



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Estudio de armónicos y potencia reactiva en Southern
Perú para mejorar la calidad de energía mediante
filtro activo de armónicos**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

Cristian Jesús NIETO MORALES

ASESOR

Dr. Luis Mark Rudy PONCE MARTÍNEZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Nieto, C. (2026). *Estudio de armónicos y potencia reactiva en Southern Perú para mejorar la calidad de energía mediante filtro activo de armónicos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Cristian Jesús Nieto Morales
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70801822
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luis Mark Rudy Ponce Martínez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08117818
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9037-6794
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Fernando Jose Oyanguren Ramírez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07566297
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Celso Ysidro Geronimo Huaman
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191500
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Omar Boris Valderrama Campos
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	17410917

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.8 Automatización Industrial
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	Local: Área 1200 - SPCC País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Latitud: -17.2761 Longitud: -70.6232
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2025 – Setiembre 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN

TESIS

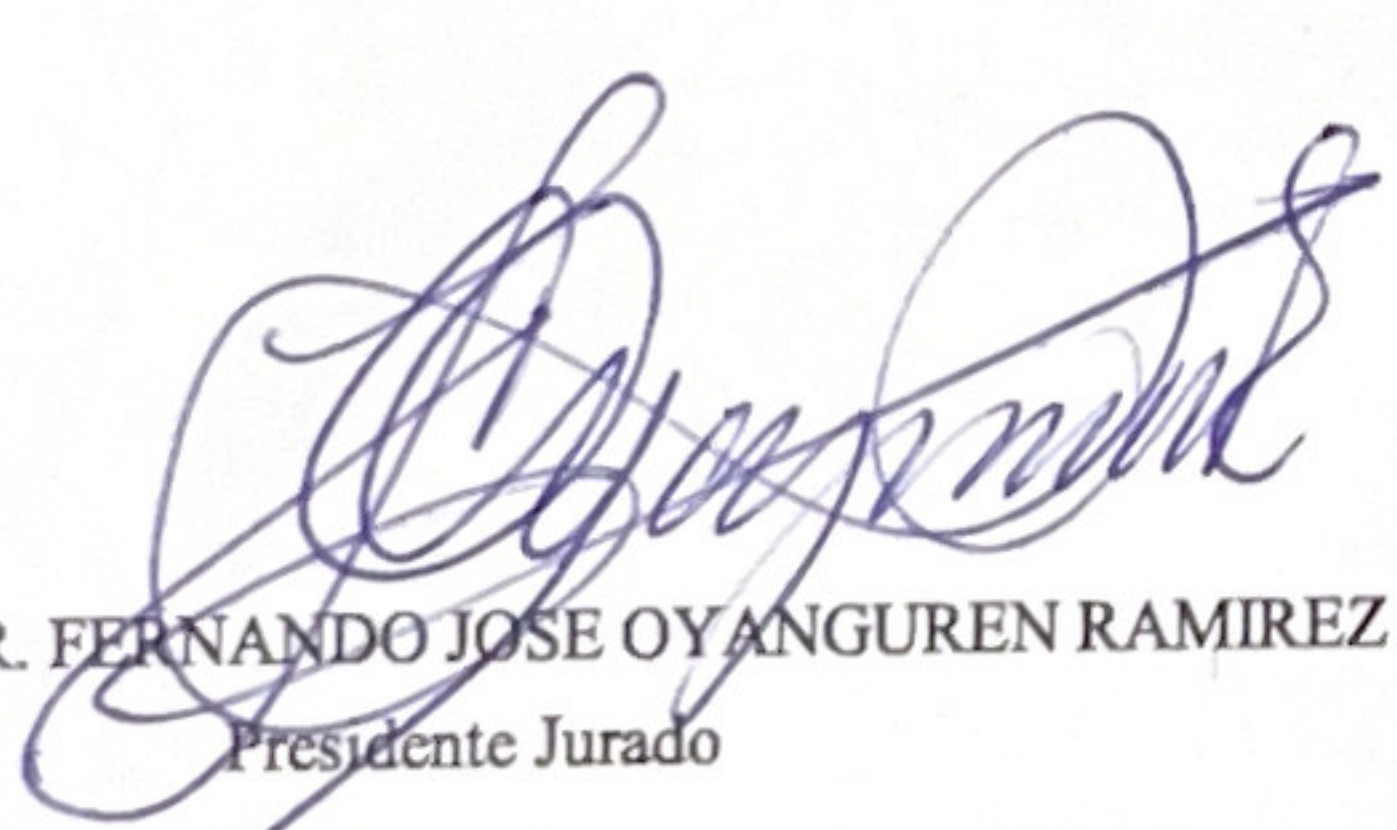
ACTA N°23/FIEE-PPP/2026

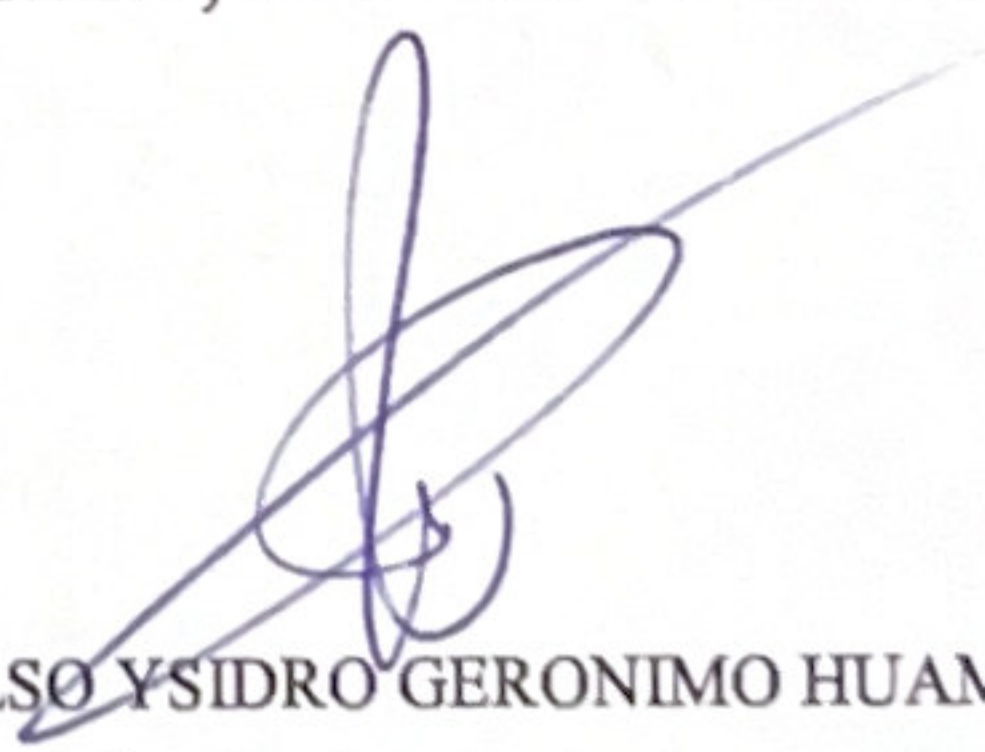
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 17 de abril del 2026, como presidente de Jurado el **DR. FERNANDO JOSE OYANGUREN RAMIREZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **DR. CELSO YSIDRO GERONIMO HUAMAN**, el Miembro de Jurado el **MG. OMAR BORIS VALDERRAMA CAMPOS** y Miembro Asesor el **DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ**.

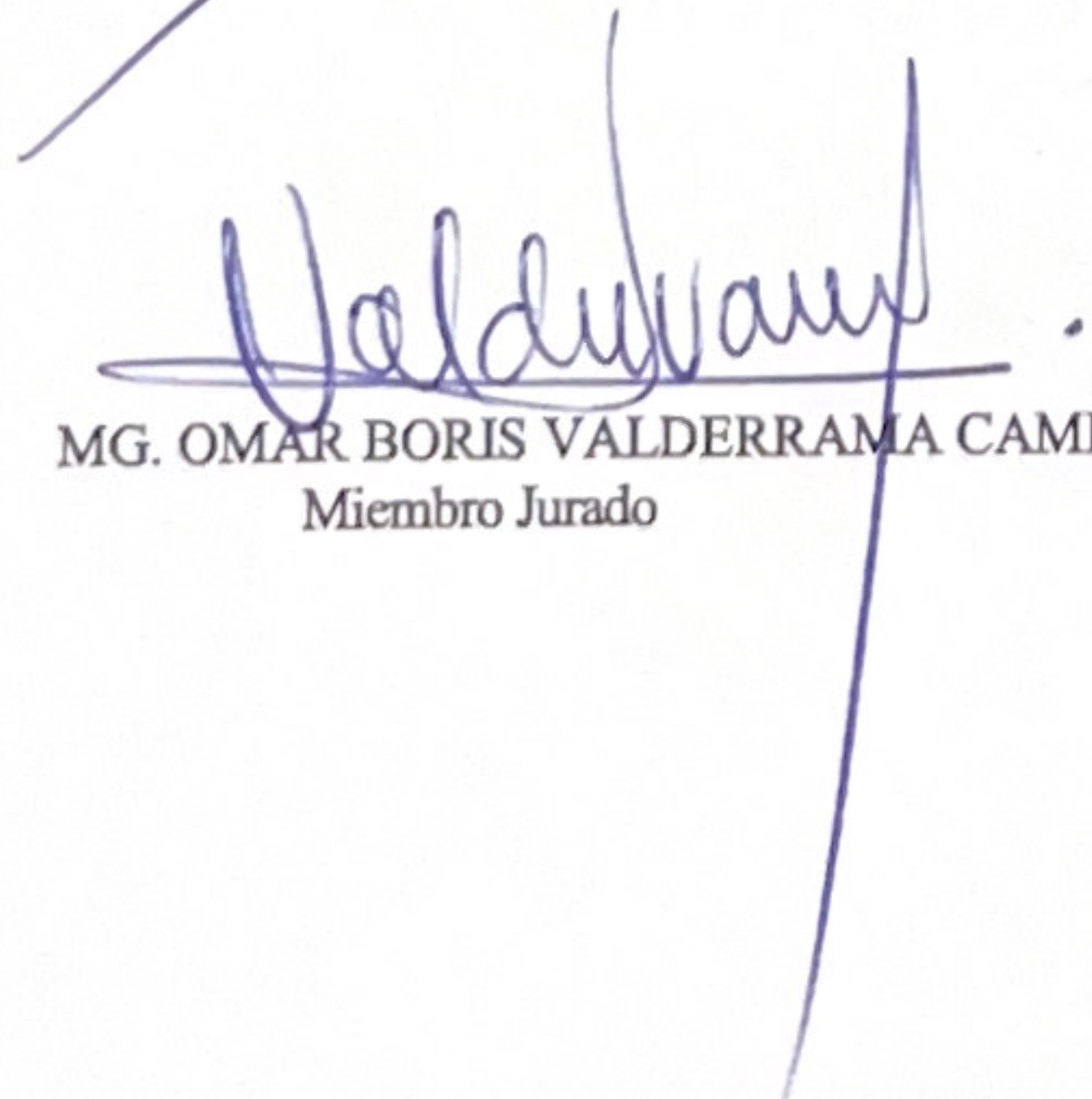
Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis del Bachiller **CRISTIAN JESÚS NIETO MORALES** con código 19190291 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentó la Tesis titulada **ESTUDIO DE ARMÓNICOS Y POTENCIA REACTIVA EN SOUTHERN PERÚ PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS**.

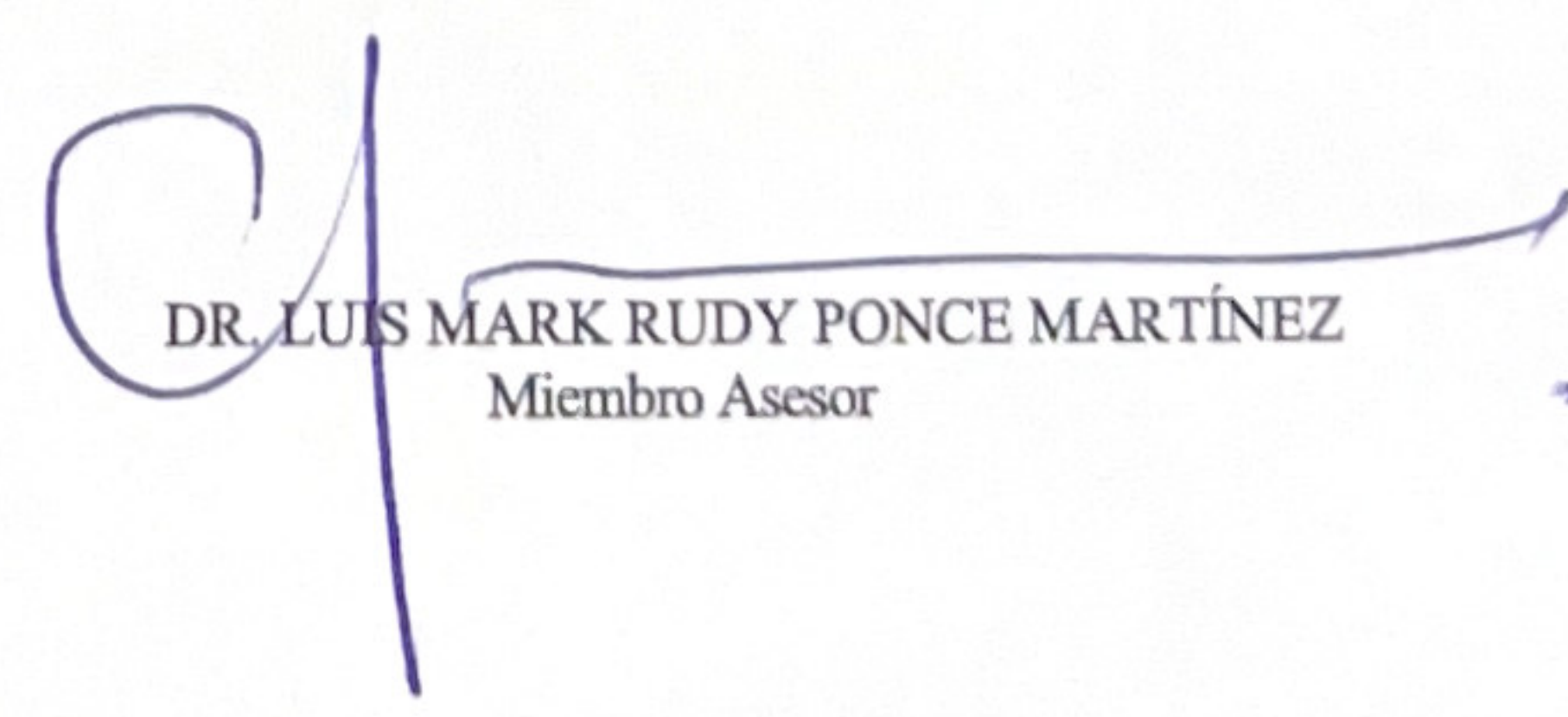
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 16 (dieciséis).

Ciudad Universitaria, 17 de abril del 2026


DR. FERNANDO JOSE OYANGUREN RAMIREZ
Presidente Jurado


DR. CELSO YSIDRO GERONIMO HUAMAN
Miembro Jurado


MG. OMAR BORIS VALDERRAMA CAMPOS
Miembro Jurado


DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°26/FIEE-PPP/2026 de la Tesis titulada **ESTUDIO DE ARMÓNICOS Y POTENCIA REACTIVA EN SOUTHERN PERÚ PARA MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS**, presentado por el bachiller **CRISTIAN JESÚS NIETO MORALES**, para optar el título profesional de Ingeniero Electricista. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 14% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero Electricista.

Lima, 17 de Abril del 2026

Firma del Asesor

DNI: 08117818

Nombres y apellidos del asesor:

LUIS MARK RUDY PONCE MARTÍNEZ

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a mis padres y a mi hermano, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido la base de mis valores, mi fortaleza y mis sueños. Gracias por enseñarme a perseverar, por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí y por acompañarme en cada paso de este camino académico y personal.

A mi pareja, por su paciencia, comprensión y por estar a mi lado en los momentos más exigentes de este proceso. Y a mis amigos, quienes no solo me acompañaron, sino que también me guiaron, compartieron sus conocimientos y me ayudaron a crecer durante esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, institución que me brindó la oportunidad de formarme profesionalmente y que, con su excelencia académica, ha sido fundamental en mi desarrollo personal y técnico.

A mis profesores, quienes con dedicación y exigencia compartieron sus conocimientos y me motivaron a crecer, cuestionar y alcanzar un nivel académico superior.

De igual manera, agradezco a mis amigos y compañeros de trabajo, quienes me guiaron, me enseñaron con paciencia y me acompañaron en momentos clave del aprendizaje práctico. Sus consejos y experiencias fueron esenciales para avanzar y comprender mejor los desafíos del campo profesional.

A mis padres y a mi hermano, por su amor incondicional, su fortaleza y por ser siempre mi mayor apoyo. Gracias por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante y por darme las bases para alcanzar mis metas.

Y a mi pareja, por su comprensión, su cariño y por acompañarme incluso en los momentos más exigentes de este proceso, recordándome siempre la importancia de seguir adelante.

RESUMEN

Esta investigación analiza los armónicos eléctricos y la energía reactiva en el sistema eléctrico de la mina Southern Perú en el área 1200. La calidad de energía se ha visto afectada por la instalación de dispositivos eléctricos y electrónicos, como variadores de frecuencia, motores y transformadores. Durante la puesta en marcha del área 1200, se realizaron mediciones de campo con las cargas aun no operando a su capacidad nominal. Los datos obtenidos, junto con los proporcionados por la mina, fueron procesados con el software Etap, modelando el área para distintos niveles de carga. Los resultados obtenidos mostraron que el Área 1200 incumple con los valores recomendados por la normativa IEEE 519 respecto a la distorsión armónica total y que la demanda de energía reactiva podría generar cobros excesivos por este tipo de energía. Se propone la implementación de un filtro activo de armónicos como solución, para reducir los armónicos y mejorar la potencia reactiva, lo que elevaría el factor de potencia y aumentaría la eficiencia del sistema. El análisis realizado con Etap demuestra la viabilidad técnica y los beneficios operativos de esta solución para la planta minera.

ABSTRACT

This research analyzes electrical harmonics and reactive power in the electrical system of the Southern Copper Corporation mine in Area 1200. Power quality has been affected by the installation of electrical and electronic devices, such as variable frequency drives, motors, and transformers. During the commissioning of Area 1200, field measurements were taken with the loads not yet operating at their nominal capacity. The data obtained, along with data provided by the mine, were processed using ETAP software, modeling the area for different load levels. The results showed that Area 1200 does not meet the values recommended by IEEE 519 regarding total harmonic distortion and that the reactive power demand could lead to excessive charges for this type of energy. The implementation of an active harmonic filter is proposed as a solution to reduce harmonics and improve reactive power, which would raise the power factor and increase system efficiency. The analysis performed with ETAP demonstrates the technical feasibility and operational benefits of this solution for the mining plant.

