásicos y polifásicos. ATP calcula el comportamiento de variables eléctricas a lo largo del tiempo, utilizando modelos que caracterizan elementos resistivos, inductivos, capacitivos, máquinas, interruptores y otros componentes.

Draw es el procesador gráfico para Alternative Transient Program, herramienta utilizada para la simulación que permite construir circuitos eléctricos de manera gráfica utilizando una interfaz basada en Windows, seleccionando componentes de menú y editando sus parámetros.

CÁLCULO DE FILTRO SINTONIZADO SEGÚN IEEE STD. 3002.8-2018

Se tiene los siguientes parámetros de medición del Punto 4:

$$fp_1 = 0.978, V_{rms} = 2,521 V, I_{rms} = 57.12 A, I_1 = 56.58 A \text{ y } V_1 = 2,518 V$$

Cálculo de ángulo inicial de desfase entre corriente y tensión.

$$fp_1 = \cos(\theta_1) \tag{15}$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(fp_1 = 0.978) = 12.04^\circ \tag{16}$$

$$I_1 = 56.58 \angle -12.04^\circ [A] \tag{17}$$

Cálculo de impedancia equivalente total:

$$Z = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{2,521 V}{57.12 A} = 44.13 \angle 12.04^\circ [\Omega] \tag{18}$$

$$Z = 43.16 + j9.20 [\Omega] \tag{19}$$

Cálculo de inductancia equivalente:

$$2\pi * f * L = 9.20 \tag{20}$$

$$L = \frac{9.20}{2\pi(60)} = 24.40 \text{ mH} \quad (21)$$

Corrección del factor de potencia:

$$S_1 = V_1 * I_1 = (2,518 \text{ V})(56.58 \text{ A}) = 142.47 \text{ kVA} \quad (22)$$

Cálculo de potencia reactiva inicial:

$$Q_1 = (S_1) \sin(\theta_1) = (142.47 \text{ kVA}) \sin(12.04^\circ) = 29.72 \text{ kVAR} \quad (23)$$

Cálculo de ángulo según factor de potencia deseado igual a 0.999:

$$fp_2 = \cos(\theta_2) \quad (24)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(fp_2 = 0.999) = 2.56^\circ \quad (25)$$

Cálculo de potencia reactiva para tener el factor de potencia deseado:

$$Q_2 = (S_1) \sin(\theta_2) = (142.47 \text{ kVA}) \sin(2.56^\circ) = 6.36 \text{ kVAR} \quad (26)$$

Cálculo de potencia reactiva necesaria para compensar y tener el factor de potencia deseado:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = (29.72 - 6.36) \text{ kVAR} = 23.36 \text{ kVAR} \quad (27)$$

Cálculo del capacitor para suministrar dicha potencia reactiva:

$$X_C = \frac{(kV_{rms})^2}{Q_C} = \frac{(2.521 \text{ kV})^2}{23.36 \text{ kVAR}} = 0.2721 \text{ k}\Omega \quad (28)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi * f * C} \quad (29)$$

$$C = \frac{1}{2\pi * f * X_C} = \frac{1}{2\pi(60 \text{ Hz})(0.2721 \text{ k}\Omega)} = 9,749 \mu\text{F} \quad (30)$$

Cálculo de X_l de acuerdo con el armónico a eliminar:

$$X_l = \frac{X_C}{[h_3(fp_2)]^2} = \frac{0.2721 \text{ k}\Omega}{[3(0.999)]^2} = 30.30 \Omega \quad (31)$$

$$j\omega L = X_l \quad (32)$$

$$L = \frac{X_l}{2\pi(60)} = \frac{30.30 \Omega}{2\pi(60)} = 80.37 \text{ mH} \quad (33)$$

Se calcula el valor de resistencia a partir del factor de calidad Q_Q , tomando en cuenta que este valor puede variar de 30 a 100.

$$X_r = \sqrt{(X_C)X_l} = \sqrt{(0.2721 \text{ k}\Omega)(80.37 \Omega)} = 28.71 \Omega \quad (34)$$

$$R = \frac{X_r}{Q_Q} = \frac{28.71 \Omega}{80} = 358.88 \text{ m}\Omega \quad (35)$$

SIMULACIÓN CON ATP DRAW

Una vez calculados los elementos necesarios para el filtro pasivo, se realiza las simulaciones pertinentes utilizando el software **ATP DRAW**.

Se inicializa la fuente de tensión con los siguientes parámetros.

Figura 131

Especificación de fuente de tensión

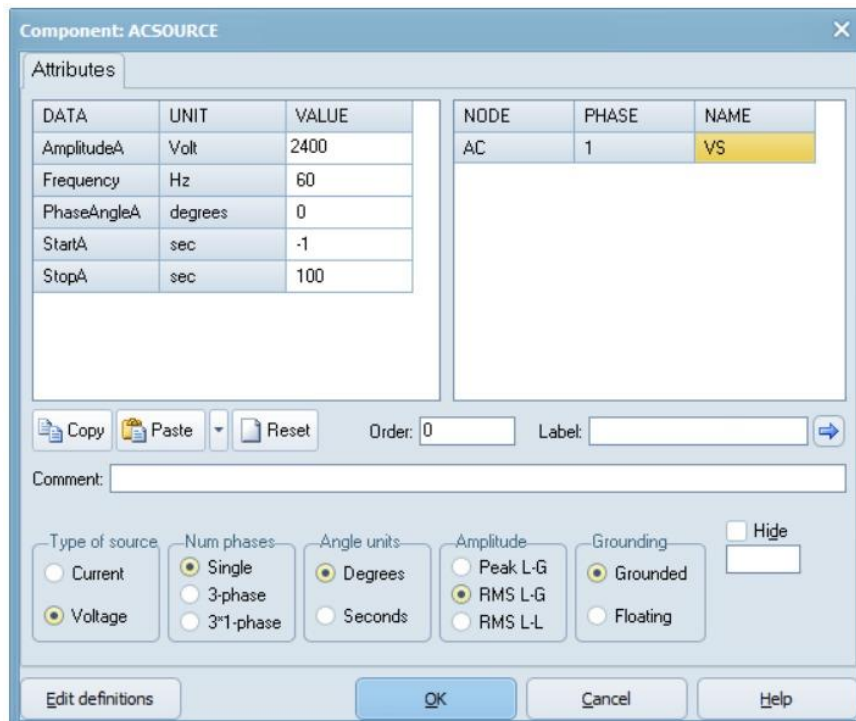


Figura 132

Componente resistivo de Impedancia Thévenin

The screenshot shows a dialog box titled "Component: RESISTOR". It contains two tables under the "Attributes" section:

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm	0.01206

NODE	PHASE	NAME
From	1	VS
To	1	L1

Below the tables are fields for "Order" (0) and "Label". There is a "Comment" field and an "Output" dropdown menu set to "1 - Current". On the right, there are checkboxes for "Hide" and "\$Vintage,1", and a "NumPh" spinner set to 1. At the bottom are buttons for "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help".

Nota: Componente resistivo de la red, proporcionado por (AES CAESS, 2025)

Figura 133

Componente reactivo de Impedancia Thévenin

The screenshot shows a dialog box titled "Component: IND_RP". It contains two tables under the "Attributes" section:

DATA	UNIT	VALUE
L	mH	48.5
Kp	Damp. 5-10	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	L1
To	1	Output

Below the tables are fields for "Order" (0) and "Label". There is a "Comment" field and an "Output" dropdown menu set to "1 - Current". On the right, there are checkboxes for "Hide" and "\$Vintage,1", and a "NumPh" spinner set to 1. At the bottom are buttons for "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help".

Nota: Componente reactivo de la red, proporcionado por (AES CAESS, 2025)

Figura 134*Componente resistivo de impedancia de carga*

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	Ohm	43.16	From	1	Output
			To	1	L2

Order: 0 Label:

Comment:

Output:

Hide
 \$Vintage.1
 NumPh

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 135*Componente reactivo de impedancia de carga*

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
L	mH	24.4	From	1	L2
Kp	Damp. 5-10	0	To	1	

Order: 0 Label:

Comment:

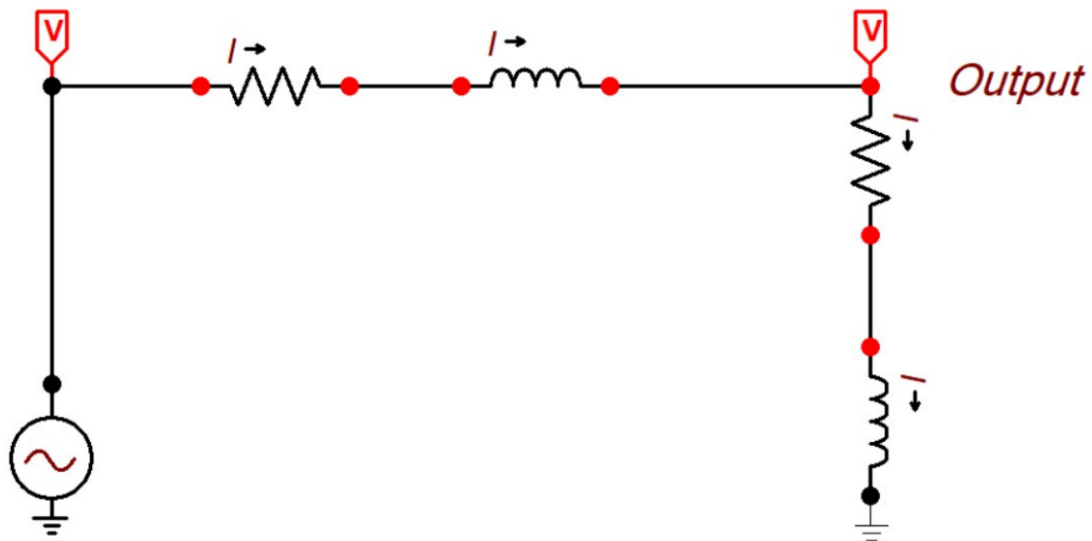
Output:

Hide
 \$Vintage.1
 NumPh

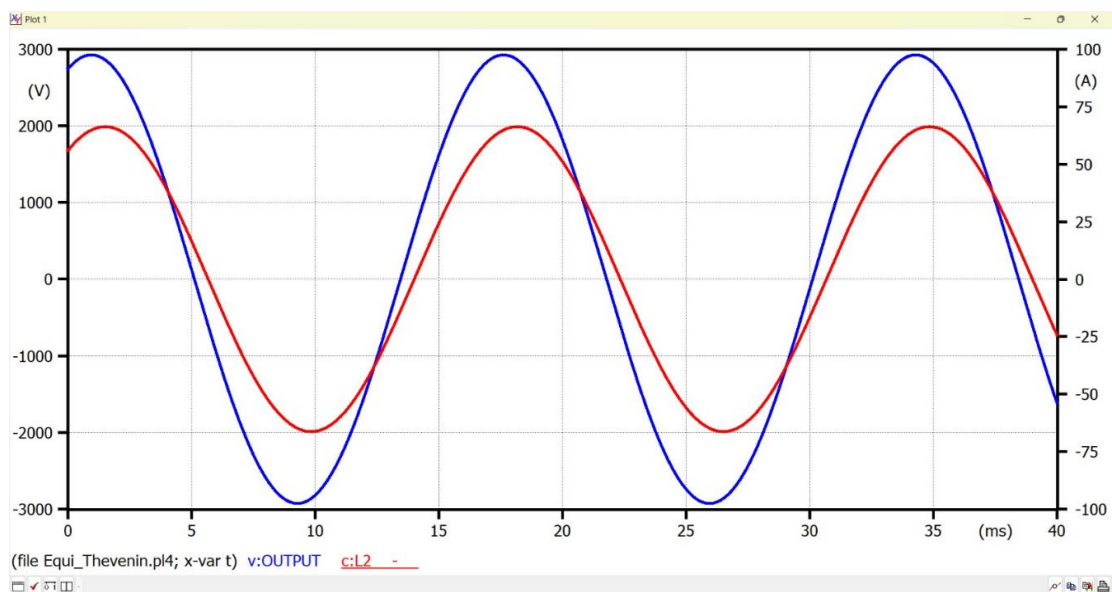
Edit definitions OK Cancel Help

Figura 136

Circuito equivalente para simulación

**Figura 137**

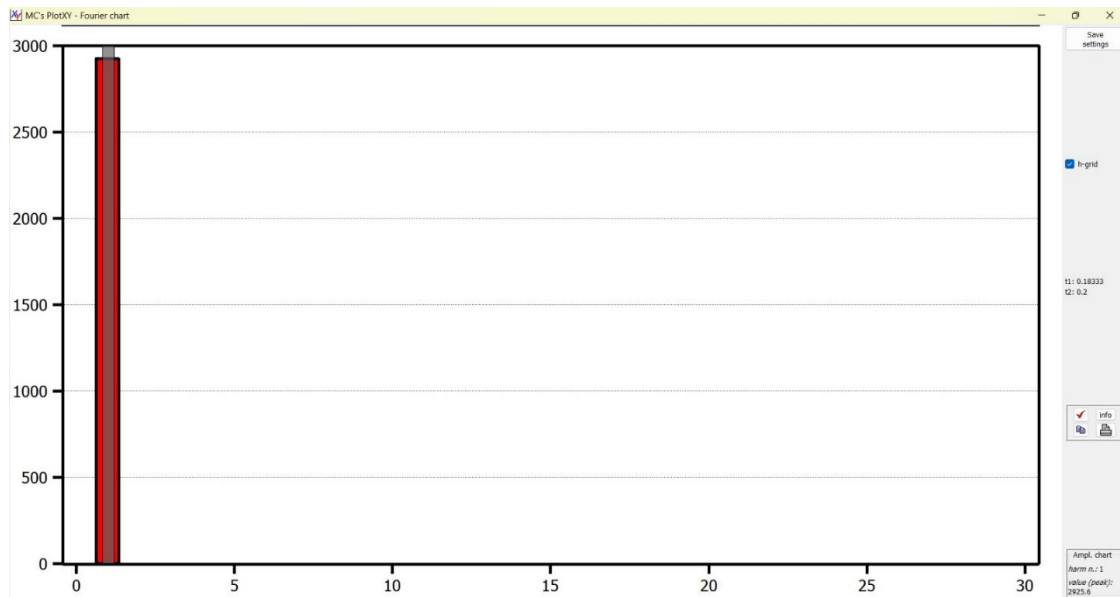
Forma de onda de tensión (azul) y corriente (roja) que reproduce la corriente de carga y el factor de potencia



Nota: Se tiene un desplazamiento entre formas de onda de 0.57 milisegundos, los cuales son equivalentes a 12.04 grados aproximadamente, lo cual es el desfase calculado anteriormente.

Figura 138

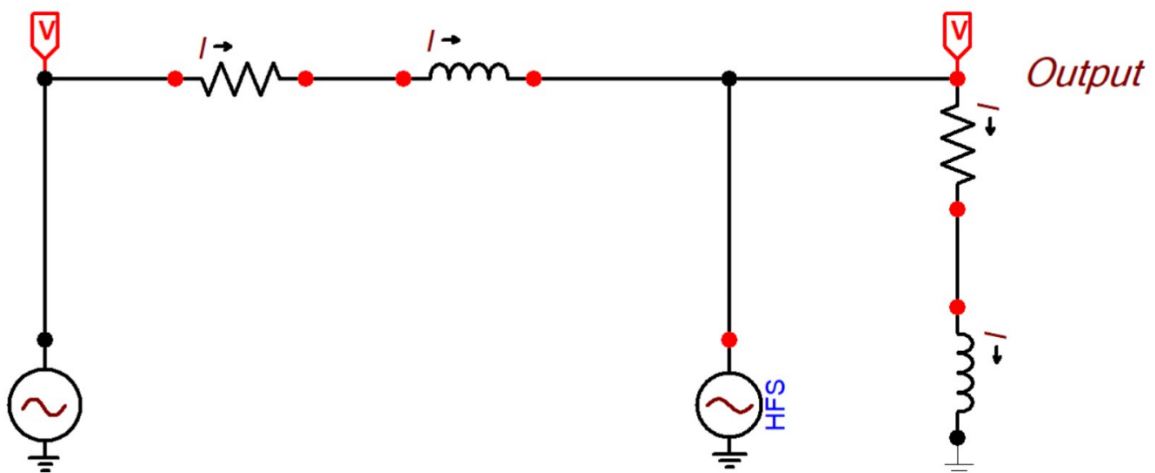
Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito equivalente.



Nota: Se muestra el espectro en frecuencia de la forma onda de tensión, en la cual, no se observa distorsión debido a que es la recreación del circuito equivalente del Punto 4.