INDICE GENERAL

CARATULA	i
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE CUADROS	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.2.1 Determinación del Problema	2
1.2.2 Formulación del Problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Importancia y alcance de la investigación	3
1.4.1 Importancia de la investigación	3
1.4.2 Alcances de la investigación	4
1.5 Limitaciones de la investigación	4
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Marco teórico	5
2.1.1 Calidad de energía	5
2.1.2 Armónicos eléctricos	5
2.1.3 Clasificación de armónicos y sus consecuencias	6
2.1.4 Fuentes generadoras de armónicos	7
2.1.5 Filtros de armónicos	8
2.1.6 Ventajas y desventajas de uso de filtro pasivo de armónicos	11

2.1.7	Filtros activos	12
2.1.8	Ventajas y desventajas del uso de filtro activo de armónicos	13
2.1.9	Resonancia armónica	14
2.1.10	Barrido de frecuencia	16
2.1.11	Potencia aparente	16
2.1.12	Potencia activa	17
2.1.13	Potencia reactiva	17
2.1.14	Factor de potencia	18
2.2	Antecedentes del estudio	19
2.2.1	Antecedentes internacionales	19
2.2.2	Antecedentes nacionales	19
2.3	Bases Teóricas	20
2.3.1	Representación de armónicos mediante la serie de Fourier	20
2.3.2	Normativa de armónicos eléctricos	21
2.3.3	Diseño de filtros pasivos simple sintonización	24
2.3.4	Estructura general del Diseño de filtros activos	26
2.3.5	Comparación de las distintas soluciones de mitigación de armónicos	29
2.3.6	Compensación de energía reactiva en sistemas contaminados por armónicos	30
2.3.7	Criterios para determinar la resonancia en un sistema	31
2.3.8	Facturación de energía reactiva contrato de usuarios libres	32
2.4	Definición de términos	32
CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES		38
3.1	Hipótesis	38
3.1.1	Hipótesis general	38
3.1.2	Hipótesis específicas	38
3.2	Variables	38
3.2.1	Variable independiente	38
3.2.2	Variable dependiente	38
3.3	Operacionalización de las Variables	39
CAPÍTULO IV: MATERIALES Y METODOS		40

4.1	Área de estudio	40
4.2	Diseño de la investigación	40
4.3	Población y muestra	41
4.3.1	Población	41
4.3.2	Muestra	42
4.4	Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	42
4.4.1	Procedimientos	42
4.4.2	Técnicas de recolección de datos	43
4.4.3	Instrumentos para la recolección de datos	43
4.5	Análisis estadístico	44
CAPÍTULO V: RESULTADOS		45
5.1	Presentación y análisis de resultados	45
5.1.1	Tiempo de estudio y medición calidad de energía	45
5.1.2	Resultados de medición de calidad de energía	46
5.1.3	Análisis eléctrico del área 1200 con software Etap	75
5.1.4	Análisis para la mitigación de armónicos y reducción de potencia reactiva mediante filtro de armónicos	94
5.1.5	Análisis de escenarios para la selección de la solución de mitigación de armónicos y reducción de potencia reactiva	103
5.1.6	Análisis económico de la propuesta de implementación de un filtro activo	103
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN		109
6.1	Discusión	109
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES		110
7.1	Conclusiones	110
CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES		110
8.1	Recomendaciones	111
CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFIA		112
CAPÍTULO X: ANEXOS		117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Descomposición de onda	5
Figura 2 Secuencia de armónicos eléctricos	6
Figura 3 Filtro pasivo en serie	9
Figura 4 Filtro pasivo en paralelo	10
Figura 5 Filtro pasivo simple sintonización	10
Figura 6 Filtros pasivos pasa altos	11
Figura 7 Filtros activos en serie	12
Figura 8 Filtros activos en paralelo	13
Figura 9 Sistema de potencia	15
Figura 10 Resonancia en paralelo	16
Figura 11 Barrido de frecuencia	16
Figura 12. Potencia aparente	17
Figura 13 Potencia reactiva	18
Figura 14 Límites de tensión armónica recomendados	21
Figura 15 Límites de tensión armónica recomendados	22
Figura 16 Límites de corriente armónica recomendados 120V-69kV	23
Figura 17 Límites de corriente armónica recomendados 69kV-161kV	23
Figura 18 Límites de corriente armónica recomendados >161kV	23
Figura 19 Cálculo de la potencia reactiva a compensar	24
Figura 20 Estructura general de un filtro activo en paralelo	26
Figura 21 Potencia instantánea	29
Figura 22 Comparación y eficiencia de THDi	30
Figura 23 Comparación y eficiencia de THDv	30
Figura 24 Barrido de frecuencia de la magnitud de la impedancia	31
Figura 25 Barrido de frecuencia del ángulo de la impedancia	31
Figura 26 Contrato de Kallpa generación a compañía minera	32

Figura 27 Tarifa de consumo por excesos de energía reactiva	32
Figura 28 Ubicación del proyecto de mina ubicada al sur del Perú	40
Figura 29 Área de estudio	41
Figura 30 Unifilar del área de estudio	42
Figura 31 Esquema de medición de calidad de energía en el Área 1200	44
Figura 32 Unifilar de puntos de medición	45
Figura 33 Equipo de medición instalado en la sala 1100-ER-011 lado 4.16kV	46
Figura 34 Unifilar del lugar de instalación equipo 1	46
Figura 35 Medición de tensiones L-L	47
Figura 36 Medición de corriente de línea	47
Figura 37 Medición de corrientes de secuencia	47
Figura 38 Medición potencias aparente, activa, reactiva $S=P+jQ$	48
Figura 39 Medición registro de factor de potencia	48
Figura 40 Medición THDv	48
Figura 41 Medición THDi	49
Figura 42 Medición HDv	49
Figura 43 Medición HDv (%) – V23	49
Figura 44 Medición HDv (%) – V31	50
Figura 45 Medición HDi (%) I1	50
Figura 46 Medición HDi (%) I2	50
Figura 47 Medición HDi (%) I3	51
Figura 48 Análisis estadístico de (HDv) de tensión en equipo 1	52
Figura 49 Análisis estadístico de (HDi) en equipo 1	53
Figura 50 Equipo de medición instalado en sala 1100-ER-011-13.8kV	54
Figura 51 Unifilar del lugar de instalación equipo 1A	54
Figura 52 Medición de corriente de línea	55
Figura 53 Medición THDi	55
Figura 54 Medición HDi (%) I1	55
Figura 55 Medición HDi (%) I2	56
Figura 56 Medición HDi (%) I3	56
Figura 57 Análisis estadístico de (HDi) en equipo 1A - L1	58

Figura 58 Análisis estadístico de (H _{Di}) en equipo 1A - L2	58
Figura 59 Análisis estadístico de (H _{Di}) en equipo 1A - L3	58
Figura 60 Equipo de medición en el VFD 1140HP	59
Figura 61 Unifilar del lugar de instalación equipo 2	59
Figura 62 Medición de tensiones L-L	60
Figura 63 Medición de corriente de línea	60
Figura 64 Medición de corriente de secuencia	60
Figura 65 Medición potencias aparente, activa, reactiva $S=P+jQ$	61
Figura 66 Medición registro de factor de potencia	61
Figura 67 Medición THD _v (%)	61
Figura 68 Medición THD _i (%)	62
Figura 69 Medición HD _v	62
Figura 70 Medición HD _i	63
Figura 71 Análisis estadístico de (HD _v) en equipo 2	65
Figura 72 Análisis estadístico de (H _{Di}) en equipo 2	66
Figura 73 Equipo de medición en el S.E Totoral	67
Figura 74 Unifilar del lugar de instalación equipo 3	67
Figura 75 Medición de tensiones L-L	68
Figura 76 Medición de corriente de línea	68
Figura 77 Medición de corriente de secuencia	68
Figura 78 Medición potencias aparente, activa, reactiva $S=P+jQ$	69
Figura 79 Medición registro de factor de potencia	69
Figura 80 Medición THD _v	69
Figura 81 Medición THD _i	70
Figura 82 Medición HD _v	70
Figura 83 Medición HD _i	71
Figura 84 Análisis estadístico de (HD _v) en equipo 3	73
Figura 85 Análisis estadístico de (H _{Di}) en equipo 3	74
Figura 86 S.E Totoral	76
Figura 87 Sistema scada de conexión a la red 138kV	76
Figura 88 Alimentación desde el transformador LT1	77
Figura 89 Alimentación desde el transformador LT2	78

Figura 90 Escenario de simulación	79
Figura 91 Puntos de acoplamiento común (PCC)	79
Figura 92 HDv –SE TOTORAL 13.8kv	80
Figura 93 Espectro de armónicos de tensión en S.E totoral lado 13.8kv	80
Figura 94 VFD 1140HP sala 1200-ER-021	82
Figura 95 Capacitor de entrada VFD 1140HP sala 1200-ER-021	83
Figura 96 Reactor de entrada VFD 1140HP sala1200-ER-021	83
Figura 97 Datasheet de variador con rectificador PWM	84
Figura 98 Diagrama eléctrico VFD 1140HP sala 1200-ER-021	84
Figura 99 Espectro de armónicos en VFD 1140HP sala 1200-ER- 021	85
Figura 100 Capacitor de entrada VFD 1140HP sala 1200-ER-021	85
Figura 101 Reactor de entrada VFD 1140HP sala1200-ER-021	86
Figura 102 Resultados simulación régimen armónico-motores al 25%	87
Figura 103 Barrido de frecuencia MCC MT Tag: 1100-MC-012	87
Figura 104 HDi - MCC MT Tag: 1100-MC-012	87
Figura 105 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1200-MC-021	88
Figura 106 HDI - MCC MT Tag: 1200-MC-021	88
Figura 107 Resultados simulación régimen armónico-motores al 50%	89
Figura 108 Barrido de frecuencia MCC MT Tag: 1100-MC-012	89
Figura 109 HDi - MCC MT Tag: 1100-MC-012	89
Figura 110 Barrido de frecuencia MCC MT Tag: 1200-MC-021	90
Figura 111 HDi - MCC MT Tag: 1200-MC-021	90
Figura 112 Resultados simulación régimen armónico-motores al 90%	91
Figura 113 Barrido de frecuencia MCC MT Tag: 1100-MC-012	91
Figura 114 HDi - MCC MT Tag: 1100-MC-012	91
Figura 115 Barrido de frecuencia MCC MT Tag: 1200-MC-021	92
Figura 116 HDi - MCC MT Tag: 1200-MC-021	92
Figura 117 Flujo de potencia en punto de conexión al sistema	93
Figura 118 Flujo de potencia en área de estudio	93
Figura 119 Flujo de potencia en Etap	94
Figura 120 Magnitud de la corriente	95
Figura 121 Cálculo de filtro pasivo de armónicos	95

Figura 122 Resultados del capacitor, inductor y resistencia	96
Figura 123 Incorporación de un filtro pasivo	98
Figura 124 Distorsión armónica de corriente en PCC sala 1100-ER-011 con el uso del filtro pasivo de 5ta armónica	99
Figura 125 Distorsión armónica de corriente en sala 1200-ER-021 con el uso del filtro pasivo de 5ta armónica	99
Figura 126 Filtro de activo de armónicos	100
Figura 127 Resultados de la simulación con la incorporación de un filtro activo	101
Figura 128 Distorsión armónica de corriente en PCC sala 1100-ER-011 con el uso del filtro activo	101
Figura 129 Distorsión armónica de corriente en sala 1200-ER-021 con el uso del filtro activo	102
Figura 130 Factor de potencia con la incorporación del filtro activo en el PCC Sala 1100-ER-011	102
Figura 131 Potencia activa y reactiva en el punto de conexión al sistema con la incorporación del filtro activo	103
Figura 132 Hoja de datos del filtro activo de armónicos	117
Figura 133 Planos unifilares de la mina Southern Perú (1/3)	118
Figura 134 Planos unifilares de la mina Southern Perú (2/3)	119
Figura 135 Planos unifilares de la mina Southern Perú (3/3)	120
Figura 136 Reporte de medición de los analizadores de redes (1/2)	121
Figura 137 Reporte de medición de los analizadores de redes (2/2)	122
Figura 138 Estructura variador VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021	123

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Definición de términos de la impedancia	33
Cuadro 2 Operacionalización de las Variables	39
Cuadro 3 Analisis estadistico de (THDv) en equipo 1	52
Cuadro 4 Analisis estadistico de (THDi) en equipo 1	53
Cuadro 5 Analisis estadistico de (THDi) en equipo 1A	57
Cuadro 6 Analisis estadistico de (THDv) en equipo 2	64
Cuadro 7 Analisis estadistico de (THDi) en equipo 2	66
Cuadro 8 Analisis estadistico de (THDV) en equipo 3	72
Cuadro 9 Analisis estadistico de (THDi) en equipo 3	74
Cuadro 10 Red equivalente barra 138KV	77
Cuadro 11 Red equivalente barra 13.8KV	77
Cuadro 12 Calculo de I_{sc} / I_L	78
Cuadro 13 Armónicos de tensión fases R, S y T	81
Cuadro 14 Resultados simulación régimen armónico-motores al 25%	86
Cuadro 15 Resultados simulación régimen armónico-motores al 50%	88
Cuadro 16 Resultados simulación régimen armónico-motores al 90%	90
Cuadro 17 Resultados simulación con filtro pasivo de 5ta armónica	98
Cuadro 18 Resultados simulación con filtro activo de armónicos	100
Cuadro 19 Analisis comparativo de mitigación de armonicos en PCC	104
Cuadro 20 Analisis comparativo de reducción de potencia reactiva en PCC	105
Cuadro 21 Analisis comparativo de reducción de sobrecalentamiento en PCC	106

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la actualidad las principales minas del Perú usan sistemas eléctricos modernos para asegurar la continuidad de su producción. Pero el uso de estos equipos eléctricos y electrónicos de potencia que nos ayudan a la automatización provocan el incremento de armónicos en la red eléctrica y gran consumo de la potencia reactiva. Los armónicos eléctricos disminuyen la vida útil de los equipos eléctricos usados en mina ya que causan el sobrecalentamiento de los equipos eléctricos, mayor demanda de corriente eléctrica, y también el gran consumo de potencia reactiva causa mayor consumo de potencia aparente, sobrecarga en los cables, sobrecarga en transformadores y multas de calidad de energía.

La mina Southern Perú, en las mediciones de energía realizadas en la etapa de puesta en marcha del Área 1200 se verificó una gran distorsión armónica y problemas con el consumo de la energía reactiva, el equipo causante de esta distorsión armónica fue un variador de MT ubicado en área 1200 y los equipos causantes del alto consumo de energía reactiva fueron los motores instalados en el Área 1200, esto causa inestabilidad e inseguridad de las operaciones de la red eléctrica de la planta minera. Para solucionar este problema se hace la propuesta del uso de filtros activos de armónicos para ofrecer una solución moderna y eficaz. El filtro activo de armónicos reduce considerablemente los armónicos y mejora el factor de potencia mediante la inyección de corrientes inversas compensatorias y la compensación de potencia reactiva, con esto el filtro activo de armónicos logra mejorar la calidad de energía entregada a la red eléctrica de la unidad minera, para validar esta propuesta se llevará a cabo un estudio de armónicos y potencia reactiva mediante la simulación del funcionamiento de la red eléctrica del Área 1200 de la unidad minera con en el software Etap.

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Determinación del Problema

En la mina Southern Perú en el área 1200 durante la puesta en marcha de los motores y variadores de media tensión se encontraron armónicos eléctricos y gran consumo de potencia reactiva. Los armónicos y el gran consumo de potencia reactiva que se generan a través de variadores y motores deterioran la calidad de energía de la red eléctrica de la unidad minera afectando tanto al propio variador MT causante de los armónicos como a otros equipos conectados a la misma red eléctrica. Debido a esto con los resultados obtenidos en campo durante la puesta en marcha del área 1200 se necesita realizar un estudio de armónicos y potencia reactiva con el objetivo de identificar la cantidad de armónicos y la cantidad de potencia reactiva que aporta el área 1200 cuando esté funcionando a plena carga.

1.2.2 Formulación del Problema

1.2.2.1 Problema general

¿En qué medida realizar un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementar un filtro activo de armónicos, serán factores determinantes para Mejorar la calidad de energía en el Área 1200 de Southern Perú?

1.2.2.2 Problemas específicos

¿En qué medida realizar un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementar un filtro activo de armónicos serán factores determinantes para cumplir las normas de calidad de energía?

¿En qué medida realizar un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementar un filtro activo de armónicos serán factores determinantes para reducir el sobrecalentamiento de los equipos eléctricos?

¿En qué medida realizar un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementar un filtro activo de armónicos serán factores determinantes para evitar multas por baja calidad de energía?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Mejorar Calidad de energía eléctrica en el área 1200 de la mina Southern Perú.

1.3.2 Objetivos específicos

Reducir el sobrecalentamiento de los equipos eléctricos.

Cumplir las normas de calidad de energía eléctrica.

Evitar multas por baja calidad de energía.

1.4 Importancia y alcance de la investigación

1.4.1 Importancia de la investigación

Esta investigación se realiza con el fin de abordar los problemas críticos que afectan la calidad de energía eléctrica en el sector minero como los armónicos eléctricos y potencia reactiva. La creciente modernización de la minería mediante equipos eléctricos y electrónicos. están generando grandes distorsiones armónicas y en conjunto con un consumo elevado de potencia reactiva que usan los equipos como motores y transformadores afectan a la estabilidad de la red eléctrica minera. Las armónicas y el consumo elevado de potencia reactiva generan mayor consumo de corriente y sobrecalentamiento en transformadores, motores y cables, multas de calidad de energía y en general un mal funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos. Esta investigación realiza un estudio de armónicos y potencia reactiva en el Área 1200 con mediciones realizadas en campo y simuladas en el software Etap para su análisis, al realizar este estudio nos permitió obtener los niveles de distorsión armónica y consumo de potencia reactiva en el área 1200. La solución se centra en implementar un Filtro Activo de Armónicos para mejorar la calidad de energía eléctrica, cumplir con la normativa de calidad IEEE 519 y evitar multas por mala calidad de energía. Esta investigación no solo mejora la eficiencia y estabilidad de una red eléctrica minera, sino que también impulsa una adopción de tecnologías modernas de filtro activo de armónicos para otras unidades mineras, con esto logrando la sostenibilidad del sector minero peruano.

1.4.2 Alcances de la investigación

Esta investigación realiza un análisis de la calidad de energía con mediciones obtenidas durante la puesta en marcha y simulaciones del sistema eléctrico con apoyo del software ETAP permitiendo reproducir condiciones reales y verificar resultados obtenidos enfocándose en los armónicos eléctricos y potencia reactiva de la mina Southern Perú, centrándose específicamente en el área 1200 que se compone de las salas eléctricas 1100-ER-011, 1200-ER-021 y la S.E Totoral. En estas salas eléctricas se analizará la distorsión armónica y consumo de potencia reactiva generada por las cargas no lineales y lineales respectivamente. Como eje de la investigación se propone la implementación de un filtro activo de armónicos definiendo su ubicación y características que tendrá el equipo para mitigar los armónicos y controlar la potencia reactiva que estén afectando a esta red descrita con el fin de cumplir con la normativa IEEE 519 y evitar multas de calidad de energía. Esta investigación se delimita geográficamente en las instalaciones mencionadas de la mina Southern Perú sin incluir otras áreas y el enfoque tecnológico se centra en la aplicación moderna de Filtro Activo de Armónicos sin considerar modificaciones en la distribución de la red eléctrica existente.

1.5 Limitaciones de la investigación

El análisis se desarrolló con base en la información proporcionada por la unidad minera y en mediciones realizadas en campo durante la etapa de puesta en marcha del Área 1200. Dichas mediciones se efectuaron bajo condiciones de operación con cargas menores al 50% de la capacidad nominal, por lo que el estudio se complementó mediante modelamiento y simulación en el software Etap para evaluar el comportamiento del sistema a carga nominal y determinar la alternativa de solución más adecuada. La investigación se orienta al análisis de diferentes alternativas para mejorar la calidad de energía en el Área 1200, proponiéndose como solución óptima la implementación de un filtro activo de armónicos. Su factibilidad técnica será evaluada exclusivamente mediante simulaciones, sin contemplar su implementación física en el sistema eléctrico de la unidad minera.

CAPITULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Calidad de energía

La calidad de la energía eléctrica es la capacidad de que el suministro eléctrico pueda mantener características estables y adecuadas, como tensiones equilibradas y sinusoidales, sin fluctuaciones ni interrupciones que puedan afectar el funcionamiento de equipos y procesos (Holguin & Gomez,2010).

2.1.2 Armónicos eléctricos

Los armónicos eléctricos son componentes de una señal de corriente o voltaje cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos son generados por cargas no lineales que en su mayoría son equipos electrónicos y estos pueden causar distorsiones en la forma de onda, afectando el rendimiento de los sistemas eléctricos (Gonzales & Ambuludi,2024).

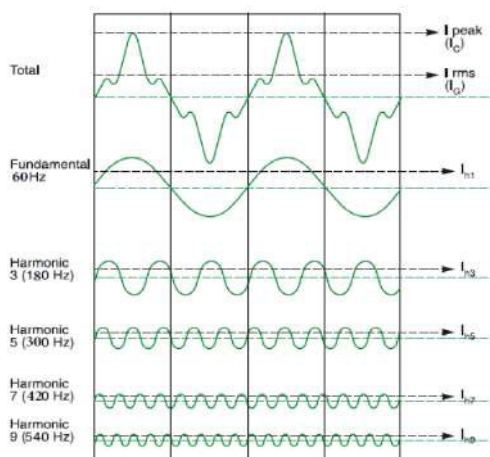


Figura 1 Descomposición de onda. Fuente. Datos tomados de Lodhi et al. (2020).

2.1.3 Clasificación de armónicos y sus consecuencias

Los armónicos se dividen considerando su orden y la frecuencia a la que se presentan. Esta clasificación se basa en el tipo de secuencia que poseen, la cual puede ser positiva, negativa o de secuencia cero, dependiendo de cómo gira el ángulo de fase de cada armónico respecto al componente fundamental del sistema. Asimismo, los armónicos pueden clasificarse en pares e impares según su orden. Los armónicos pares aparecen generalmente cuando existen desequilibrios o componentes de corriente continua, aunque no suelen representar un riesgo significativo. Por su parte, los armónicos impares son los que predominan en sistemas eléctricos industriales y comerciales, siendo los principales responsables de la distorsión en las formas de onda de corriente y tensión, lo cual afecta la eficiencia y estabilidad de la red eléctrica (Chere & Quiroga, 2025).

Nombre	Fundamental	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+

Figura 2 Secuencia de armónicos eléctricos. Fuente. Datos tomados de Carrasquilla (2017).

La secuencia de giro de armónicos se refiere al sentido de rotación de los fasores lo que hace que le dé el sentido de giro del rotor de un motor al ser excitado. La secuencia positiva (+) indica un giro horario del motor, la secuencia negativa (-) un giro antihorario del motor, y la secuencia cero (0) representa que no hay rotación del motor. Según el tipo de secuencia y rotación, los armónicos pueden generar distintos efectos como los de secuencia positiva producen calentamiento en los conductores y daños en los circuitos; los de secuencia negativa generan un freno al motor y provocan calentamiento del motor que pueden llegar a quemarlos; y los de secuencia cero, conocidos como triplens, se suman en el neutro de sistemas ocasionando también sobrecalentamientos (Carrasquilla,2017).

2.1.4 Fuentes generadoras de armónicos

Las fuentes que producen armónicos pueden clasificarse en tres grupos según su naturaleza del dispositivo y la forma en que distorsionan la onda:

2.1.4.1 Dispositivos ferromagnéticos

2.1.4.1.1 Transformadores

Cuando el transformador se encuentra cerca del punto de saturación del núcleo, los transformadores distorsionan la corriente magnetizante lo que genera armónicos impares como los son el tercero, quinto y séptimo. Además, si existen desequilibrios entre fases o conexiones en el interior del transformador no hechas del todo bien, los armónicos de secuencia cero pueden circular por el neutro, causando sobrecalentamientos y pérdidas adicionales (Quintana, 1996).

2.1.4.1.2 Maquinas rotativas

Los generadores y motores de corriente alterna también producen armónicos debido a la no linealidad del entrehierro magnético, el desequilibrio en el bobinado, o defectos en el flujo rotacional. Estos armónicos se reflejan en la tensión de salida y pueden afectar tanto el rendimiento como la eficiencia de las máquinas eléctricas (Quintana, 1996).

2.1.4.2 Dispositivos de arco

2.1.4.2.1 Hornos de arco

Los hornos de arco utilizan un arco eléctrico para fundir materiales metálicos, lo cual genera corrientes muy altas y distorsionadas con alto contenido armónico. El arco siempre está cambiando en su longitud y resistencia, lo que produce cambios bruscos en la corriente y la tensión del sistema lo que afecta la calidad de energía e introduciendo armónicos de bajo orden (Quintana, 1996).

2.1.4.2.2 Alumbrado fluorescente

Las lámparas fluorescentes inducen armónicas principalmente de orden impar (3° , 5° , 7°). Esto se debe al comportamiento no lineal, En

sistemas con un gran número de luminarias, la distorsión armónica puede ser muy grande y esto afecta a la red y a los equipos conectados a la misma red (Quintana, 1996).

2.1.4.3 Convertidores electrónicos de potencia

2.1.4.3.1 Grandes convertidores de potencia

Se usan en sistemas de transmisión HVDC como accionamientos de motores industriales y sistemas de tracción eléctrica. Estos equipos generan armónicos de bajo orden que pueden propagarse a largas distancias y afectar redes completas si no se instalan filtros adecuados. Asimismo, su operación basada en electrónica de potencia puede incrementar significativamente la distorsión armónica total (THD) del sistema eléctrico. (Quintana, 1996).

2.1.4.3.2 Medianos convertidores de potencia

Se usan en procesos industriales intermedios y en accionamientos de bombas o compresores. Suelen generar armónicos de orden medio, y su impacto en la red del sistema depende del número de pulsos del convertidor (por ejemplo, 6, 12 o 24 pulsos) (Quintana, 1996).

2.1.4.3.3 Pequeños convertidores de potencia

Estos son electrónicos, computadoras personales, televisores, cargadores, etc. Aunque su potencia individual es baja, su uso masivo produce una distorsión armónica significativa en redes de baja tensión (Quintana, 1996).

2.1.5 Filtros de armónicos.

Un filtro armónico pasivos es un dispositivo utilizado en sistemas eléctricos para reducir la distorsión armónica causada por cargas no lineales, como rectificadores y soldadores de arco. Estos filtros desvían parte de la corriente armónica hacia el filtro, evitando que esta corriente fluya hacia el sistema eléctrico, lo que ayuda a prevenir daños en los equipos y mejora la calidad de la energía. Un filtro armónico en derivación simple se puede construir utilizando un circuito LC, aunque versiones más complejas pueden incluir múltiples circuitos LC o incluso resistores. (IEEE Std 1531, 2020).

2.1.5.1 Tipos de filtros de armónicos

2.1.5.1.1 Filtros pasivos en serie.

Los filtros pasivos en serie se impiden el paso de las componentes de las corrientes armónicas hacia partes del sistema eléctrico, creando una alta impedancia en la frecuencia específica del armónico que se desea suprimir. Están formados por un inductor y un capacitor dispuestos en paralelo, conectados en serie con la línea o la carga, lo que les permite bloquear el flujo de corriente armónica desde la fuente de distorsión hacia la red de potencia. Gracias a este comportamiento, se utilizan como una barrera protectora que evita la propagación de armónicos y contribuye a mantener la calidad de energía en el sistema (Mendoza, 2015).

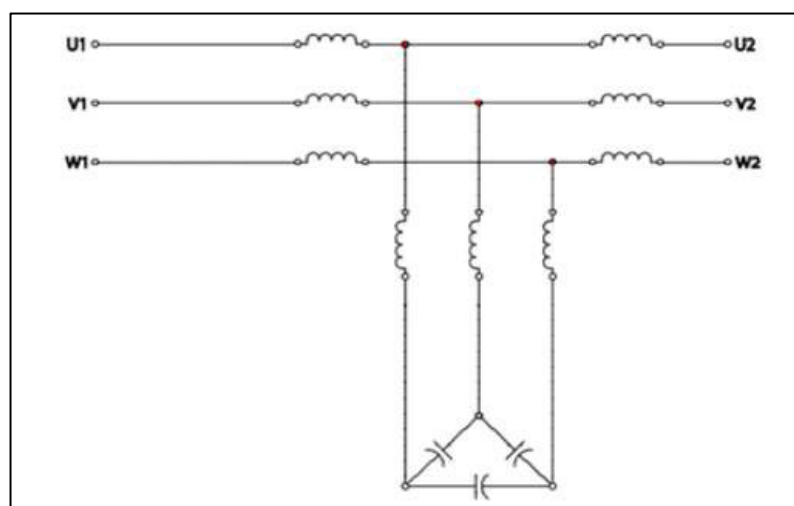


Figura 3 Filtro pasivo en serie. Fuente. Datos tomados de Persson (2014).

2.1.5.1.2 Filtros pasivos en paralelo

Los filtros pasivos en paralelo al sistema proporcionan un camino adicional para la corriente armónica este camino es de baja impedancia para las componentes de las corrientes armónicas desviándolas de la red del sistema hacia el filtro RLC conectados en paralelo con la fuente de alimentación. Este tipo de filtro cuenta menos que el filtro en serie porque solo pasan las corrientes para las que fue diseñado también debido a su diseño aporta potencia reactiva al sistema, estos filtros pasivos en paralelo se subdividen en dos tipos que son filtro pasivo sintonizado simple y filtro pasivo paso alto (Quispe, 2021).

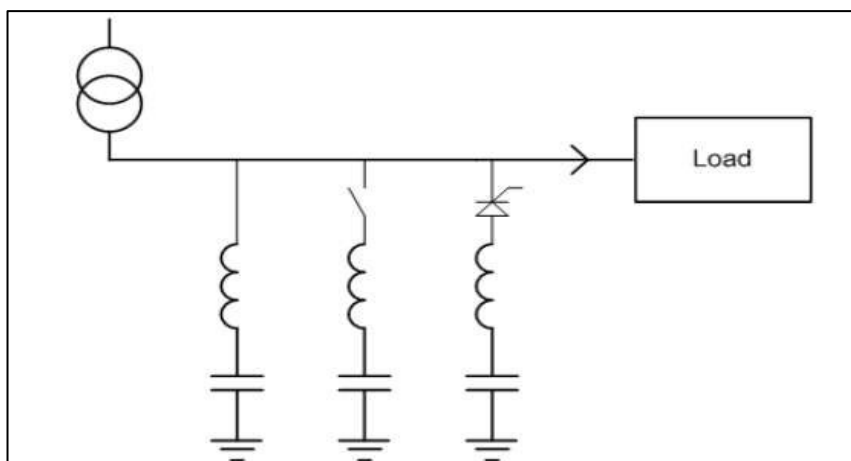


Figura 4 Filtro pasivo en paralelo. Fuente. Datos tomados de Persson (2014).

2.1.5.1.3 Filtros pasivos de simple sintonización

Este tipo de filtro se usa para eliminar una armónica en específico que está presente en el sistema eléctrico.

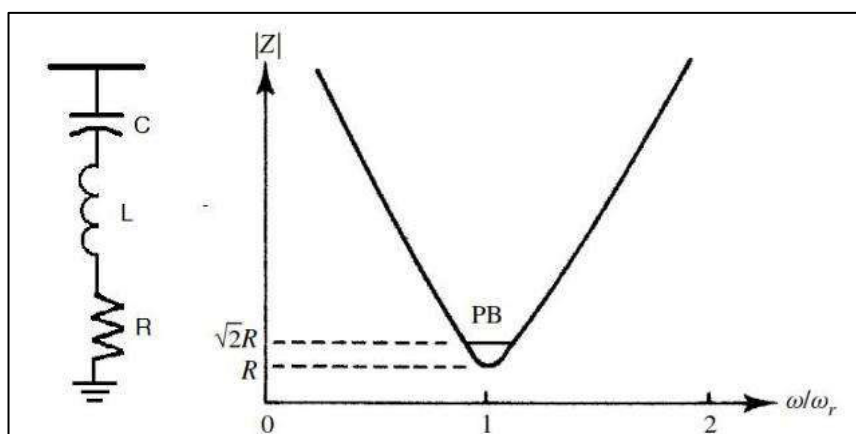


Figura 5 Filtro pasivo simple sintonización. Fuente. Datos tomados de Hernández (2018).

2.1.5.1.4 Filtros pasivos pasa altos

Estos filtros se usan para eliminar varias frecuencias armónicas cuando en el sistema eléctrico hay presencia de distintas frecuencias armónicas, este filtro se diseña para una frecuencia específica, pero debido a su resistencia incorporada actúa como un amortiguador para las frecuencias superiores a la que fue diseñada y logra también filtrar esas frecuencias armónicas superiores presentes en el sistema (Aranda, 2015).

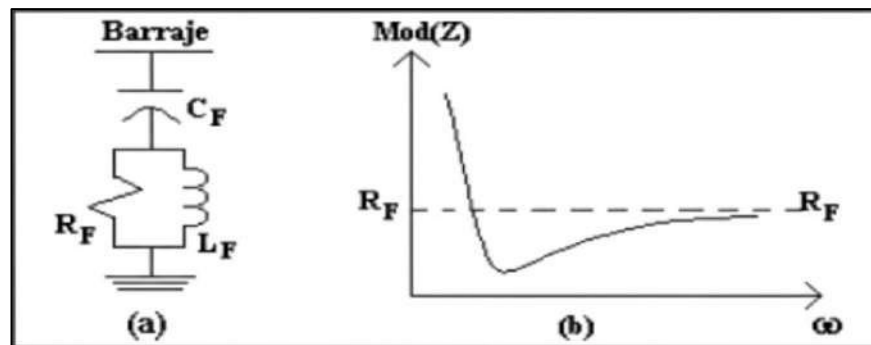


Figura 6 Filtros pasivos pasa altos. Fuente. Datos tomados de Aranda (2015).

Es útil para sintonizar armónicas de frecuencias superiores, como la séptima o la undécima. Este filtro puede amortiguar eficazmente las oscilaciones de alta frecuencia. El resistor puede ajustarse para amortiguar armónicas más bajas, pero no se recomienda su uso para filtrar por debajo de la quinta armónica (IEEE Std 1531, 2020).

2.1.6 Ventajas y desventajas del uso de filtro pasivo de armónicos

2.1.6.1 Filtros pasivos en serie:

Ventajas: Compensación de armónicos más eficaz que una bobina de choque de línea, Reduce significativamente la distorsión de corriente y Protege el rectificador (Persson,2014).

Desventajas: Puede sobrecargarse, No es flexible, Puede provocar un factor de potencia capacitivo, Debe soportar la corriente total de la carga no solo los armónicos y Es imposible controlar la corriente de arranque (Persson,2014).

2.1.6.2 Filtros pasivos en paralelo:

Ventajas: Compensación de armónicos más eficaz que una bobina de choque de línea, Posibilidad de modernización (Persson,2014).

Desventajas: Posible sobrecarga, Inflexible, Sensible a las condiciones de la red eléctrica, Interactúa con otras cargas pasivas, Interactúa con la calidad de la energía de la red, Impacto en la tensión difícil de determinar, Interacción con la red impredecible y, en muchos casos, poco intuitiva (Persson,2014).

2.1.7 Filtros activos

Los Filtros Activos de Potencia (FAP) constituyen una solución avanzada para el mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en sistemas industriales y comerciales. Su función principal es eliminar o compensar las corrientes armónicas y la potencia reactiva generadas por las cargas no lineales conectadas al sistema (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.1.7.1 Tipos de filtros activos

2.1.7.1.1 Filtros activos en serie

Este filtro activo se conecta en serie con el sistema eléctrico. función principal es generar una tensión que sea igual en magnitud, pero opuesta en fase a la perturbación existente en la red, de modo que las distorsiones de la red no afecten a la carga. Este tipo de filtro se utiliza principalmente para corregir desequilibrios y variaciones de tensión (sags, huecos o picos). Actúa inyectando una tensión controlada en serie con la línea de alimentación, funcionando como una fuente de tensión compensadora que mantiene estable la tensión del lado de la carga (Reyes, 2005).

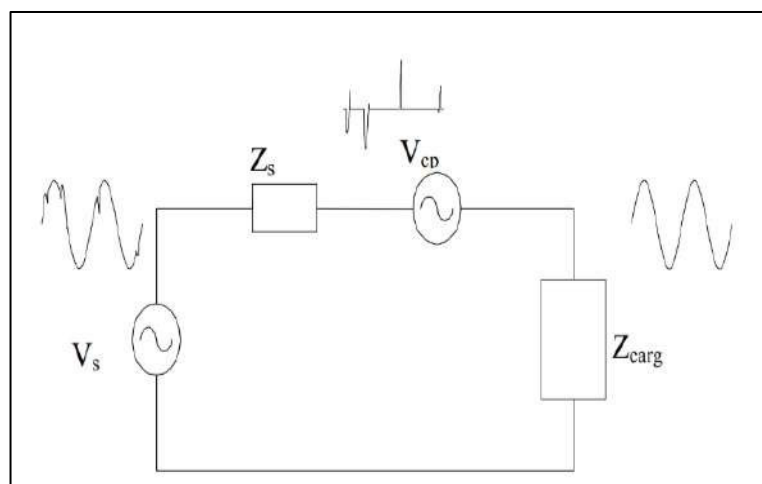


Figura 7 Filtros activos en serie. Fuente. Datos tomados de Reyes (2005).

2.1.7.1.2 Filtros activos en paralelo

El filtro activo en paralelo sirve para compensar las corrientes armónicas generadas por la carga, mediante la inyección de una corriente de igual magnitud, pero de fase opuesta a la distorsión presente. De este modo, se logra que la red eléctrica únicamente suministre la componente

fundamental de la corriente. En esta configuración, el filtro se comporta como una fuente de corriente controlada que introduce las componentes armónicas necesarias para cancelar las generadas por la carga. Para ello, el sistema realiza una medición continua de las corrientes en cada fase, extrayendo la parte armónica de la señal, que sirve como referencia de compensación. Con este proceso, en el punto de acoplamiento común (PAC), las corrientes armónicas se reducen prácticamente a cero, consiguiendo que las corrientes del sistema de alimentación sean sinusoidales (Reyes,2005).

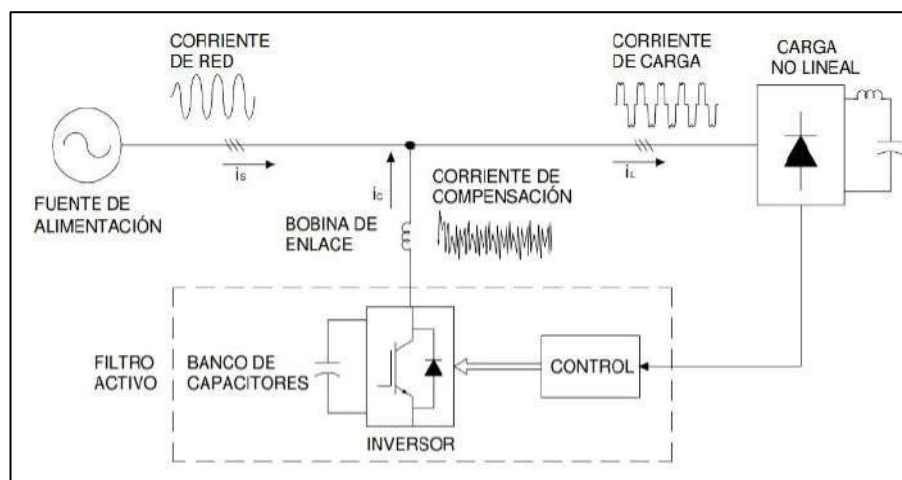


Figura 8 Filtros activos en paralelo. Fuente. Datos tomados de Reyes (2005).

2.1.8 Ventajas y desventajas del uso de filtro activo de armónicos

2.1.8.1 Filtro activo en serie

Ventajas: Supresión muy eficiente de armónicos, Excelente factor de potencia, Capacidad de inyectar energía a la red, Insensible al desequilibrio de la red (Persson,2014).

Desventajas: El rectificador activo debe transmitir la potencia a plena carga, Grande y complejo, La compensación de armónicos está ligada al variador, Ondulación de tensión en el lado de la red, Mayor ondulación de tensión en el lado del motor debido al aumento de tensión, Altas pérdidas, Costoso, Difícil de adaptar, La redundancia prácticamente requiere un bus de CC común, Combinación de filtro LCL y baja frecuencia de conmutación, La interacción con la red es impredecible y, en muchos casos, poco intuitiva (Persson,2014).

2.1.8.2 Filtro activo en paralelo

Ventajas: Compensación más eficiente, Fácil de adaptar, Ajustable al problema específico, Compacto, Permite incorporar redundancia al sistema, Más pequeño que una solución en serie, Menores pérdidas que los filtros multipulso AFE y en serie, Fácil de compensar grupos de cargas diferentes, No se sobrecarga, Puede proporcionar compensación de VAR, Insensible al desequilibrio de la red, Menos ondulación en el conmutador que un AFE (Persson,2014).

Desventajas: Introduce ondulación en el conmutador (Persson,2014).