Figura 139

Circuito con distorsión armónica



La fuente de distorsión armónica de tensión se inicializa con los siguientes valores:

Figura 140

Valores configurados de la fuente armónica de tensión para la simulación

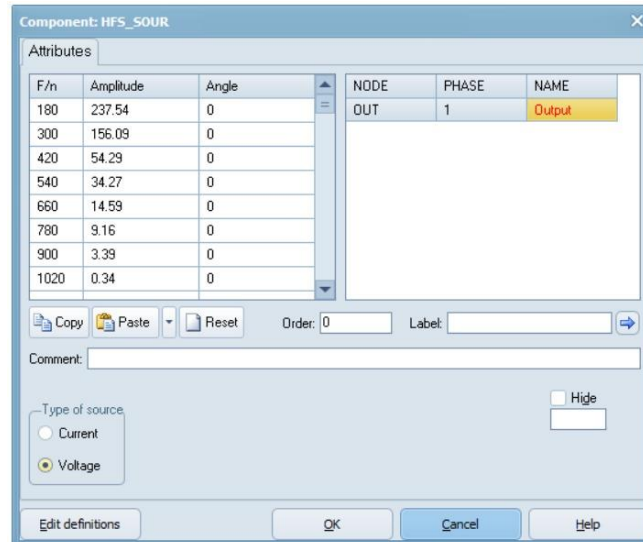
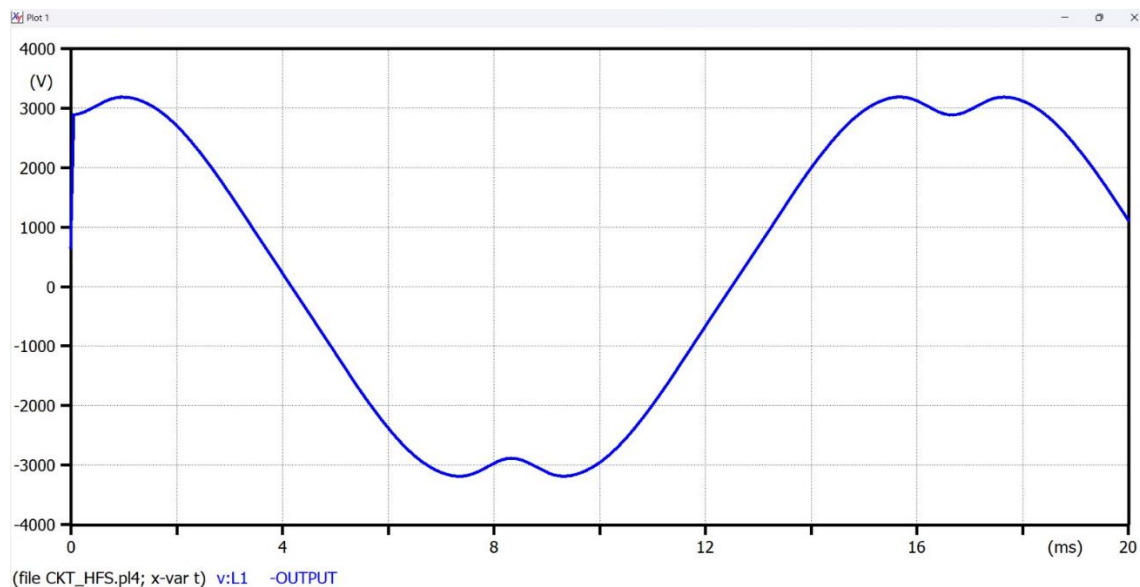


Figura 141

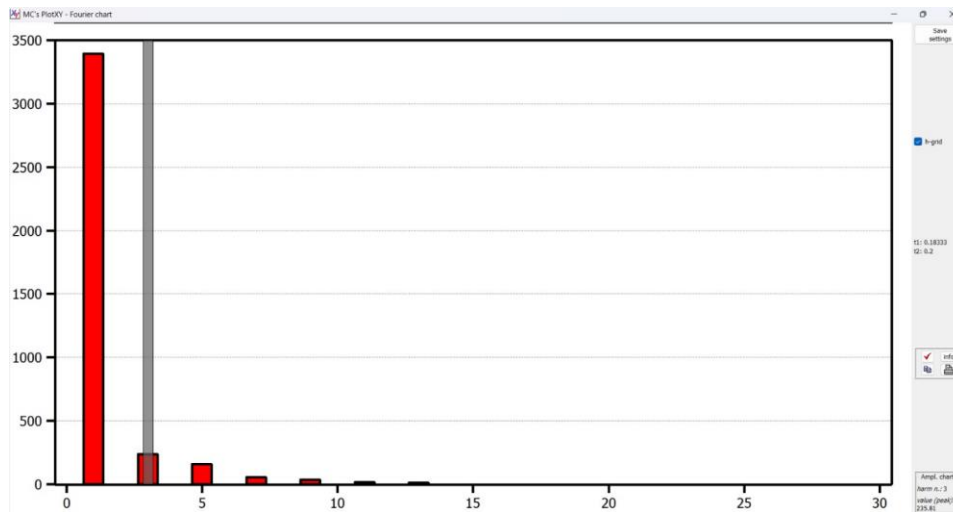
Forma de onda de tensión con distorsión armónica



Nota: Se muestra el resultado de la simulación del circuito con la fuente de distorsión armónica de tensión, se observan muescas en la forma de onda de tensión, lo cual indica la existencia de armónicos a través del circuito.

Figura 142

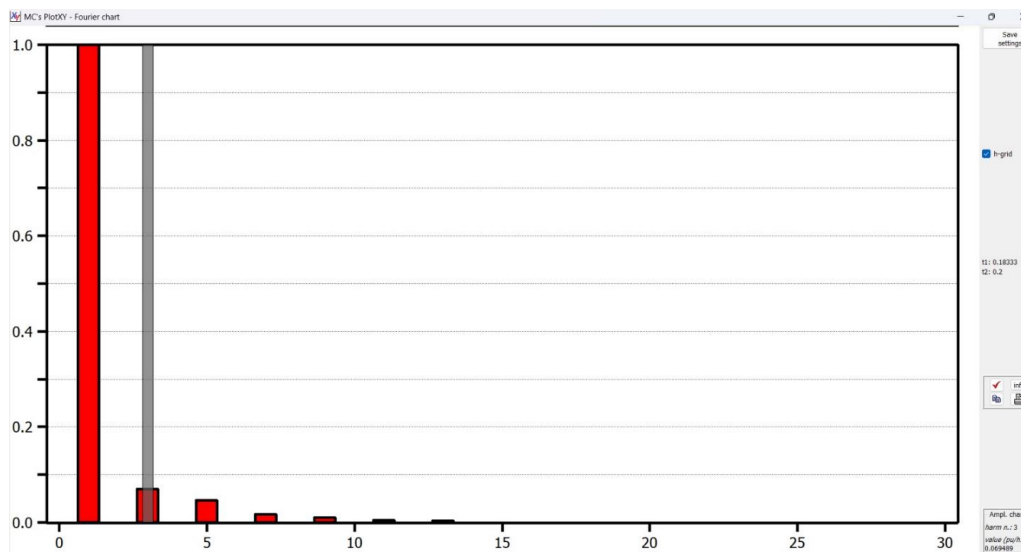
Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito con distorsión armónica de tensión



Nota: muestra el espectro en frecuencia de la forma de onda de tensión de la figura 127, en la cual, se observa distorsión armónica donde predomina la de tercer orden.