2.1.9 Resonancia armónica

La resonancia armónica ocurre cuando las reactancias inductivas y capacitivas de un sistema eléctrico se igualan, cuando sucede la resonancia armónica causa amplificación de la corriente o tensión cuando el sistema esta resonando a una frecuencia específica. Hay dos tipos de resonancia en los sistemas eléctricos que son la resonancia serie, que se produce cuando un sistema capacitivo está en serie con sistema inductivo, creando un camino de baja impedancia que facilita el paso de corrientes armónicas; y la resonancia paralela, que se produce cuando el sistema capacitivo se conecta en paralelo con sistema inductivo, esta resonancia paralela aumenta la impedancia y causa fluctuaciones en la tensión y un crecimiento de la corriente (Carbajal, 2007).

$$XL = XC$$

$$XL = (2\pi)(f)(L)$$

$$(2\pi)(f)(L) = \frac{1}{(2\pi)(f)(C)}$$

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)(\sqrt{L)(C)}}$$

2.1.9.1 Resonancia en serie

Se produce una corriente máxima cuando las impedancias inductiva y capacitiva se igualan, La impedancia total se reduce a R, lo que puede resultar

en sobrecargas y daños térmicos Puede dañar equipos debido a la alta corriente.

$$Z = R + j(XL - XC)$$

$$Z = R + j(0)$$

$$Z = R$$

$$\rightarrow I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j(XL - XC)} = \frac{V}{R}$$

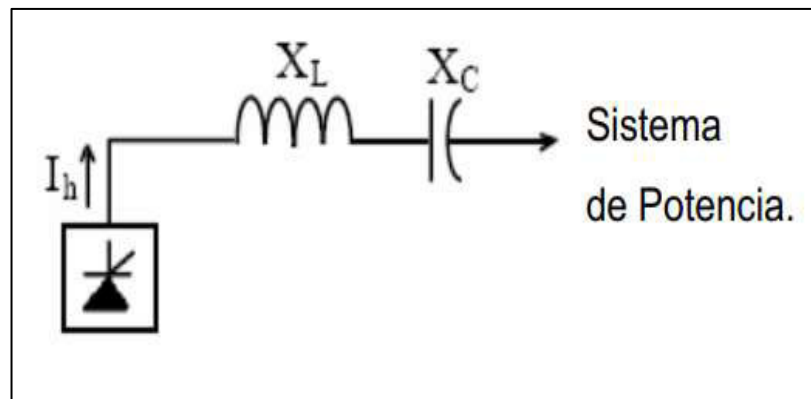


Figura 9 Sistema de potencia. Fuente. Datos tomados de Carbajal (2007).

2.1.9.2 Resonancia en paralelo

se produce una impedancia alta ya que el circuito solo se reduce a R, lo que resulta en una reducción de la corriente en el sistema. Distorsión de la tensión debido a la alta impedancia en resonancia, la tensión en el circuito puede aumentar, causando sobretensiones que afectan a los equipos conectados.

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jXL} + \frac{1}{-jXC}$$

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{R} + 0 + 0$$

$$Z = R$$

$$\rightarrow I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j(XL - XC)} = \frac{V}{R}$$

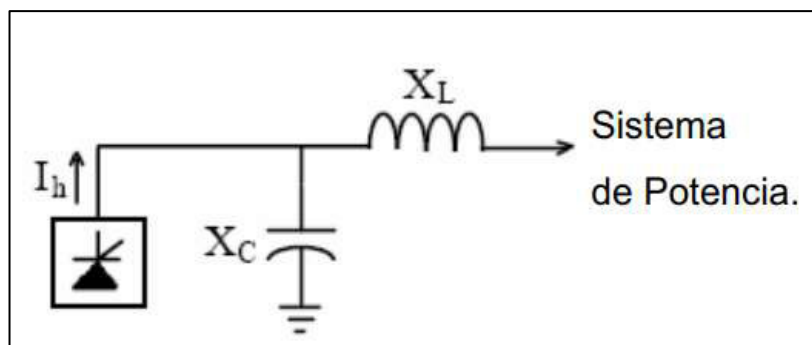


Figura 10 **Resonancia en paralelo.** Fuente. Datos tomados de Carbajal (2007).

2.1.10 Barrido de frecuencia

El barrido de frecuencia es un diagrama de bode de la impedancia versus el orden de los armónicos donde la impedancia cambia de acuerdo a la variación de la frecuencia. (Carbajal, 2007).

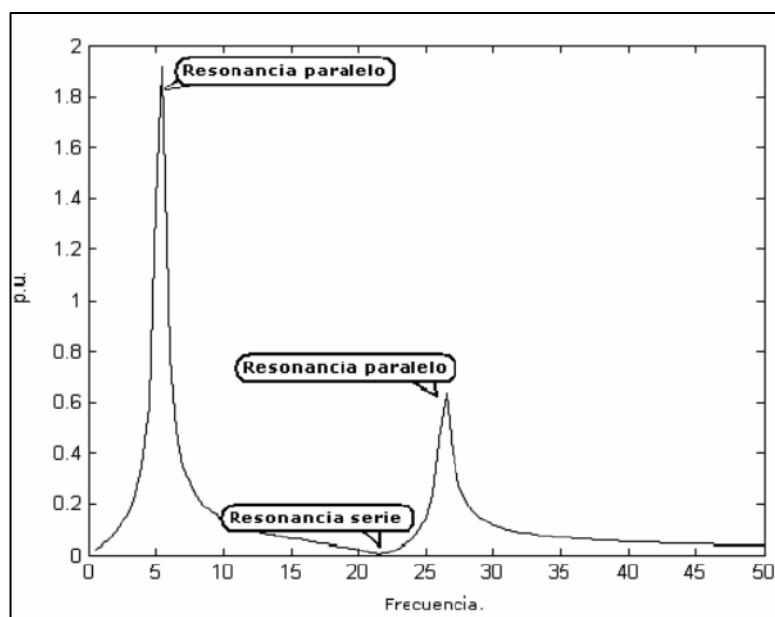


Figura 11 **Barrido de frecuencia.** Fuente. Datos tomados de Carbajal (2007).

2.1.11 Potencia aparente

La potencia aparente es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva. potencia apare es el total de potencia requerida por la carga, es la potencia máxima que pueden entregar maquinas eléctricas como generadores, transformadores y se obtiene mediante la suma vectorial de la

potencia activa y la potencia reactiva. Las unidades de medida de la potencia aparente son kVA o MVA. Se calcula como el vector resultante de sumar la potencia activa y la potencia reactiva (Cutti, 2010).

$$S = (V_{rms})(I_{rms})\angle\alpha$$

$$S = (V_{rms})(I_{rms})(\cos(\alpha) + j\sin(\alpha))$$

$$S = P + jQ$$

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

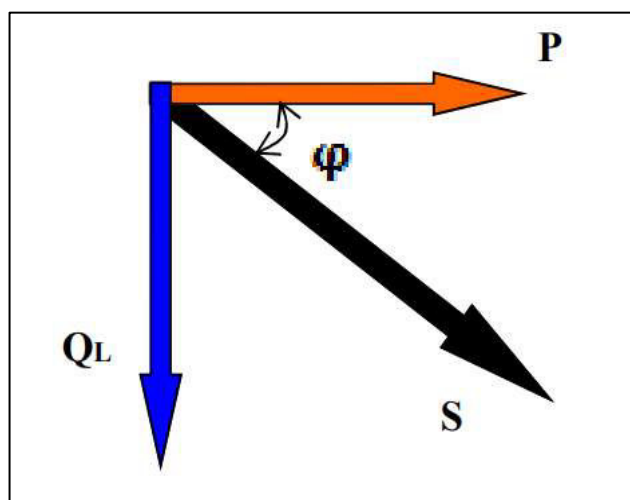


Figura 12. **Potencia aparente.** Fuente. Datos tomados de Cutti (2010).

2.1.12 Potencia activa

La potencia activa es la potencia que usan todas las máquinas eléctricas alimentadas por corriente alternan transforman la energía eléctrica suministrada en trabajo mecánico y/o calor. La potencia activa se mide en kW, donde su función es realizar trabajo útil en la maquina eléctrica, la potencia activa es generada por dispositivos de tipo resistivo (Cutti, 2010).

$$P = \text{Re}\{s\} = (V_{rms})(I_{rms})(\cos(\alpha))$$

2.1.13 Potencia reactiva

Los componentes eléctricos, como motores y transformadores, requieren campos magnéticos para su funcionamiento y utilizan lo que se conoce como energía reactiva. La potencia reactiva crea campos magnéticos y eléctricos, la energía reactiva se origina por el uso de dispositivos inductivos

y capacitivos. Las unidades de medida de la potencia reactiva son kVAR o MVAR. La potencia reactiva, representada por Q , se origina por la componente inductiva Q_L o capacitiva Q_C , la potencia reactiva se representa como un vector desfasado 90° , ya sea en atraso o en adelanto, dependiendo del tipo de componente (Cutti, 2010).

$$Q = \text{Im}\{S\} = (V_{rms})(I_{rms})(\sin(\alpha))$$

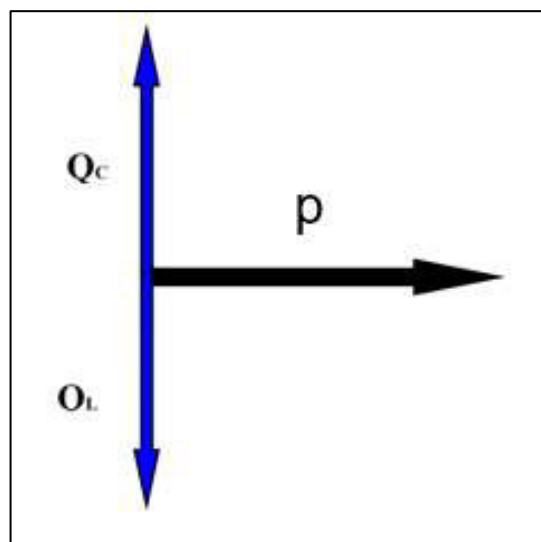


Figura 13 Potencia reactiva. Fuente. Datos tomados de Cutti (2010).

2.1.14 Factor de potencia

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa, que se transforma en trabajo útil, y la potencia aparente requerida por la carga. En una instalación eléctrica, es importante mantener un factor de potencia alto, ya que refleja la eficiencia con la que se utiliza la energía. Un factor de potencia ideal es igual a 1, lo que indica que toda la energía consumida se convierte en trabajo útil. Sin embargo, un factor de potencia menor a 1 significa un mayor consumo de energía para realizar el mismo trabajo. En cargas de tipo resistivo-inductivo, el factor de potencia está en atraso y se denomina inductivo, mientras que en cargas resistivo-capacitivo, el factor de potencia está en adelanto y se denomina capacitivo (Cutti, 2010).

$$FP = \frac{P}{S}$$

$$FP = \cos(\alpha) = \frac{P}{S}$$

2.2 Antecedentes del estudio

2.2.1 Antecedentes internacionales

Lumbreras (2006) desarrolló y evaluó filtros activos de potencia (FAP) como solución simultánea para la compensación de armónicos y potencia reactiva en redes con cargas no lineales, demostrando mediante simulaciones trifásicas y pruebas experimentales con un filtro activo de 40 kVA que estos reducen significativamente los armónicos de corriente, mejoran el factor de potencia y mantienen una corriente casi senoidal incluso ante variaciones rápidas de carga, superando las limitaciones de los filtros pasivos como la resonancia y la baja adaptabilidad.

Corasaniti (2008) analizó y comparó filtros activos puros y configuraciones híbridas en redes de media tensión con cargas industriales no lineales, concluyendo que ambos reducen armónicos y mejoran el factor de potencia, aunque los sistemas híbridos ofrecen un mejor equilibrio entre desempeño y costo, mientras que los filtros activos puros responden de manera más eficiente ante cambios dinámicos de carga.

González Quintero (2002) evidenció que la compensación tradicional de potencia reactiva mediante capacitores resulta inadecuada en sistemas con alta presencia de armónicos debido al riesgo de resonancia y sobrecalentamiento de equipos, proponiendo el uso de filtros activos como una solución integral y dinámica capaz de compensar simultáneamente armónicos y potencia reactiva en tiempo real.

2.2.2. Antecedentes nacionales

Campos Bravo (2009) demostró que los filtros activos de potencia superan a los filtros pasivos tradicionales en sistemas industriales con cargas no lineales, ya que permiten la compensación dinámica de armónicos y potencia reactiva en tiempo real, evitando problemas de resonancia y logrando corrientes cercanas a la forma senoidal ideal.

Castañeda Ramírez (2017) implementó un filtro activo en paralelo en las subestaciones N.º1 y N.º2 de la planta Clorox, logrando mejorar el factor

de potencia de 0.90 a aproximadamente 0.97 y reducir la distorsión armónica total de corriente hasta cumplir con la norma IEEE 519, demostrando además viabilidad técnica y económica con un periodo de recuperación de inversión de 4.8 años.

Chagua Ramos (2009) analizó el desempeño de los filtros activos en paralelo para la compensación de armónicos y potencia reactiva en sistemas industriales, concluyendo que, mediante el control basado en la teoría de potencia instantánea $p-q$, estos dispositivos se adaptan eficazmente a variaciones frecuentes de carga, a diferencia de los filtros pasivos.

Arroyo García (2024) diseñó un sistema de filtros activos para las subestaciones del Túnel Gambetta, identificando mediante mediciones que los armónicos de corriente de 3°, 5° y 7° excedían los límites de la norma IEEE 519-2022, especialmente en las subestaciones Norte y Sur, proponiendo filtros activos en paralelo como solución para reducir armónicos y mejorar el factor de potencia de manera simultánea.

2.3 Bases Teóricas

2.3.1 Representación matemática de armónicos mediante la serie de Fourier

La serie de Fourier permite descomponer una señal periódica de corriente o voltaje en una serie que incluye una componente constante, la frecuencia fundamental y series correspondientes a las frecuencias armónicas mediante una suma infinita de senos y cosenos, La serie de Fourier es clave para estudiar y analizar la distorsión armónica de una señal periódica, Estas series permiten descomponer una señal periódica en sus componentes armónicos facilitando su análisis (Constante, 2014).

La serie de Fourier se expresa de la forma siguiente:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right)$$

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi(1)}{T} t + a_2 \cos \frac{2\pi(2)}{T} t + a_3 \cos \frac{2\pi(3)}{T} t + \dots + \infty + \\ b_1 \sin \frac{2\pi(1)}{T} t + b_2 \sin \frac{2\pi(2)}{T} t + b_3 \sin \frac{2\pi(3)}{T} t + \dots + \infty$$

Donde a_0 , a_n y b_n se hallan de la siguiente forma:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos \frac{2\pi n}{T} t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin \frac{2\pi n}{T} t dt$$

2.3.2 Normativa de armónicos eléctricos

2.3.2.1 Límites de tensión armónica recomendados IEEE 519

Son límites recomendados de distorsión armónica de voltaje en el punto de conexión común (PCC) con el objetivo de garantizar una adecuada calidad de la energía eléctrica. Estos límites buscan mantener las distorsiones dentro de valores que no afecten el funcionamiento normal de los equipos conectados ni el desempeño del sistema eléctrico (IEEE 519, 2014).

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Figura 14 Límites de tensión armónica recomendados. Fuente. Datos tomados de IEEE Std 519 (2014).

2.3.2.2 Límites de tensión armónica recomendados NTCSE

Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos donde se verifica los niveles óptimos de THD tensión.

ORDEN (n) DE LA ARMONICA ó THD	TOLERANCIA Vi' o THD' (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
mayores de 25	$0.1 + 2.5/n$	$0.2 + 12.5/n$
(Armónicas Impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8"

Figura 15 Límites de tensión armónica recomendados. Fuente. Datos tomados de NTCSE-OSINERGMIN (2017).

2.3.2.3 Límites de corriente armónica recomendados por IEEE 519

Son límites recomendados para la distorsión armónica de corriente en el punto de conexión común (PCC), con el objetivo de mantener una adecuada calidad de la energía eléctrica y evitar que los armónicos generados por los usuarios afecten el sistema público. Estos límites dependen del nivel de tensión nominal del sistema, de la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de carga que representa la robustez del sistema frente a las corrientes armónicas (IEEE Std 519, 2014).

Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Figura 16 Límites de corriente armónica recomendados 120V-69kV.

Fuente. Datos tomados de IEEE Std 519 (2014).

Current distortion limits for systems rated above 69 kV through 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Figura 17 Límites de corriente armónica recomendados 69kV-161kV.

Fuente. Datos tomados de IEEE Std 519 (2014).

Current distortion limits for systems rated > 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 25^c$	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Figura 18 Límites de corriente armónica recomendados >161 kV. Fuente.

Datos tomados de IEEE Std 519 (2014).

2.3.3 Diseño de filtros pasivos simple sintonización

2.3.3.1 Cálculo de la potencia reactiva a compensar (Q_{eff}):

La potencia reactiva a compensar se obtiene a partir del triángulo de potencias, donde la potencia aparente está compuesta por la potencia activa y la reactiva. Cuando se busca mejorar el factor de potencia, la potencia activa permanece constante, mientras que la potencia reactiva disminuye debido a la compensación capacitiva.

$$\tan(\alpha) = \frac{Q_1}{P} \rightarrow Q_1 = P(\tan(\alpha))$$

$$\tan(\beta) = \frac{Q_2}{P} \rightarrow Q_2 = P(\tan(\beta))$$

$$Q_{eff} = Q_1 - Q_2$$

$$Q_{eff} = P(\tan(\alpha) - \tan(\beta))$$

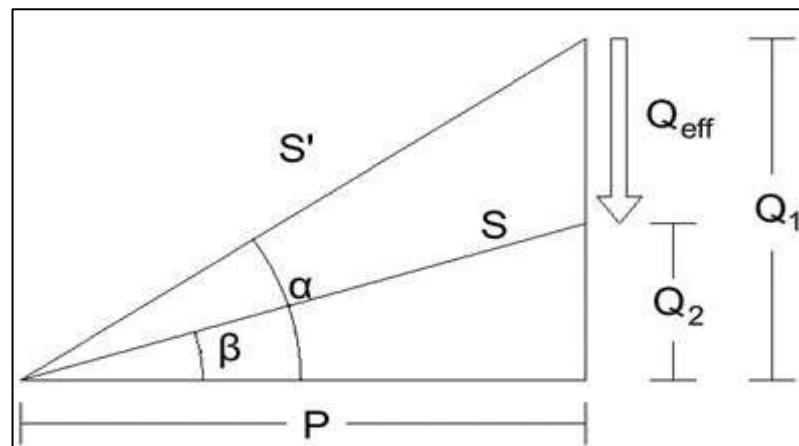


Figura 19 Cálculo de la potencia reactiva a compensar. Fuente. Elaboración propia.

2.3.3.2 Cálculo de frecuencia de sintonía del filtro pasivo (h)

Es recomendable ajustar la frecuencia de sintonía de un filtro armónico entre 3 % y 15 % por debajo de la frecuencia de la armónica objetivo. Esta práctica permite compensar las posibles desviaciones debidas a tolerancias de fabricación, fallas en elementos del banco de capacitores o variaciones en la configuración del sistema eléctrico. Además, no se recomienda sintonizar el filtro exactamente en la frecuencia armónica porque, al hacerlo, el filtro presentaría una impedancia extremadamente baja en resonancia,

absorbiendo casi toda la corriente armónica y requiriendo un diseño más grande y costoso. También aumentaría el riesgo de que pequeñas variaciones en la impedancia del sistema provoquen resonancias paralelas cerca de esa frecuencia, generando amplificación de voltaje y distorsiones severas. (IEEE Std 1531, 2020).

2.3.3.3 Cálculo de la reactancia efectiva (X_{eff})

Donde VLL es la tensión línea a línea y Q_{eff} es la potencia reactiva a compensar (IEEE Std 1531, 2020).

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{eff}}$$

2.3.3.4 Cálculo de la reactancia capacitiva del filtro pasivo de armónicos

Donde h es la frecuencia de sintonía del filtro pasivo y X_{eff} es la reactancia efectiva (IEEE Std 1531, 2020).

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

2.3.3.5 Cálculo de la reactancia inductiva del filtro pasivo de armónicos

Donde X_c es la reactancia capacitiva y h es la frecuencia de sintonía (IEEE Std 1531, 2020).