Figura 143

Cociente del componente armónico individual con respecto al fundamental



Nota: Se muestra el cociente del orden armónico con respecto al fundamental. Por ejemplo, para el armónico de tercer orden se tiene un cociente con amplitud de 0.07 aproximadamente, por lo cual, el porcentaje de H03 es del 7% sobrepasando lo establecido en la tabla 7 del capítulo 2.

Se agrega al circuito, el diseño del filtro pasivo sintonizado para la minimización de la tercera armónica de tensión y así analizar la respectiva simulación:

Figura 144

Circuito con filtro pasivo sintonizado (RLC)

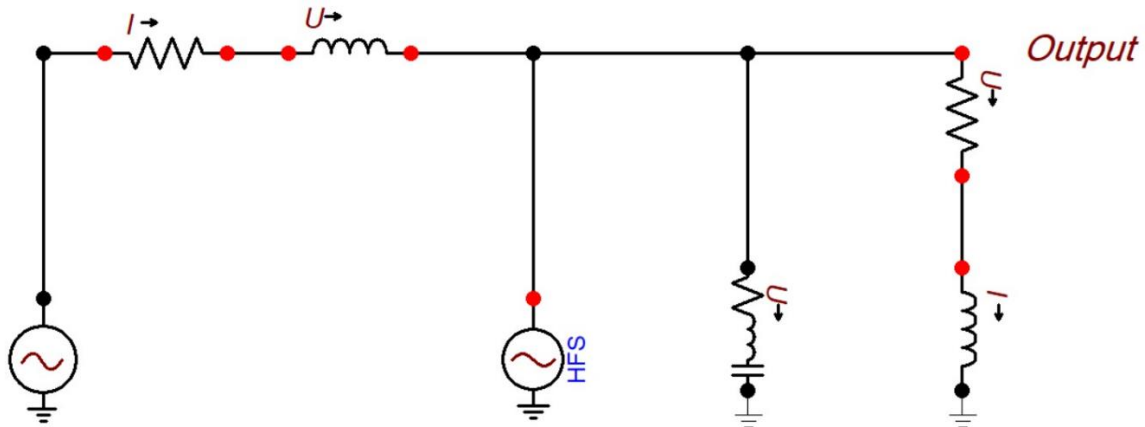
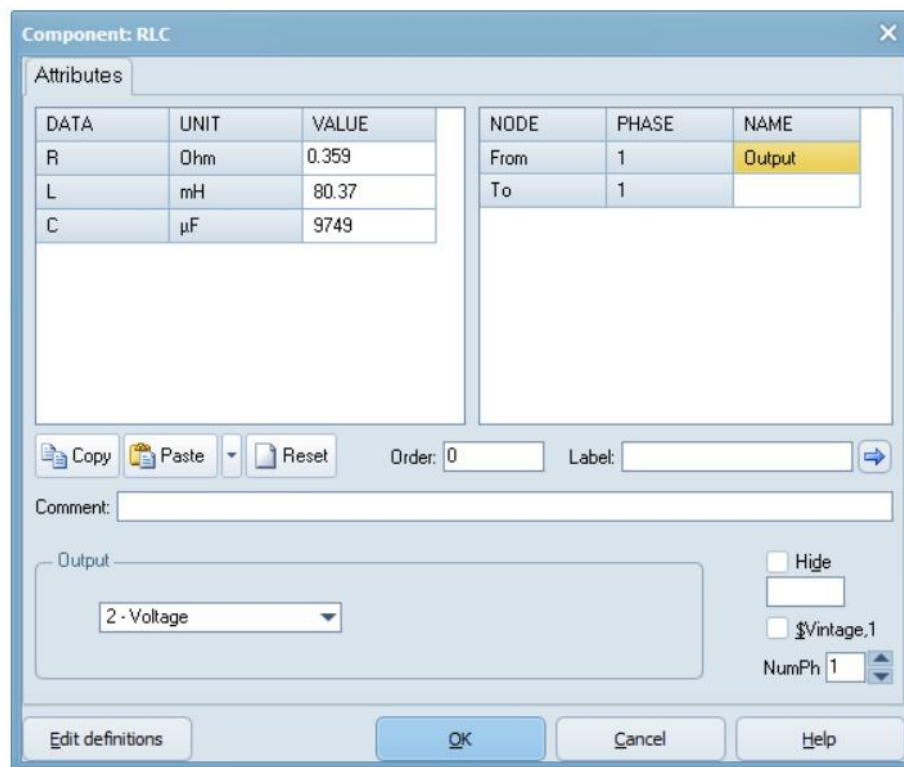


Figura 145

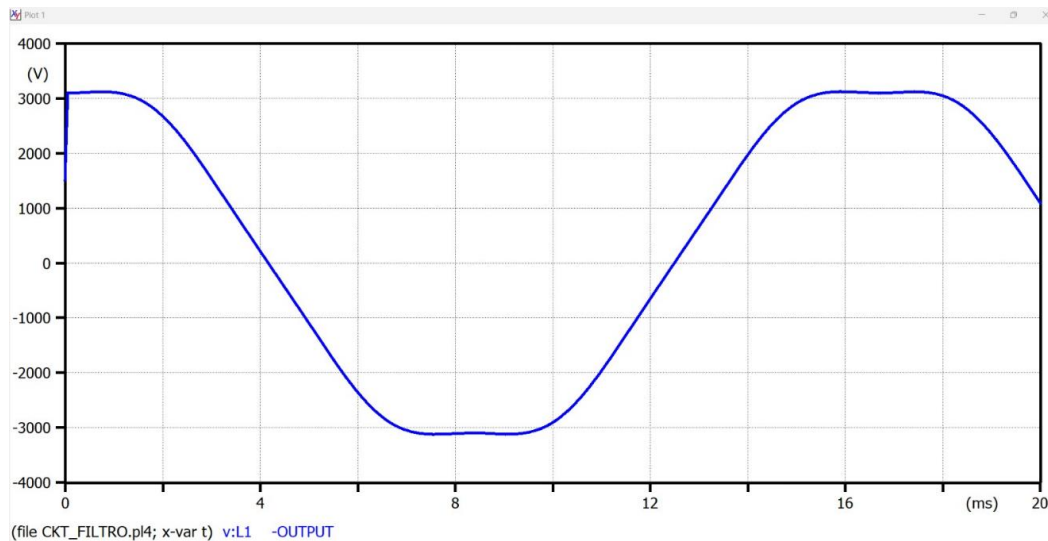
Valores aplicados al filtro pasivo sintonizado (RLC)



Nota: Se muestra la configuración de los parámetros del filtro pasivo sintonizado determinados anteriormente.

Figura 146

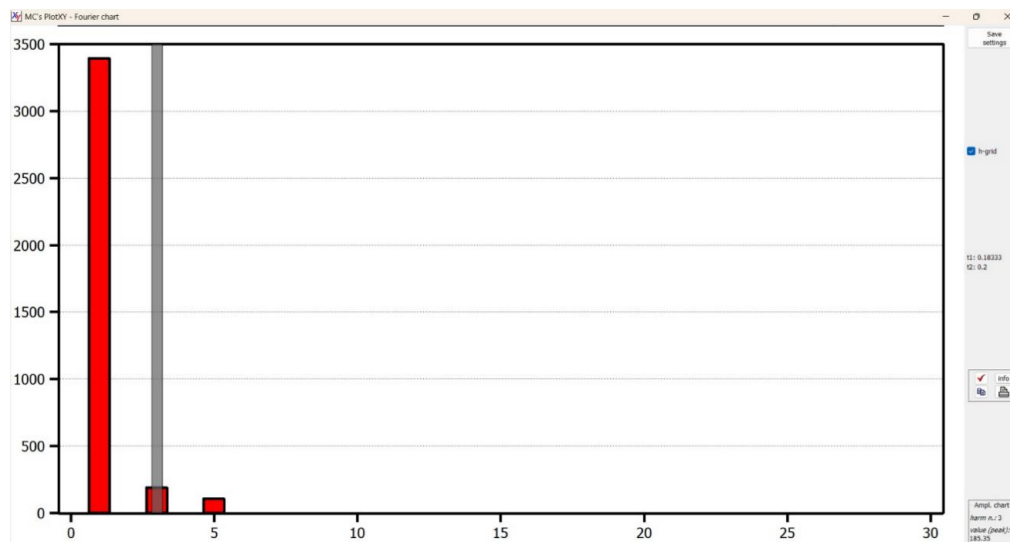
Onda de tensión aplicando filtro pasivo sintonizado (RLC)



Nota: Se muestra el resultado de la simulación del circuito aplicando el filtro pasivo sintonizado, sin embargo, aún se observan muescas en la forma de onda de tensión.

Figura 147

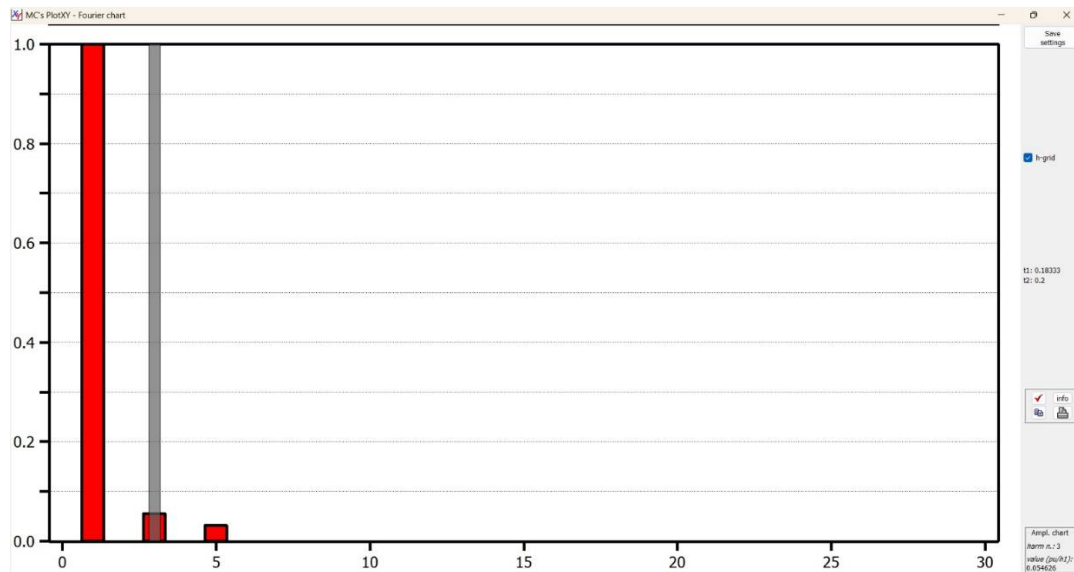
Transformada rápida de Fourier aplicada al circuito con filtro pasivo sintonizado (RLC)



Nota: Se muestra el espectro en frecuencia de la forma de onda de tensión de la figura 132, en la cual, se observa que aún existe distorsión armónica donde predomina la de tercer orden, pero en menor magnitud.