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

2.3.3.6 Cálculo del capacitor del filtro pasivo de armónicos:

Donde f es la frecuencia nominal del sistema y X_c es la reactancia capacitiva (Dorf & Svoboda, 2014).

$$C = \frac{1}{(2\pi)(f)(X_c)}$$

2.3.3.7 Cálculo del inductor del filtro pasivo de armónicos:

Donde f es la frecuencia nominal del sistema y X_L es la reactancia inductiva (Dorf & Svoboda, 2014).

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

2.3.3.8 Cálculo del factor de calidad

Para este tipo de filtros pasivos de sintonización simple se recomienda que el factor de calidad, tenga un valor entre 20 y 30. (Astudillo Mora, Vásquez Vega, & Rojas Serrano, 2016).

$$Q = \left(\frac{1}{R}\right) \left(\sqrt{\frac{L}{C}}\right)$$

2.3.3.9 Cálculo de la resistencia del filtro pasivo:

Donde Q es el factor de calidad, h es frecuencia de resonancia y XL es la reactancia inductiva (Astudillo Mora, Vásquez Vega, & Rojas Serrano, 2016).

$$R = \frac{(XL)(h)}{(Q)}$$

2.3.4 Estructura general del Diseño de filtros activos

El filtro activo se estructura en dos grandes bloques: la unidad de potencia, que realiza la conversión y entrega de energía compensatoria, y el sistema de control, que determina las corrientes de referencia, regula el bus de continua y asegura la correcta operación del sistema en lazo cerrado (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

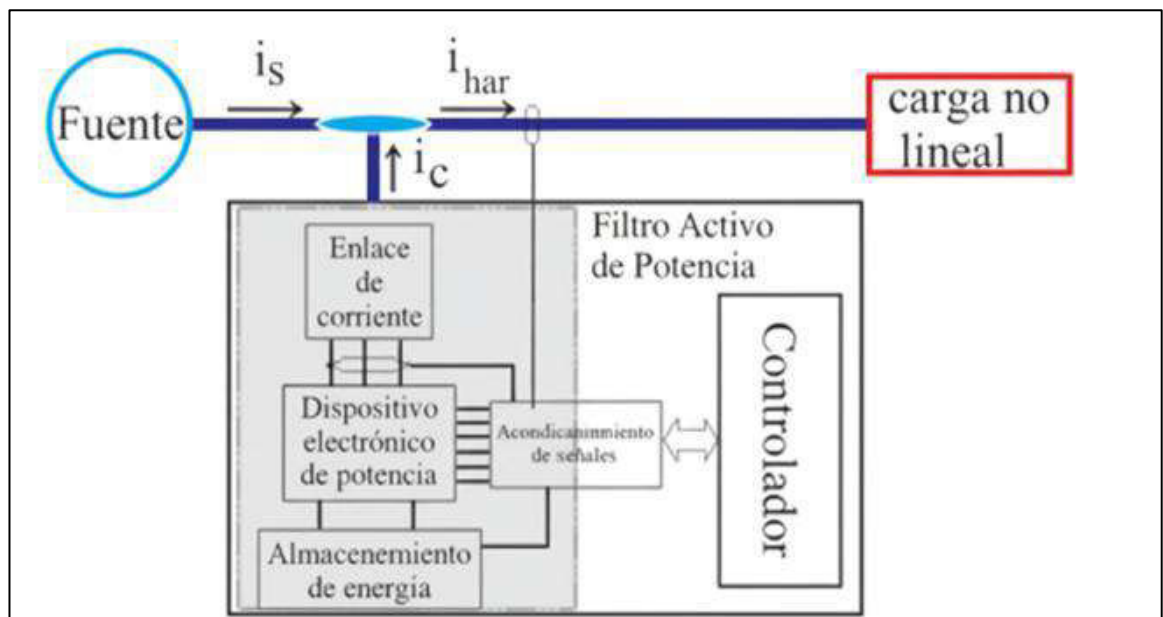


Figura 20 Estructura general de un filtro activo en paralelo. Fuente.

Datos tomados de Cárdenas, Jiménez, & Peña (2009).

2.3.4.1 Unidad de Potencia

La unidad de potencia constituye la parte física del filtro activo que se conforma de elementos electrónicos que permiten inyectar corrientes compensatorias en el punto de conexión con la red. En general está formado por cuatro componentes principales que son el convertidor de potencia (inversor), la inductancia de enlace (reactor de acoplamiento), el dispositivo de almacenamiento de energía (condensador del bus DC) y los dispositivos de acondicionamiento de señales del sistema de potencia. El trabajo en conjunto de estos componentes compensa las perturbaciones provocadas por las cargas no lineales permitiendo la estabilidad del sistema eléctrico (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.2 Convertidor de Potencia (Inversor)

El convertidor de potencia es el núcleo de la unidad de potencia y el encargado de inyectar la corriente de compensación hacia la red. Existen dos tipos de inversores: el inversor fuente de corriente (CSI) y el inversor fuente de tensión (VSI). Sin embargo, el VSI es el más utilizado debido a su mayor eficiencia, menor complejidad y bajo costo. El convertidor funciona tomando la energía almacenada en el bus de continua y transformándola en corriente alterna mediante modulación PWM. Así, actúa como una fuente de corriente controlable capaz de inyectar las componentes armónicas en oposición de fase respecto a las producidas por la carga (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.3 Inductancia de Enlace o Reactor de Acoplamiento

La inductancia de enlace se conecta entre la salida del inversor y el punto común de conexión con la red eléctrica (PCC). Su función principal es permitir el intercambio controlado de energía entre el filtro activo y la red. (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.4 Dispositivo de Almacenamiento de Energía (Condensador del Bus DC)

El condensador del bus de continua es el componente encargado de almacenar energía temporalmente y mantener constante el voltaje de DC en

el filtro activo. Durante la operación, este dispositivo absorbe y entrega energía dependiendo del flujo de potencia activa entre la red y la carga. Este componente asegura que el inversor disponga de la tensión necesaria para seguir las referencias de corriente con precisión (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.5 Dispositivos de acondicionamiento de señales del sistema de potencia

Los dispositivos de acondicionamiento de señales del sistema de potencia su función es medir y adaptar las señales eléctricas de corriente y tensión de la red para que puedan ser procesadas correctamente por el controlador. Su función principal es asegurar que el controlador reciba información correcta sobre el estado del sistema eléctrico, lo que permite al filtro generar las señales de compensación adecuadas para corregir las corrientes no deseadas. (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.6 Sistema de Control del Filtro Activo

El sistema de control es la parte inteligente del dispositivo que se encarga de generar las corrientes de referencia, regular el voltaje del bus DC y coordinar la acción del convertidor. Su propósito es que la corriente de la fuente sea puramente sinusoidal y en fase con la tensión, asegurando una compensación eficaz de las corrientes no activas (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.4.6.1 Lazo Interno de Control – Teoría de Potencia Instantánea ($p-q$)

El lazo interno determina las corrientes de referencia que el FAP debe inyectar. Para ello, se utiliza la teoría de potencia instantánea $p-q$ (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

La teoría de la potencia instantánea (teoría $p-q$) tiene como propósito analizar y controlar el flujo de potencia eléctrica en sistemas trifásicos directamente en el dominio del tiempo debido a esto puede identificar de manera instantánea las componentes de corriente que generan distorsión o potencia reactiva, y generar las corrientes de compensación necesarias para mantener una corriente de suministro sinusoidal y en fase con la tensión. Esta

teoría se fundamenta en la transformación de Clarke, la cual convierte las tres fases del sistema (a, b y c) en dos componentes ortogonales denominadas α (alfa) y β (beta). Estas componentes permiten representar el sistema trifásico en un plano bidimensional, simplificando el análisis y facilitando el cálculo de las potencias instantáneas. Dentro de este marco, la potencia activa instantánea representa la energía real que fluye de la fuente hacia la carga y que se convierte en trabajo útil, mientras que la potencia reactiva instantánea representa la energía que oscila entre la fuente y la carga sin realizar trabajo efectivo (Eleazar, 2005).

$$\begin{aligned} p(t) &= v_{\alpha}(t) \bullet i_{\alpha}(t) + v_{\beta}(t) \bullet i_{\beta}(t) \\ q(t) &= v_{\alpha}(t) \times i_{\beta}(t) - v_{\beta}(t) \times i_{\alpha}(t) \end{aligned}$$

Figura 21 Potencia instantánea. Fuente. Datos tomados de Eleazar (2005).

2.3.4.6.2 Lazo Externo de Control – Regulación del Voltaje de DC

El lazo externo tiene la misión de mantener constante el voltaje del bus de continua, garantizando un funcionamiento estable del inversor. Cuando se producen cambios bruscos en la carga, el nivel de voltaje del bus DC puede variar. El controlador detecta estas desviaciones y ajusta las referencias de corriente, modificando la potencia activa inyectada o absorbida por el filtro hasta restablecer el valor de referencia. Se emplea comúnmente un controlador proporcional–integral (PI) por su buena estabilidad y precisión (Cárdenas, Jiménez, & Peña, 2009).

2.3.5 Comparación de las distintas soluciones de mitigación de armónicos

En las tablas comparativas del estudio realizado por Persson se observa que, tanto para los armónicos de tensión como de corriente, el filtro activo representa la alternativa más eficiente en términos de reducción de la distorsión armónica y desempeño global. Asimismo, presenta mayor capacidad de adaptación frente a variaciones de carga en comparación con otras soluciones convencionales, lo que le permite mantener niveles

adecuados de calidad de energía bajo condiciones dinámicas de operación del sistema eléctrico.

Solution	ITHD [%]	Efficiency
No filter	45-75%	98%
Series choke	29-49%	96,5%
Passive filter	19-29%	96%
12-pulse	12-23%	94%
18-pulse	4-13%	92%
AFE	2-8%	94,5%
6-pulse + Active shunt filter	2-8%	96,5%

Figura 22 Comparación y eficiencia de THDi. Fuente. Datos tomados de Persson (2014).

	6-pulse drives	12-pulse	18-pulse	AFE	6-pulse + Active Filter (part.)	6-pulse + Active Filter (full)
Meets harmonic requirement	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Resulting VTHD [%]	14.5% - 18%	8.9%	6%	3.1%	7.7%	2.9%
Footprint (m/feet)	8.0m 26.5'	13.0m 43'	13.0m 43'	12.8m 42'	9.2m 30.5'	10m 33'
Weight (metric tonnes)	6.4	14.2	14.2	10.6	7.8	8.2
Efficiency (system)	97.5%	95.5%	94.5%	95%	97.1%	96.8%

Figura 23 Comparación y eficiencia de THDv. Fuente. Datos tomados de Persson (2014).

2.3.6 Compensación de energía reactiva en sistemas contaminados por armónicos

Desde los años 90 se analizaron distintas soluciones para mitigar la energía reactiva en sistemas contaminados por armónicos, como bancos de capacitores, combinación de capacitores con filtros pasivos y compensación mediante filtros activos. Se concluyó que la mejor opción es el uso de filtros activos (González, 2002).

2.3.7 Criterios para determinar la resonancia en un sistema

La resonancia en un circuito RLC ocurre cuando la reactancia inductiva y la capacitiva se igualan, provocando una variación en la impedancia total. En ese estado, el sistema se comporta como un circuito puramente resistivo donde la impedancia se reduce a la resistencia R y el ángulo es cero, ya que la corriente y el voltaje están en fase, eliminando el desfase producido por las reactancias.

$$Z = R + j(XL - XC) = \frac{V}{I} \cos(\alpha V - \alpha I) + j \frac{V}{I} \sin(\alpha V - \alpha I)$$

En un circuito puramente resistivo $\rightarrow \alpha V = \alpha I$

$$\rightarrow Z = \frac{V}{I} \cos(0) + j \frac{V}{I} \sin(0) = R$$

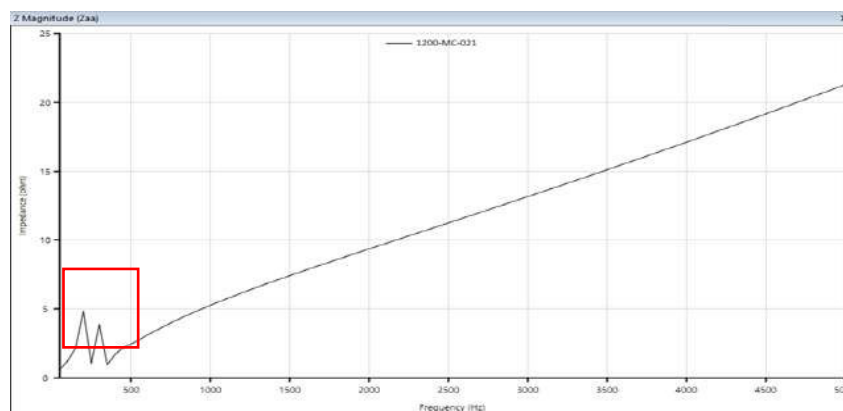


Figura 24 Barrido de frecuencia de la magnitud de la impedancia.

Fuente. Elaboración propia

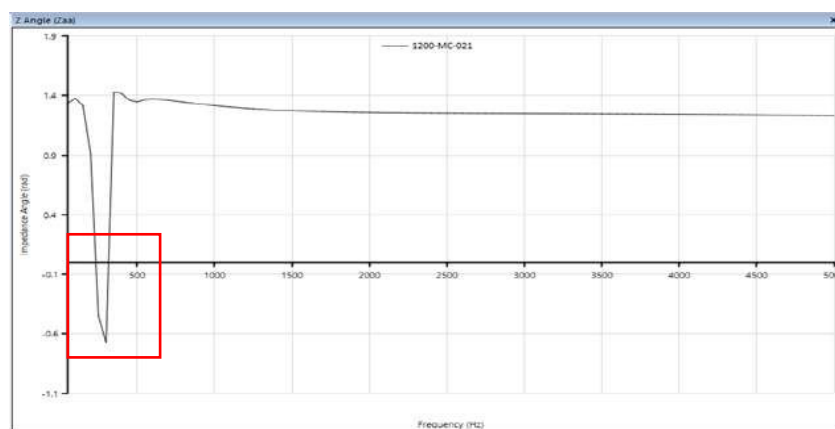


Figura 25 Barrido de frecuencia del ángulo de la impedancia. Fuente.

Elaboración propia

2.3.8 Facturación de energía reactiva contrato de usuarios libres

En el contrato para usuarios libres el consumo de energía reactiva inductiva y capacitiva serán facturados de acuerdo al precio establecido por Osinergmin o la Autoridad Gubernamental Competente (Osinergmin, 2017).

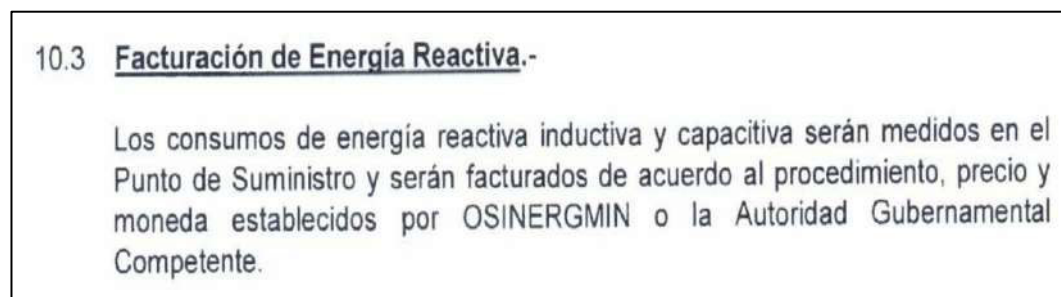


Figura 26 Contrato de Kallpa generación a compañía minera. Fuente. Datos tomados de Osinergmin (2017).

El precio por excesos de consumo de energía reactiva es de 0,01189 S/./kVARh para el primer bloque, 0,02259 S/./KVARh el segundo bloque y 0,03331 S/./kVARh (Coes, 2008). El cobro de energía reactiva se efectuará cuando la energía reactiva exceda el 30% de la energía activa total mensual (Osinergmin, 2018).

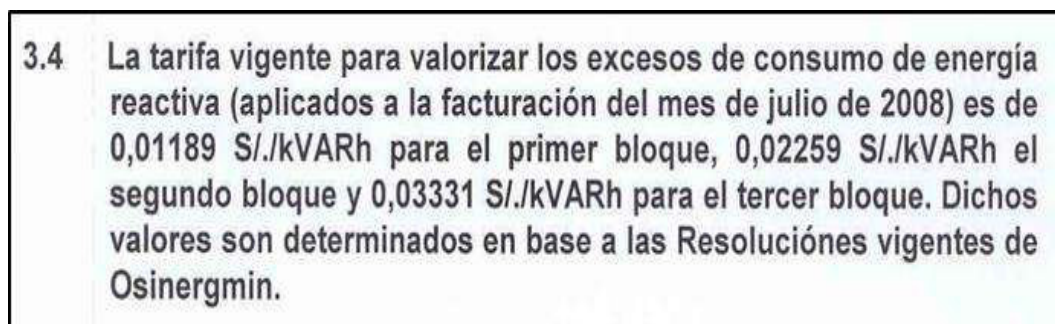


Figura 27 Tarifa de consumo por excesos de energía reactiva. Fuente. Datos tomados de Coes (2008).

2.4 Definición de términos

Para la interpretación de los datos, se ha designado las siguientes variables:

2.4.1 I_{sc}

Corriente máxima de corto circuito en el PCC

2.4.2 I_L

Corriente de carga máxima en el PCC

2.4.3 Armónicos Eléctricos

Los armónicos eléctricos son componentes de una señal de corriente o voltaje cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema (Gonzales & Ambuludi,2024).

2.4.4 Filtros Activos

Dispositivos electrónicos que se usa para compensar las corrientes armónicas generadas por la carga, mediante la inyección de una corriente de igual magnitud, pero de fase opuesta a la distorsión presente (Reyes,2005).

2.4.5 Filtros Pasivos en paralelo

Los filtros pasivos proporcionan un camino adicional para la corriente armónica este camino es de baja impedancia para las componentes de las corrientes armónicas desviándolas de la red (Quispe, 2021).

2.4.6 Impedancia (z)

La impedancia es la oposición total que presenta un circuito al paso de una corriente alterna (CA). Es una generalización de la resistencia para circuitos en los que hay inductores, capacitores y resistencias (Dorf & Svoboda,2014).

$$Z = R + jX = R + j(X_L - X_C)$$

$$X_L = (2\pi)(f)(L) \quad X_C = \frac{1}{(2\pi)(f)(C)}$$

Cuadro 1 Definición de términos de la impedancia

Símbolo	Nombre
f	Frecuencia
L	Inductancia
C	Capacitancia
X_L	Reactancia inductiva
X_C	Reactancia capacitiva

Fuente. Elaboración propia.

2.4.7 Inductancia:

La inductancia representa oposición al cambio de la corriente que fluye por un inductor en cual se mide en henrys (Alexander & Sadiku , 2013).

2.4.8 Capacitancia:

La capacitancia representa la capacidad de almacenar cargas, la capacitancia es la razón entre la carga en una placa de un capacitor y la diferencia de tensión entre las dos placas el cual se mide en farads (Alexander & Sadiku , 2013).

2.4.9 Potencia compleja:

La potencia compleja es la representación fasorial de la potencia en corriente alterna, que integra en una sola expresión la potencia activa y la potencia reactiva. La magnitud de esta potencia se conoce como potencia aparente y refleja la potencia total entregada al sistema (Dorf & Svoboda, 2014).

$$S = (V_{rms})(I_{rms})\angle\alpha$$

$$S = (V_{rms})(I_{rms})(\cos(\alpha) + j\sin(\alpha))$$

$$S = P + jQ$$

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

$$P = \text{Re}\{s\} = (V_{rms})(I_{rms})(\cos(\alpha))$$

$$Q = \text{Im}\{s\} = (V_{rms})(I_{rms})(\sin(\alpha))$$

$$\cos(\alpha) = \frac{P}{S}, \quad \sin(\alpha) = \frac{Q}{S}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{Q}{P}$$

2.4.10 Potencia activa:

Es la parte real de la potencia aparente corresponde a la energía que realiza trabajo útil (Alexander & Sadiku, 2013).

$$P = \text{Re}\{s\} = (V_{rms})(I_{rms})(\cos(\alpha))$$

2.4.11 Potencia reactiva:

Parte imaginaria de la potencia aparente representa la energía que se intercambia entre los elementos reactivos del circuito (Alexander & Sadiku , 2013).

$$Q = \text{Im}\{S\}$$

$$Q = (V_{rms})(I_{rms})(\sin(\alpha))$$

2.4.12 Factor de potencia:

Factor de potencia se considera como como la proporción de la potencia real disipada entre la carga y la potencia aparente de la carga. factor de potencia también se interpreta como el factor por el cual debe multiplicarse la potencia aparente para obtener la potencia real o promedio (Alexander & Sadiku, 2013).

$$FP = \cos(\alpha)$$

$$FP = \frac{P}{S}$$

2.4.13 Resonancia:

Es La condición en la que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales en magnitud, produciendo una impedancia puramente resistiva, donde f_0 es la frecuencia de resonancia. (Dorf & Svoboda,2014).

$$X_L = X_C$$

$$X_L = (2\pi)(f)(L)$$

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

$$(2\pi)(f)(L) = \frac{1}{(2\pi)(f)(C)}$$

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)(\sqrt{L)(C)}}$$

2.4.14 Punto de acoplamiento común (PCC):

Es el punto o lugar de una red eléctrica pública en el que otras cargas eléctricas suelen estar conectadas. El PCC está ubicado para las plantas de fábricas que tienen un transformador de servicio dedicado a ellos, el PCC se encuentra en el lado de alta tensión del transformador, pero para usuarios comerciales alimentados a través de un transformador de servicio común, el PCC suele estar en el lado de baja tensión del transformador de servicio (IEEE Std 519, 2014).

2.4.15 Root-Sum-Square (RSS):

se traduce en español como raíz de la suma de los cuadrados (IEEE Std 519, 1992).

$$RSS = \sqrt{X1^2 + X2^2 + X3^2 \dots}$$

2.4.16 Distorsión total de la demanda (TDD):

Es el nivel total de distorsión armónica de corriente en un sistema eléctrico que se expresa en porcentaje de la corriente de demanda máxima (IL). Esto se obtiene calculando la raíz cuadrática de la suma de los cuadrados (RSS) de todas las corrientes armónicas RMS presentes en la carga, y dividiendo dicho valor entre la corriente de demanda máxima del sistema (IEEE Std 519, 1992).

$$TDD = \left(\frac{\sqrt{I2^2 + I3^2 + I4^2 + \dots In^2}}{IL} \right) \times 100$$

2.4.17 Distorsión armónica total (THD):

Es el grado de distorsión que presentan las formas de onda de tensión y corriente comparado con una onda sinusoidal pura. Esto se calcula con la raíz cuadrática de la suma de los cuadrados (RSS) de los componentes armónicos de voltaje RMS, expresada como un porcentaje del voltaje RMS fundamental nominal de frecuencia base (IEEE Std 519, 1992).

$$THDv = \left(\frac{\sqrt{V2^2 + V3^2 + V4^2 + \dots Vn^2}}{V1} \right) \times 100$$

$$THDi = \left(\frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots I_n^2}}{I_1} \right) \times 100$$

2.4.18 Distorsión armónica individual (HD):

La distorsión armónica individual se refiere a la contribución de un armónico específico (I_h o V_h) al total de la distorsión armónica en una señal.

$$HDv = \left(\frac{V_h}{V_1} \right) \times 100$$

$$HDi = \left(\frac{I_h}{I_1} \right) \times 100$$

2.4.19 Orden armónico (h):

El orden armónico se refiere a un múltiplo de la frecuencia fundamental de una señal. La frecuencia de un armónico específico se calcula multiplicando el orden armónico por la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si la frecuencia fundamental es 60 Hz, el quinto orden armónico tiene una frecuencia de 300.

2.4.20 Factor de calidad

El factor de calidad mide cuán “estrecha” o “amplia” es la respuesta del filtro: un Q alto indica un filtro muy selectivo, capaz de atenuar con precisión una frecuencia específica, pero más sensible a variaciones de parámetros o sintonía; mientras que un Q bajo corresponde a un filtro más amortiguado, con una banda de rechazo más ancha y mayor estabilidad frente a cambios en las condiciones del sistema. (IEEE Std 519, 1992)

$$Q = \left(\frac{1}{R} \right) \left(\sqrt{\frac{L}{C}} \right)$$

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

La realización de un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementación de un filtro activo de armónicos permite mejorar la calidad de energía en el Área 1200 de Southern Perú.

3.1.2 Hipótesis específicas

La realización de un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementación de un filtro activo de armónicos permite cumplir con las normas de calidad de energía.

La realización de un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementación de un filtro activo de armónicos permite reducir el sobrecalentamiento de los equipos eléctricos.

La realización de un estudio de armónicos y potencia reactiva, junto con la propuesta de implementación de un filtro activo de armónicos permite evitar multas por baja calidad de energía.

3.2 Variables

3.2.1 Variable independiente

Nivel de armónicos y potencia reactiva del sistema eléctrico del Área 1200 de la mina Southern Perú

3.2.2 Variable dependiente

Calidad de energía eléctrica del sistema eléctrico del Área 1200 de la mina Southern Perú.

3.3 Operacionalización de las Variables

Cuadro 2 Operacionalización de las Variables

Variables	Definición operacional	Dimensión	Instrumento de medición	Indicadores	Escala de medición
Independiente: Nivel de armónicos y potencia reactiva del sistema eléctrico del Área 1200 de la mina Southern Perú	Magnitudes eléctricas del sistema eléctrico asociadas a la distorsión armónica y al consumo de potencia reactiva, obtenidas mediante mediciones en campo y simulaciones en software especializado (ETAP).	Distorsión armónica de corriente	Analizador de redes eléctricas / Simulación en software Etap	Distorsión armónica total de corriente (THDi)	%
		Distorsión armónicos de tensión	Analizador de redes eléctricas / Simulación en software Etap	Distorsión armónica total de tensión (THDv)	%
		Armónicos individuales	Analizador de redes eléctricas / Simulación en software Etap	Armónicos individuales de corriente y tensión (HDi, HDv)	%
		Potencia reactiva	Analizador de redes eléctricas / Simulación en software Etap	Potencia reactiva (Q)	KVAr
		Factor de potencia	Analizador de redes eléctricas / Simulación en software Etap	Factor de potencia (FP)	%
Dependiente: Calidad de la energía eléctrica del sistema eléctrico del Área 1200 de la mina Southern Perú	Condición del sistema eléctrico determinada por el nivel de distorsión armónica, el estado de los equipos eléctricos y el cumplimiento de la normativa de calidad de energía.	Cumplimiento normativo	Comparación con normativa IEEE 519	THDi y THDv dentro de los límites permisibles	%
		Estado térmico/ Deterioro de equipos eléctricos	Simulación en software Etap	Corriente RMS (I) Potencia aparente (S)	A kVA
		Penalizaciones/Multas económicas por baja calidad de energía	Análisis de facturación eléctrica	Energía reactiva facturada Monto de penalización	kVArh S/.

Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y METODOS

4.1 Área de estudio

El área de estudio de la presente tesis se desarrolló en la mina Southern Perú con coordenadas $17^{\circ}16'33.9''\text{S}$ $70^{\circ}37'23.6''\text{W}$ en las instalaciones del Área 1200, que involucra las salas eléctricas 1100-ER-011, 1200-ER-021 y S.E Totoral.



Figura 28 Ubicación del proyecto de mina ubicada al sur del Perú.

Fuente. $17^{\circ}16'33.9''\text{S}$ $70^{\circ}37'23.6''\text{W}$. Datos tomados de Google Maps (2025).

4.2 Diseño de la investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que tiene como finalidad dar solución a un problema técnico real relacionado con la presencia de armónicos eléctricos y control de potencia reactiva en el sistema de distribución de una minera ubicada al sur del Perú.

El estudio busca analizar la calidad de energía eléctrica mediante mediciones realizadas en las salas eléctricas 1100-ER-011, 1200-ER-021 y S.E Totoral y, a partir de los resultados obtenidos, modelar el sistema eléctrico en el software ETAP para evaluar alternativas de mitigación de armónicos y control de potencia reactiva.

El diseño de la investigación es cuasi experimental, ya que combina observaciones y mediciones reales en campo, sin modificar las condiciones normales de operación del sistema, con simulaciones realizadas en el software ETAP. Estas simulaciones permiten analizar el comportamiento del sistema ante la implementación de filtros pasivos y activos, comparando su efectividad en la reducción de distorsión armónica y control de potencia reactiva.

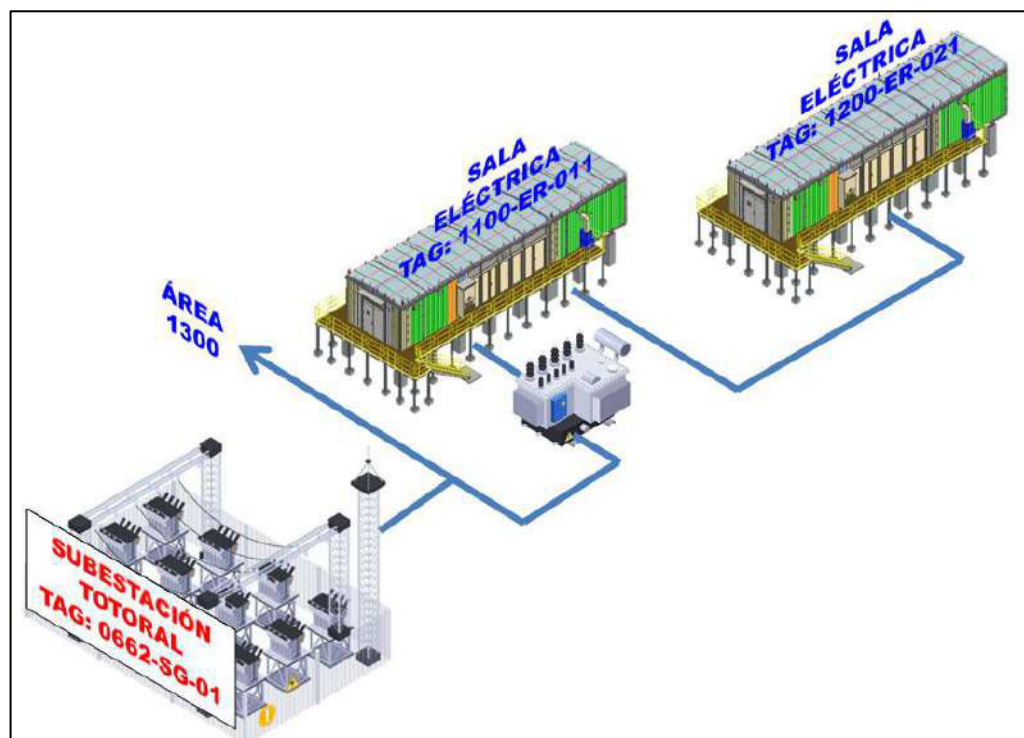


Figura 29 Área de estudio. Fuente. Elaboración propia

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población estuvo conformada por todas las instalaciones eléctricas del sistema de media y baja tensión de una mina Southern Perú, donde se encuentran equipos de gran potencia como variadores de frecuencia, cargas

no lineales, motores y transformadores que pueden generar distorsiones armónicas y consumo de potencia reactiva de la red eléctrica.

4.3.2 Muestra

La muestra se delimitó a tres puntos estratégicos del sistema, seleccionados por su relevancia operativa, susceptibilidad a la distorsión armónica y consumo de potencia reactiva los cuales son la Sala Eléctrica 1100-ER-011, la Sala Eléctrica 1200-ER-021, y la Subestación Eléctrica Totoral (13.8 kV)

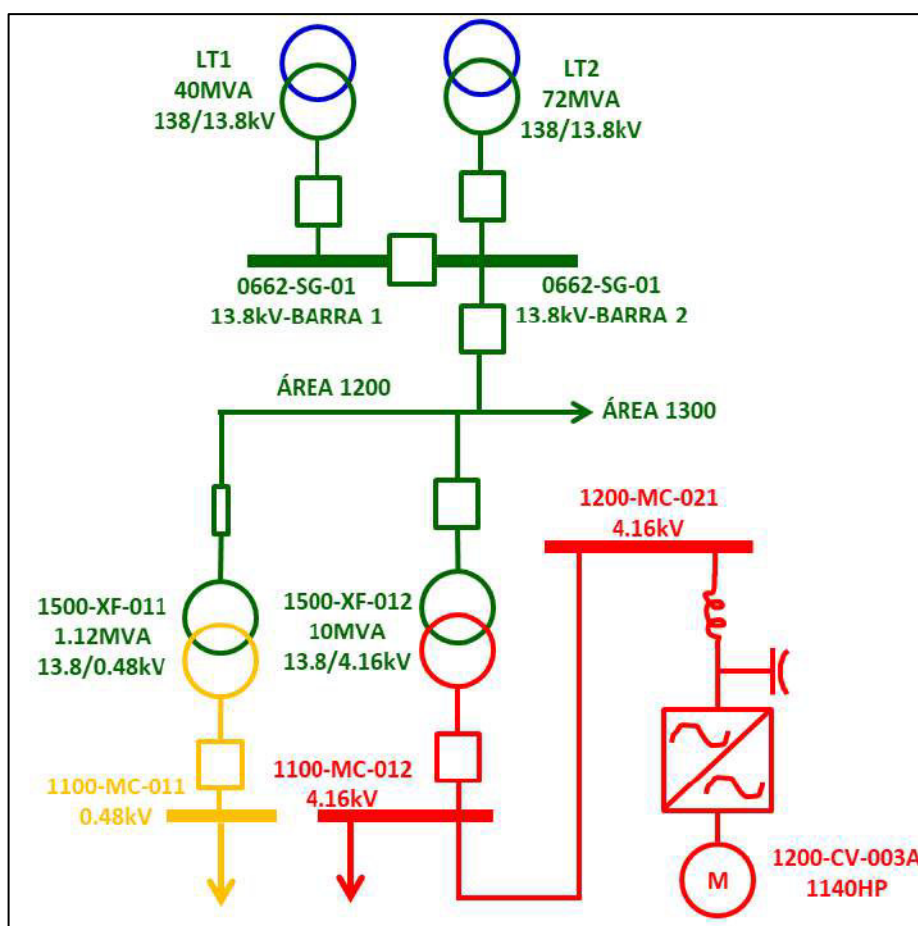


Figura 30 Unifilar del área de estudio. Fuente. Elaboración propia

4.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Procedimientos

El procedimiento de recolección de datos se realizó con trabajo de campo donde se efectuaron mediciones de calidad de energía en los puntos críticos del sistema eléctrico del área 1200 de la mina Southern Perú,

específicamente en la sala 1100-ER-011, la sala 1200-ER-021y S.E Totoral. Las mediciones se realizaron entre el 21 y el 29 de agosto de 2025, registrando parámetros de tensión, corriente, distorsión armónica y factor de potencia. La instalación de los equipos de medición se efectuó la etapa de puesta en marcha del área 1200 por lo que las cargas del sistema evaluado estuvieron funcionando con cargas menores al 50% de su cargabilidad total.

4.4.2 Técnicas de recolección de datos

Para registrar de manera precisa los datos de las variables relacionadas con la calidad de energía, se empleó en la investigación la técnica de medición instrumental directa, complementada con la técnica de recopilación documental. La medición directa permitió obtener datos sobre las variables eléctricas del sistema, tales como la tensión, la corriente, el factor de potencia y la distorsión armónica, mediante el uso de analizadores instalados en campo. Por otro lado, la recopilación documental aportó la información técnica necesaria para sustentar el análisis, incluyendo planos eléctricos, reportes de medición solicitados a la Mina como la potencia de cortocircuito y la impedancia Thévenin de la red a la que se conecta la Mina, estos datos son importantes para realizar la simulación del comportamiento del sistema eléctricos y parámetros nominales .Ambas técnicas garantizaron la obtención de información confiable, cuantificable y comparable con los estándares establecidos por la norma IEEE 519 y la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE).

4.4.3 Instrumentos para la recolección de datos

Para la obtención de los datos, se utilizaron como instrumentos analizadores de redes de precisión y software ETAP para el análisis del sistema. En total, se emplearon cuatro equipos analizadores de redes: un Metrel serie 17420340 instalado en la sala eléctrica 1100 (4.16 kV), un Hioki PQ3198 en la sala 1100 (13.8 kV), un Metrel serie 14470302 en la sala 1200 (variador 1140 HP a 4.16 kV), y un Metrel serie 19331063 en la subestación Totoral (13.8 kV). Estos equipos registraron los valores de tensión, corriente, distorsión armónica y factor de potencia durante el periodo comprendido entre el 21 y el 29 de agosto de 2025.

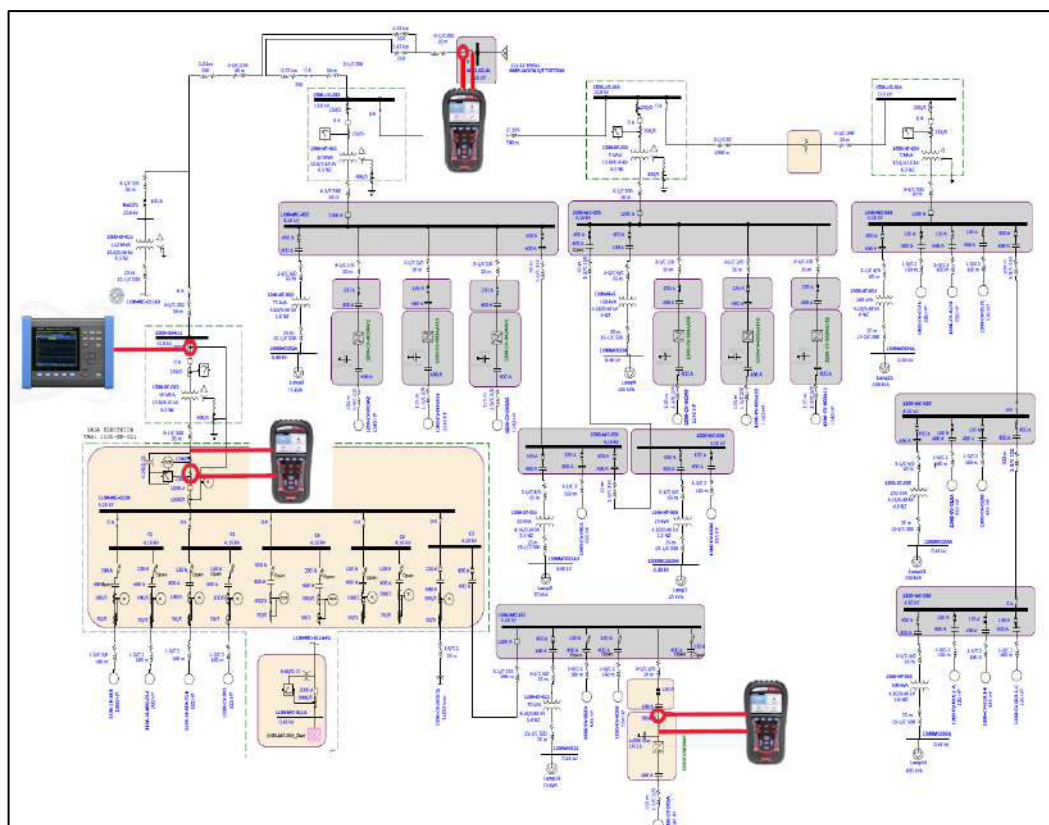


Figura 31 Esquema de medición de calidad de energía en el Área 1200.

Fuente. Elaboración propia

4.5 Análisis estadístico

El resultado del análisis estadístico desarrollado en la sección “5.1.5” evidencia que el Área 1200 de Southern Perú, en el escenario sin filtro de armónicos, presenta niveles elevados de distorsión armónica, así como una alta demanda de potencia reactiva y un factor de potencia reducido. La comparación entre los escenarios evaluados demuestra que la implementación del filtro activo de armónicos proporciona la mayor reducción de la distorsión armónica total de corriente (THDi) y de la distorsión armónica individual (HDi), además de disminuir la potencia reactiva y mejorar el factor de potencia, constituyéndose como la alternativa más eficiente para mejorar la calidad de energía en dicha área.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Presentación y análisis de resultados

5.1.1 Tiempo de estudio y medición calidad de energía en el Área 1200

Se han instalados los equipos de calidad en los puntos respectivos en las fechas 21, 22/08/25, el monitoreo de las mediciones de calidad, se han desarrollado las fechas 23, 24, 25, 26, 27, 28/08/25.