Figura 148

Cociente del componente armónico individual con respecto al fundamental



Nota: Se muestra el cociente del orden armónico con respecto al fundamental. Para el armónico de tercer orden se tiene un cociente con amplitud de 0.055 aproximadamente, por lo cual, el porcentaje de H03 es del 5.5% sobrepasando lo establecido en la tabla 7 del capítulo 2. Sin embargo, se aprecia una disminución de 50.46 V en la magnitud de dicho armónico (para el cual el filtro pasivo sintonizado está diseñado), lo que representa el 21.40 % de la magnitud del armónico a moderar.

CONCLUSIONES

- Según el artículo 47 de la Norma de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución establecida por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), se requiere que se implemente un punto de medición de tensión por cada 60,000 usuarios activos para analizar la distorsión armónica en las redes de distribución. En el caso del área metropolitana de San Salvador, que cuenta con aproximadamente 500,000 usuarios, corresponde establecer al menos ocho puntos de medición para cumplir con esta normativa
- Es esencial seleccionar adecuadamente los puntos de medición para obtener datos representativos y facilitar el análisis de la distorsión armónica. Se debe medir en el punto de acoplamiento común (PCC); en el lado primario de la subestación para mediciones en media tensión y en el lado secundario para mediciones en baja tensión. Además, es fundamental utilizar analizadores de calidad de energía que sean capaces de medir hasta el armónico de orden 50 y de acuerdo con el artículo 48 de la norma establecida por SIGET, se debe realizar un período de medición de al menos siete (7) días, con intervalos de diez (10) minutos estableciendo un percentil del 95% de niveles de compatibilidad y límites de emisión.
- En el segundo punto de medición ubicado en avenida Cerro Verde, colonia Sierra Morena, ciudad de Soyapango, distrito de San Salvador Este, San Salvador, El Salvador, se observa que las armónicas 3, 9 y 15 de la fase “C” superan los límites establecidos por la normativa de SIGET, registrando valores de 5.63%, 2.33% y 1.19%, respectivamente. Estos resultados no cumplen con lo estipulado por el estándar IEEE 519-2022, la cual establece un límite del 5% para la distorsión armónica total (THD) y del 3% para las componentes armónicas individuales menores a la orden H50 en sistemas de media tensión.
- En el cuarto punto de medición ubicado en calle Gerardo Barrios, barrio El Centro, distrito de Mejicanos, San Salvador Centro, El Salvador, se observa que la quinta armónica de tensión presenta un porcentaje de 4.64%, cumpliendo con la normativa de SIGET; sin embargo, no cumple con el límite del 3% establecido en las versiones del estándar IEEE 519 para media tensión. Esto se debe a que se trata de una planta fotovoltaica perteneciente a la generación distribuida, donde predominan los armónicos de orden 3°, 5° y 7°.

- La evolución de los estándares de calidad de la energía eléctrica refleja una adaptación a las nuevas condiciones operativas de los sistemas eléctricos, especialmente ante el incremento de cargas no lineales. La comparación entre el estándar IEEE 519 en sus versiones de 1992 y 2022 evidencia un relajamiento en los límites de distorsión armónica total (THD) para niveles de tensión inferiores a 1 kV, pasando del 5 % al 8 %, así como un aumento en los límites permitidos para los armónicos individuales. Sin embargo, al contrastar la normativa IEEE 519-2022 con la regulación nacional basada en la norma EN50160 adoptada por SIGET, se observa que, aunque ambas coinciden en el límite del 8 % para la THD, el estándar estadounidense mantiene criterios más estrictos respecto a los armónicos individuales, lo que la posiciona como un referente técnico más riguroso en este aspecto.
- Los filtros pasivos son efectivos para atenuar armónicos de orden específico, sin embargo, su rendimiento puede verse afectado por fenómenos de resonancia, especialmente si la impedancia del sistema varía con el tiempo. Por otro lado, los transformadores de puesta a tierra ayudan a reducir los armónicos de secuencia cero y las corrientes de retorno en el conductor neutro, pero no eliminan la mayoría de los armónicos residuales presentes en la red. En ciertos casos, puede ser necesario utilizar dos transformadores de puesta a tierra para mitigar el impacto de la corriente de tercera armónica. En comparación, los filtros activos ofrecen una solución más eficiente y robusta para la reducción de armónicos, ya que operan en sistemas eléctricos dinámicos, ajustando su respuesta en tiempo real a las variaciones de la red y las cargas, lo que permite minimizar significativamente la distorsión armónica total (THD).
- En el análisis realizado de la tabla de verificación de los niveles de distorsión armónica de tensión, se observa que la mayoría de los ocho puntos de medición cumplen con los límites permisibles establecidos por la normativa de SIGET, sin embargo, hay otros puntos de medición que no cumplen con dicha normativa, lo cual indica una posible área de mejora, como la adopción de nuevas normas que regulen la emisión de corrientes armónicas de equipos específicos, como se hace en otros países.
- El filtro pasivo sintonizado cumple en cierto grado su función; sin embargo, según los resultados obtenidos en la simulación, no elimina por completo el problema. En particular,

para el armónico de tercer orden, el porcentaje de THD_3 es del 5.5%, lo que supera el límite establecido por la normativa de SIGET. Además, presenta la limitación de operar de manera más eficiente en redes poco dinámicas, condición que no se cumple en un sistema de distribución común. Su eficacia también depende del diseño y de la ubicación respecto a la fuente de armónicos.

SUGERENCIAS

- Ampliar la recopilación de datos en puntos adicionales dentro de los distritos que conforman el área metropolitana de San Salvador, con el fin de realizar un análisis más exhaustivo del comportamiento del armónico de tercer orden, el cual presenta el mayor contenido energético.
- Efectuar mediciones periódicas en los nodos principales dentro del área metropolitana de San Salvador, estableciendo un intervalo de medición mayor al establecido por la normativa de SIGET de catorce (14) días calendario para fines de investigación.
- Adoptar nuevas normas que regulen la emisión de corrientes armónicas de equipos específicos, siguiendo el ejemplo de países que han implementado estándares como la IEC 61000-3-2 y la IEEE 519. Estas regulaciones establecen límites para las emisiones armónicas de dispositivos conectados a redes de baja tensión, contribuyendo a mejorar la calidad del suministro eléctrico y reducir las interferencias en equipos sensibles.