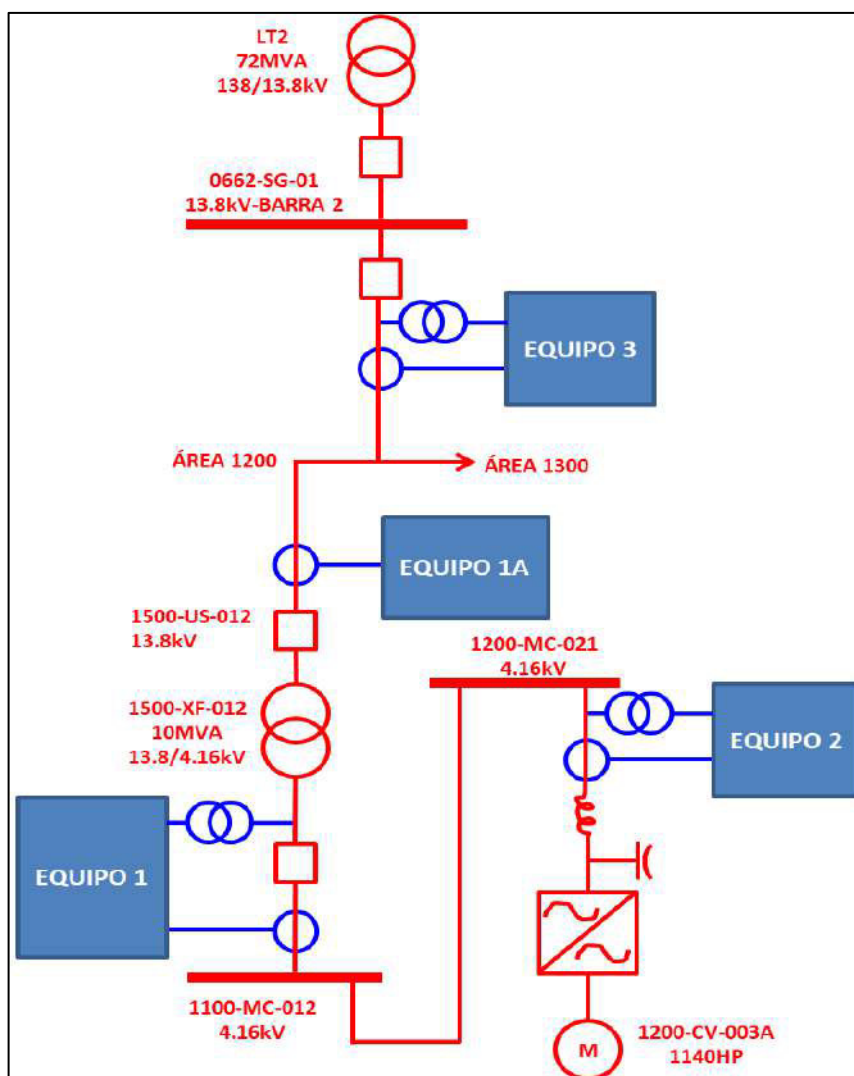


Figura 32 Unifilar de puntos de medición. Fuente. Elaboración propia

5.1.2 Resultados de medición de calidad de energía

5.1.2.1 Resultados de medición de equipo 1 en sala eléctrica 1100-ER-011

En esta sección se muestran los resultados de la medición de calidad de energía realizada en campo con en el equipo 1 (Metrel MI2892) con cargas operando a menos del 50% de su cargabilidad total.



Figura 33 Equipo de medición instalado en la sala 1100-ER-011, lado 4.16kV. Fuente. Elaboración propia

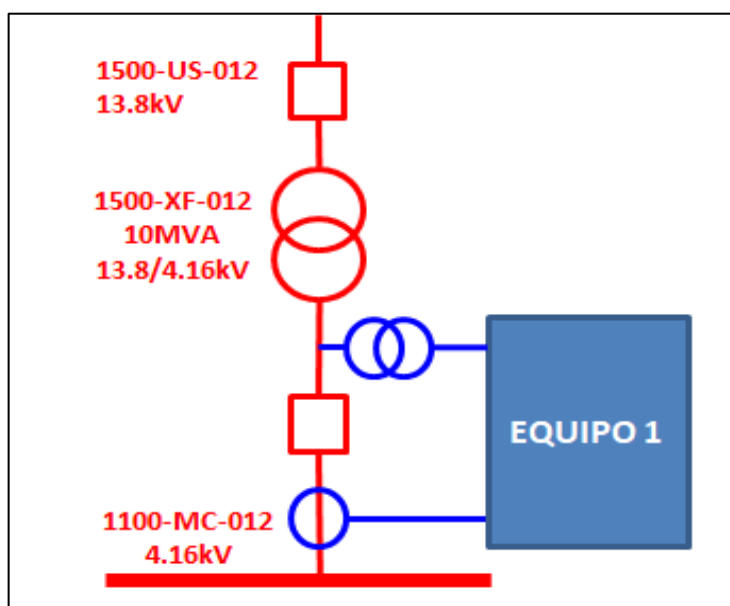


Figura 34 Unifilar del lugar de instalación Equipo 1. Fuente. Elaboración propia

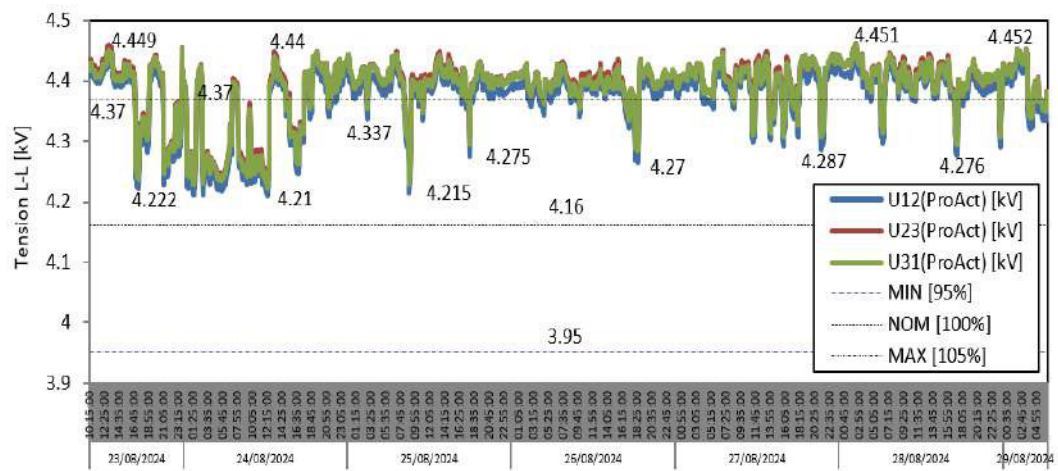


Figura 35 Medición de tensiones L-L. Fuente. Elaboración propia

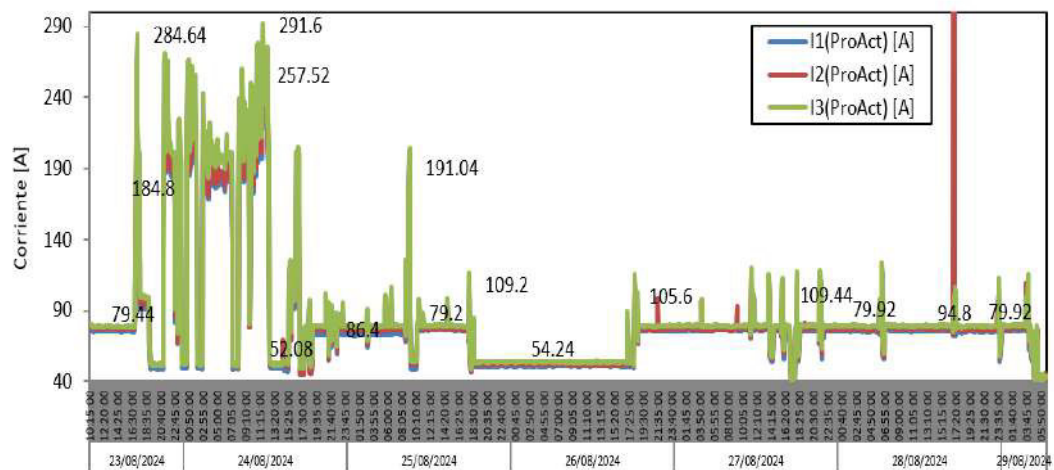


Figura 36 Medición de corriente de línea. Fuente. Elaboración propia

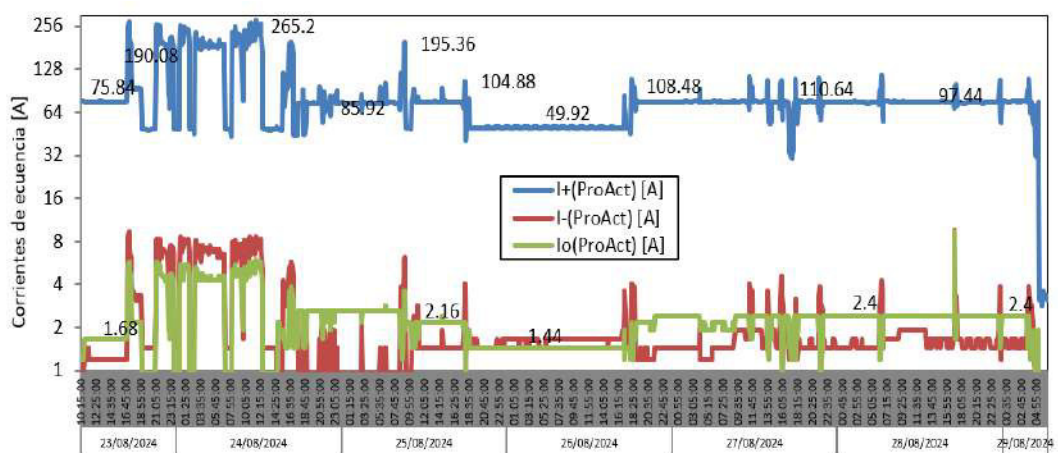


Figura 37 Medición de corrientes de secuencia. Fuente. Elaboración propia

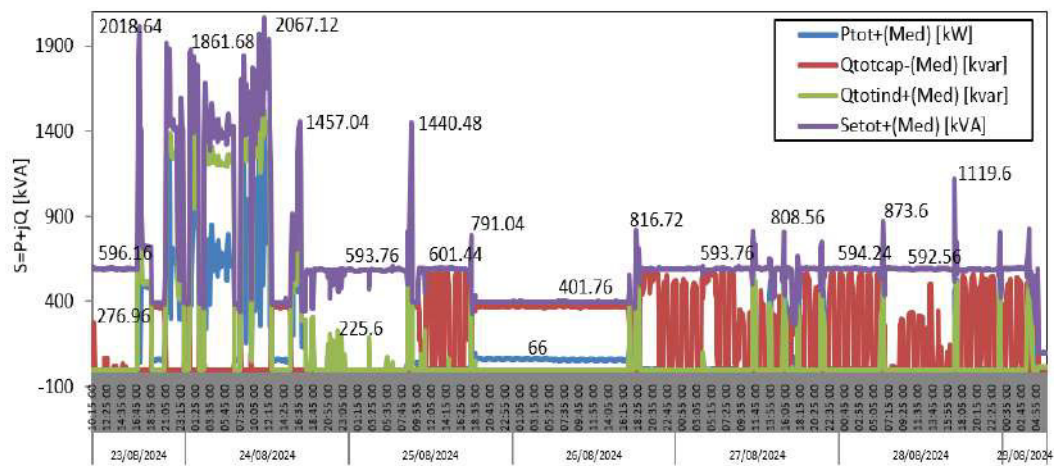


Figura 38 Medición potencias aparente, activa, reactiva (CAP, IND)