REFERENCIAS

- AES CAESS GIS CORPORATIVO (2024).
- Alberto, J., Cano, L., Ernesto, J., & Muñoz, M. (2022). *ANÁLISIS Y MITIGACIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN URBANA*.
- AMP OP Y FILTROS*. (n.d.).
- Armonica, D., Ponente, S., & Eugenio Téllez Ramírez, I. (2012). *PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA*.
- Atlas Metropolitano - OPAMSS*. (2021). https://opamss.org/sv/ova_doc/atlas-metropolitano/
- Bueno Muñoz, H. A., & Fajardo Muzo, M. V. (2013). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA ELIMINACION DE ARMÓNICOS DE UNA RED BIFÁSICA RESIDENCIAL AUTORES*.
- Datos técnicos Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke*. (n.d.). <https://www.fluke.com/es-sv/product/electrical-testing/power-quality/434-435>
- Decreto 762 Ley Especial para restauracion de departamentos municipios y distritos municipales*. (2024).
- DELSUR (2024).
- EN50160*. (2001).
- Geoportal - OPAMSS*. (2025). <https://opamss.org/sv/geoportal/>
- Google Earth*. (2025). https://earth.google.com/web/search/bocadeli/@13.68689703,-89.14642867,674.20990786a,411.78333566d,35y,0h,0t,0r/data=CncaSRJDCiUweDhmNjMzNzFiZjg3ZjRhNDU6MHhlNmUwN2E0ODgyYjIwOWNIGVR7x9-sXytAIdQuAVNhSVbAKghib2NhZGVsaRgCIAEiJgokCTL-R-1bitAEUSEewCyaitAGe5l8wB9S1bA1eWx8gKYTFbAQgIIAToDCgEwQgIIAEoNCP_____wEQAA
- Gutierrez, A. (2000). *Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas*.
- Heidi, B., Martinez, C., Carina, Y., Henriquez, C., Ernesto, E., & Recinos, M. (2008). *“Evaluación de las Normas de Calidad del Servicio en los Sistemas de Distribución de SIGET.”*
- IEC. (2008). *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-6, Limits : assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*. International Electrotechnical Commission.

- IEC. (2009). *Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.*
- IEC. (2014). *IEC 61000-3-2.* International Electrotechnical Commission.
- IEC. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30, Testing and measurement techniques--power quality measurement methods = Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-30, Techniques d'essai et de mesure--méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation.* International Electrotechnical Commission.
- IEEE. (1992). *519-1992 Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia.*
- IEEE. (2005). *1100™ IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.*
- IEEE. (2018). *3002.8-2018 - IEEE Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems.* IEEE.
- IEEE. (2022). *519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.* IEEE.
- J. Roberto Ramos López. (n.d.). *Conceptos básicos de medición de potencia.*
- Julián, B., Martínez, V., Por, A., & Francisco González, I. (2009). *TEORÍA DE DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS PARA MITIGACION DE ARMONICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.*
- Mario, M. C., Esparza González, S., Jesús, M. C., Guerrero, A. M., Luis, M. C., & Ramos, A. C. (2006). *Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones Nota de Divulgación.*
- Mora, F. (2008). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS.*
- Oppenheim-Señales y Sistemas-2da edición.* (n.d.).
- Ramos, J., Pocasangre, C., Chevez, L., Martínez, A., Osorto, J., & Escobar, D. (2022). *Third harmonic voltage distortion levels in a urban distribution network in El Salvador.*
- Ramos, J., Salvador, S., Salvador, E., Pocasangre, C., Chévez, L., & Meléndez, W. (n.d.). *XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/\$XX.00 ©20XX IEEE Power Quality Standards and Regulations in El Salvador: Harmonics and Flicker.*
- Ramos López, J. R. (n.d.). *SIMULACIÓN RECTIFICADOR PUENTE MONOFASICO EN LTSPICE - YouTube.* Retrieved March 9, 2025, from <https://www.youtube.com/watch?v=WIVaHk06bvc>

Rene Rodil Gomez, Ulises Edgardo Mendoza Delgado, & Ensor Gustavo Ortiz. (2009). *Diseño y construcción de filtros pasivos de pequeña potencia para la reducción de problemas de distorsión en cargas no lineales.*

Rosero, M., & Orizondo, R. (2023). *REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS CREADOS POR CORRIENTES NO SINUSOIDALES DEBIDO A LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES, MEDIANTE TRANSFORMADORES CON CONEXIÓN EN.*

SIGET. (2014). *NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.*

Velez Valdiviezo Steven Elias. (2023). *REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS A TRAVÉS DE FILTROS ACTIVOS BASADOS EN CONVERTIDORES MULTINIVEL EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.*

ANEXOS

Límites de distorsión armónica de tensión establecidos en la norma EN50160

Las tablas siguientes muestran los límites establecidos de la norma EN50160 en media y baja tensión, al cual no es objeto de estudio en este documento, pero es una norma de referencia para nuestro país.

Tabla 1
Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro,
hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de U_n

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Orden h	Tensión relativa
Orden h	Tensión relativa	Orden h	Tensión relativa		
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

NOTA – Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente débiles y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia, no están indicados en esta tabla.

Tabla 2
Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro,
hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de U_c

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Orden h	Tensión relativa
Orden h	Tensión relativa	Orden h	Tensión relativa		
5	6%	3	5%*	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

* Según el diseño de la red, el valor armónico de orden tres puede ser mucho más bajo.

NOTA – Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente débiles y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia, no están indicados en esta tabla.