$S=P+jQ$. Fuente. Elaboración propia

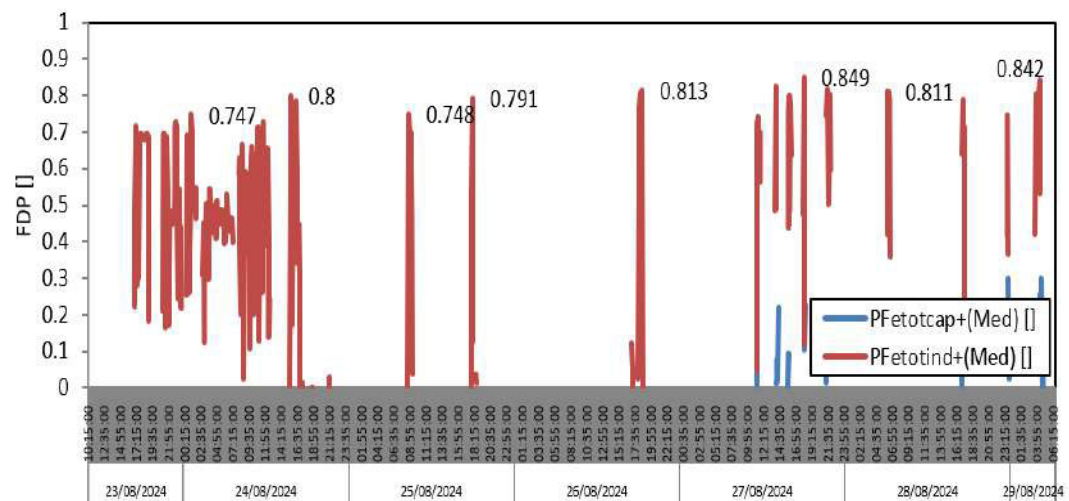


Figura 39 Medición registro de factor de potencia. Fuente. Elaboración propia

propia

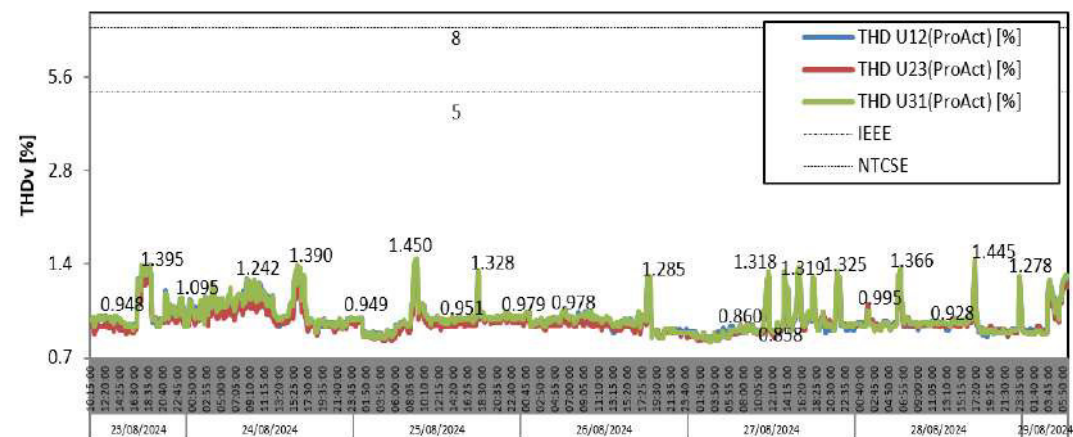


Figura 40 Medición THDv. Fuente. Elaboración propia

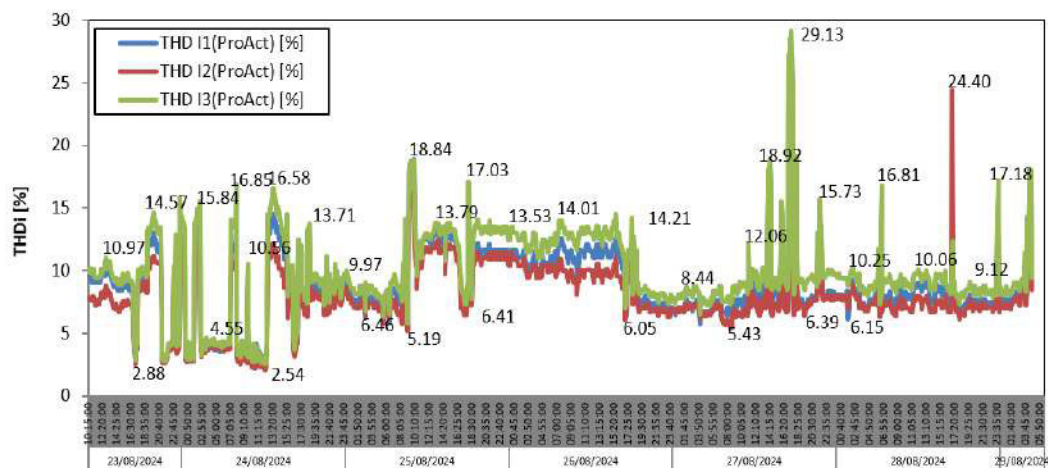


Figura 41 Medición THDi. Fuente. Elaboración propia

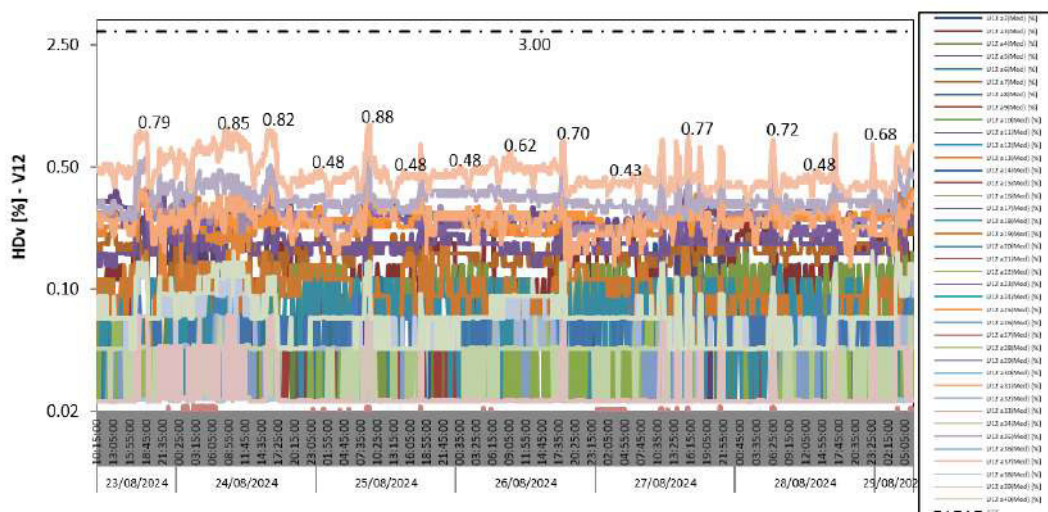


Figura 42 Medición HDv-V12. Fuente. Elaboración propia

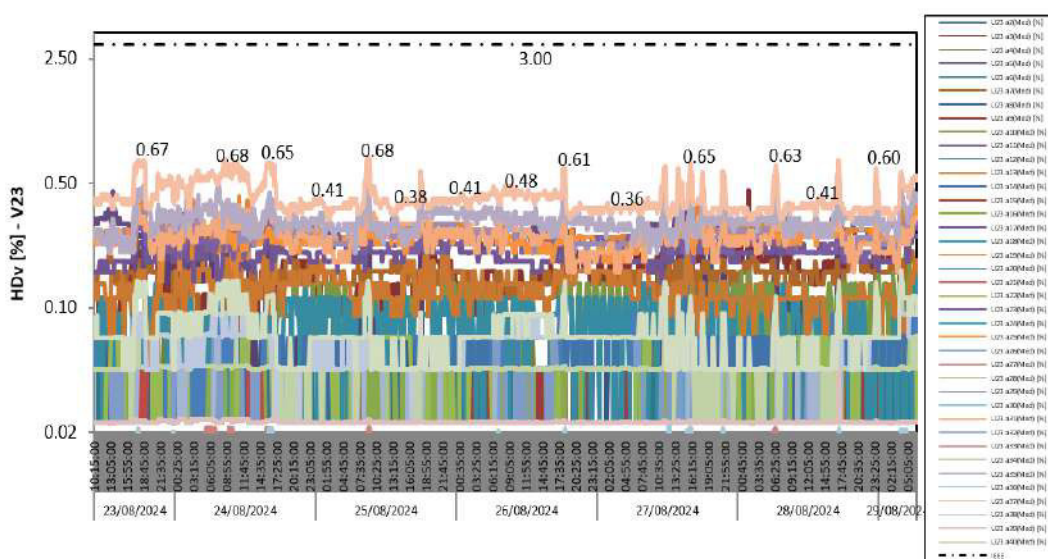


Figura 43 Medición HDv (%) – V23. Fuente. Elaboración propia

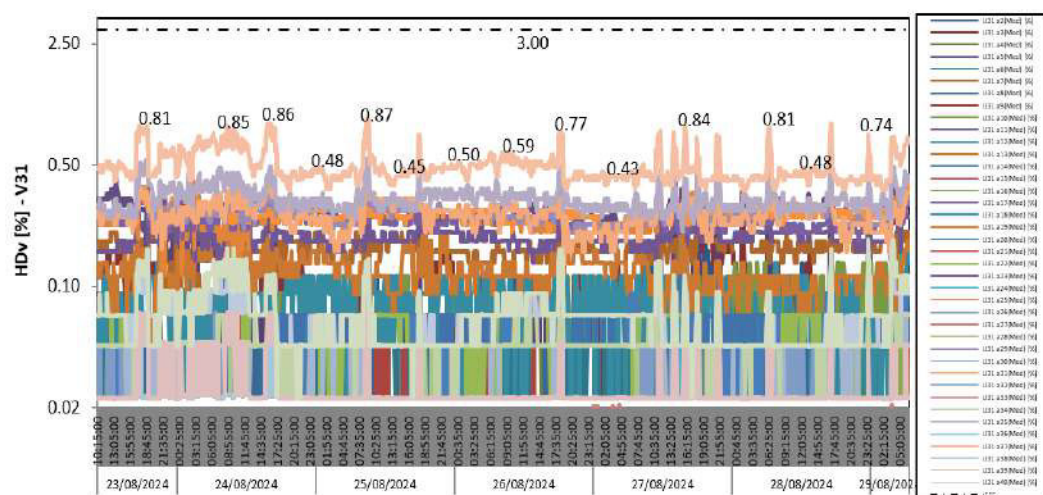


Figura 44 Medición HDv (%) – V31. Fuente. Elaboración propia

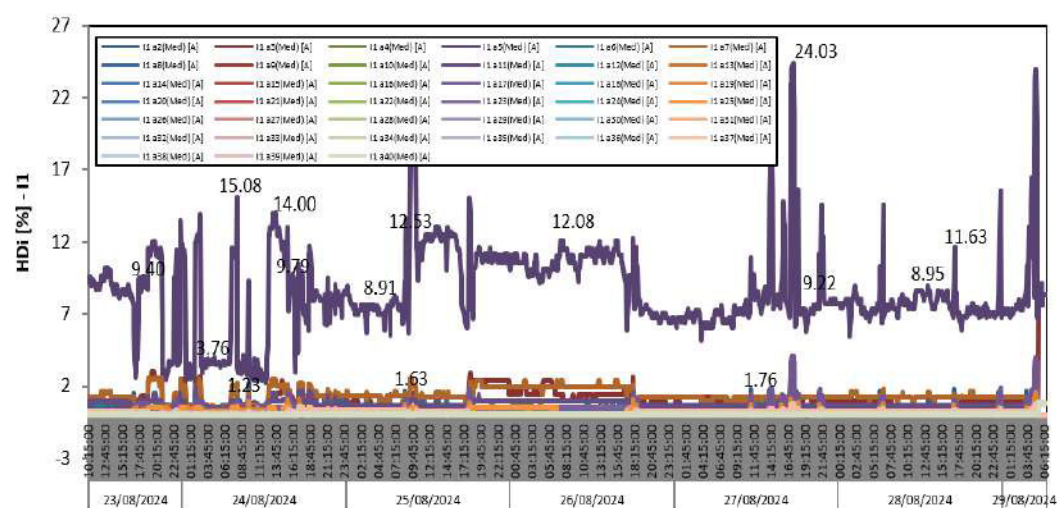


Figura 45 Medición HDi (%) I1. Fuente. Elaboración propia

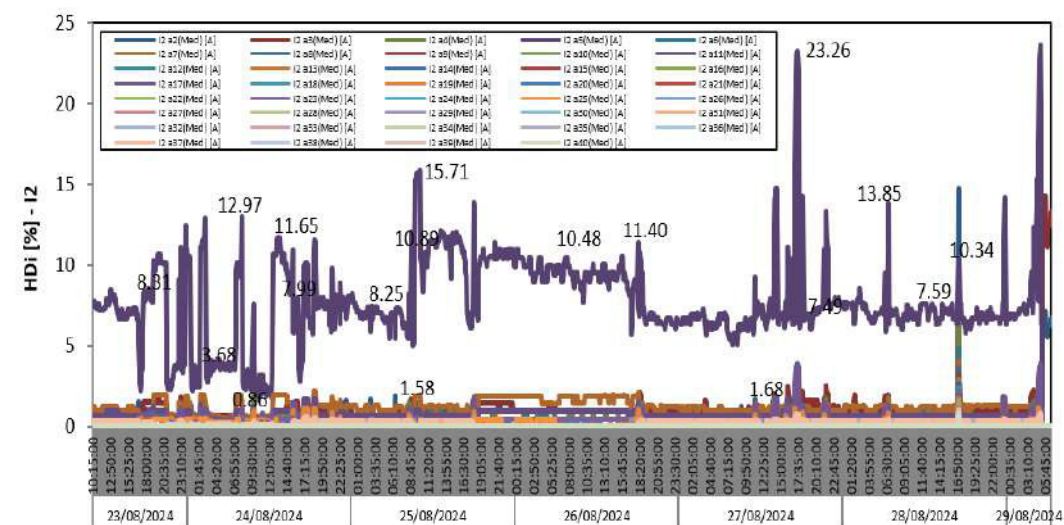


Figura 46 Medición HDi (%) I2. Fuente. Elaboración propia

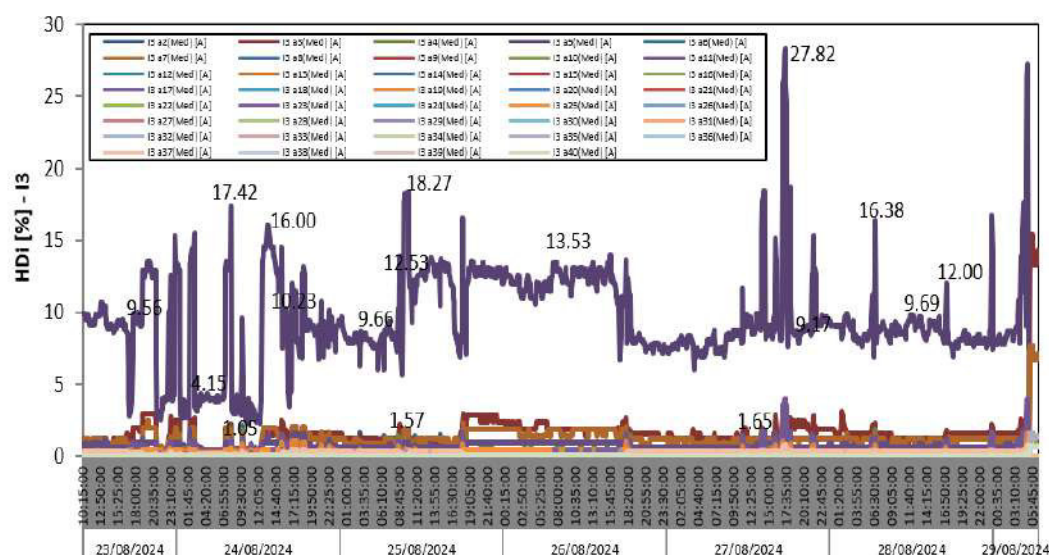


Figura 47 Medición HDi (%) I3. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.1.1 Análisis estadístico de los resultados obtenidos de medición del equipo 1 comparados con la normativa IEEE519 y NTCSE.

5.1.2.1.1.1 Análisis estadístico de distorsión armónica total de tensión (THDv) en equipo 1

Los valores medidos de la distorsión armónica total de tensión en el equipo 1 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran dentro de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE).

Cuadro 3 Análisis estadístico de (THDv) en equipo 1

	R-S [%]			S-T [%]			T-R [%]			IEEE 519	NTCS E
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min		
THDv	1.45	1.15	0.85	1.45	1.15	0.85	1.45	1.15	0.85	5%	8%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.1.1.2 Análisis estadístico de distorsión armónica individual (HDv) de tensión en equipo 1.

Los valores medidos de la distorsión armónica individual de tensión en el equipo 1 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran dentro de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE).

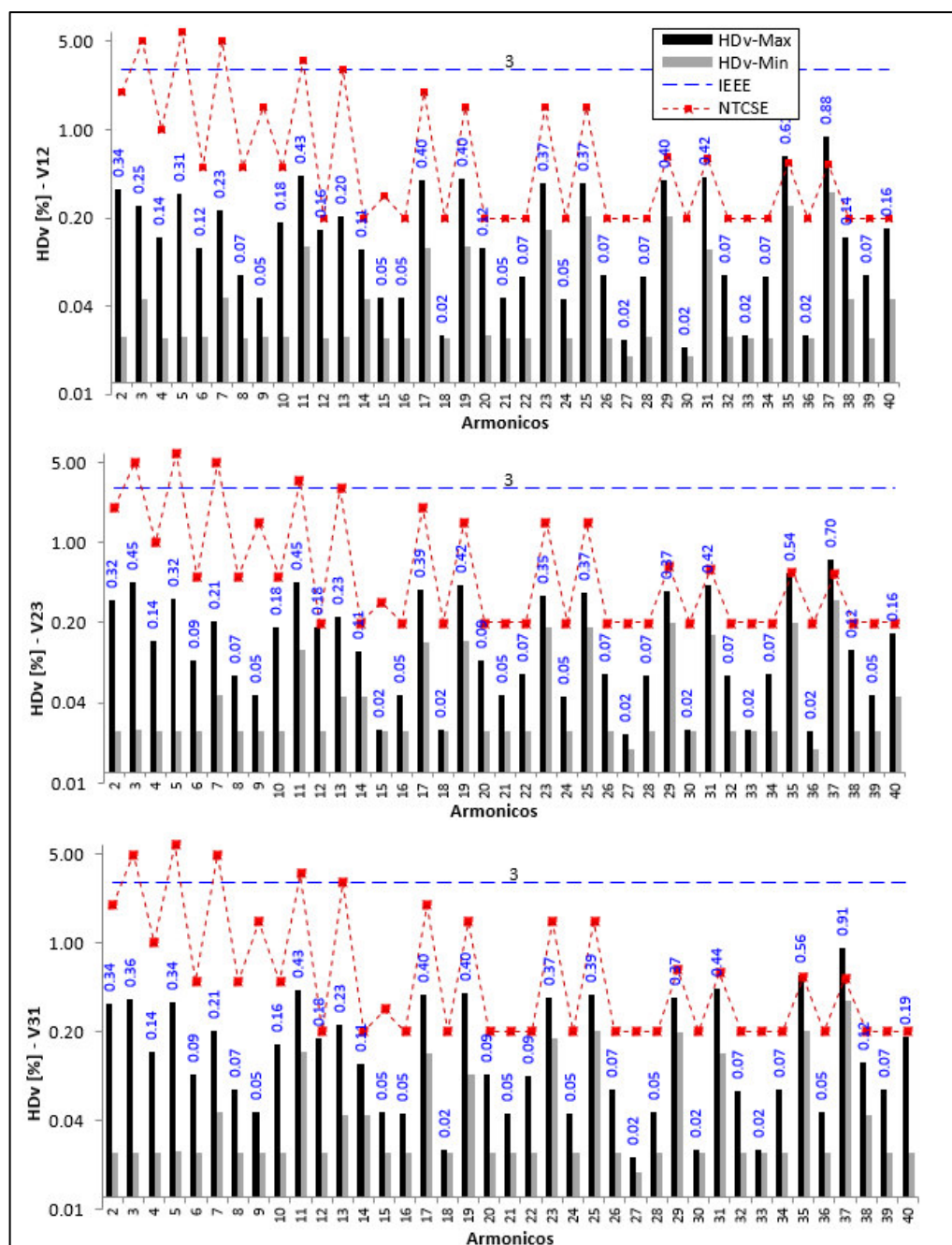


Figura 48 Análisis estadístico de (HDv) de tensión en equipo 1. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.1.1.3 Análisis estadístico de distorsión armónica total de corriente (THDi) en equipo 1

Los valores medidos de la distorsión armónica total de corriente en el equipo 1 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran fuera de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) como se muestra en el cuadro 4, cabe recalcar que los valores medidos dependen del nivel de cargabilidad existente en el sistema analizado.

Cuadro 4 Análisis estadístico de (THDi) en equipo 1

	R [%]			S [%]			T [%]			IEEE519
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	
THDi	29	16	3	29	16	3	29	16	3	5%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.1.1.4 Análisis estadístico de distorsión armónica individual (HDi) de corriente en equipo 1.

El análisis estadístico de la distorsión armónica individual de corriente en el equipo 1 durante el tiempo del estudio evidencia la presencia de múltiples armónicos que superan los límites establecidos en la norma IEEE 519, sin embargo, la presencia del 5to armónico destaca con valores superiores al 20% en todas las fases y superando ampliamente el límite máximo permitido del 4% establecido en la norma IEEE 519.

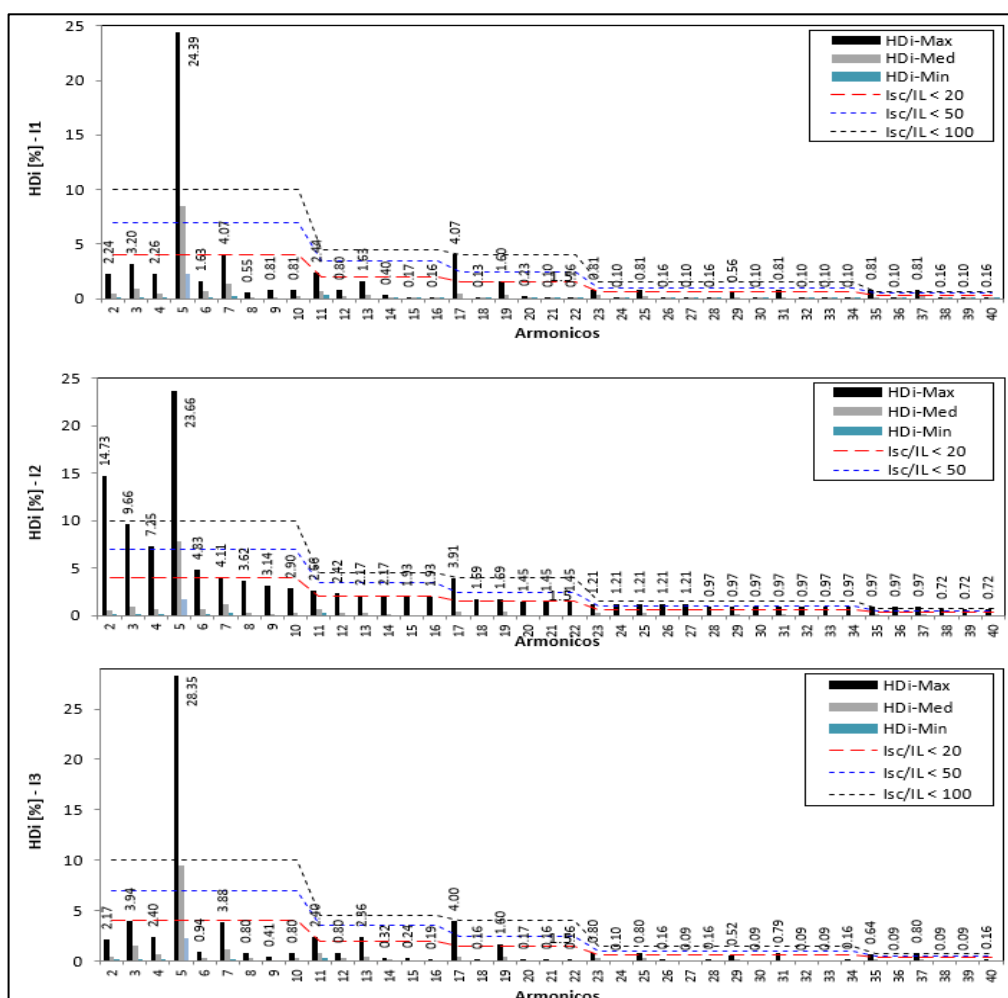


Figura 49 Análisis estadístico de (HDi) en equipo 1. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.2 Resultados de medición equipo 1A lado 13.8kv en sala 1100-ER-011

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la medición de calidad de energía realizado en campo con en el equipo 1A (Hioky 3198) con cargas operando a menos del 50% de su cargabilidad total.



Figura 50 Equipo de medición instalado en sala 1100-ER-011, lado 13.8kV (Corriente). Fuente. Elaboración propia

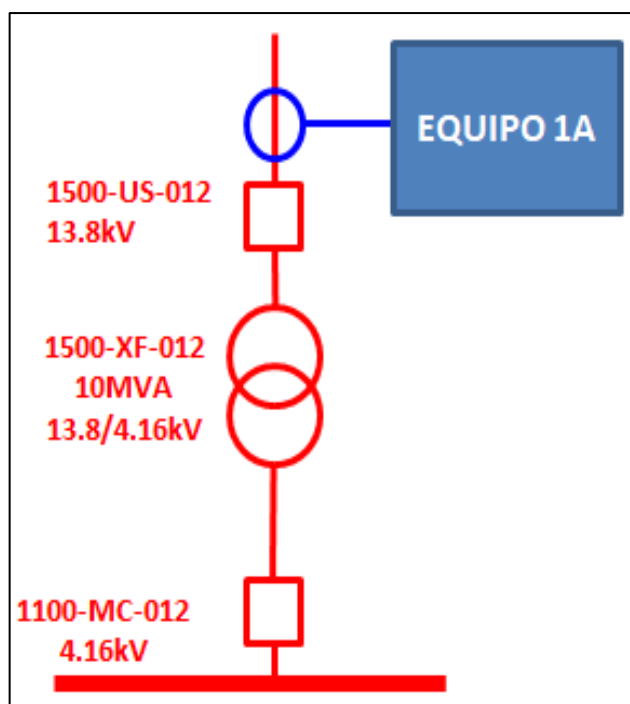


Figura 51 Unifilar del lugar de instalación EQUIPO 1A. Fuente. Elaboración propia

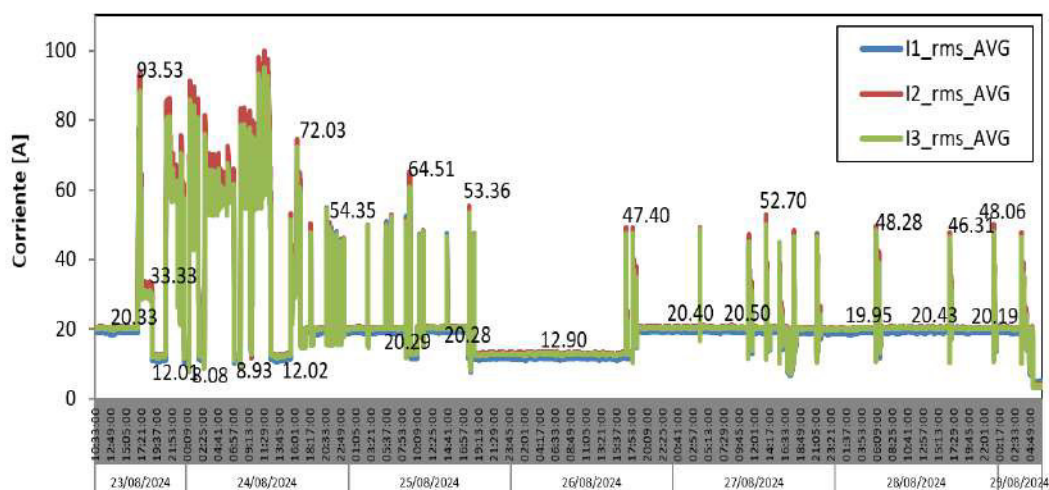


Figura 52 Medición de corriente de línea. Fuente. Elaboración propia

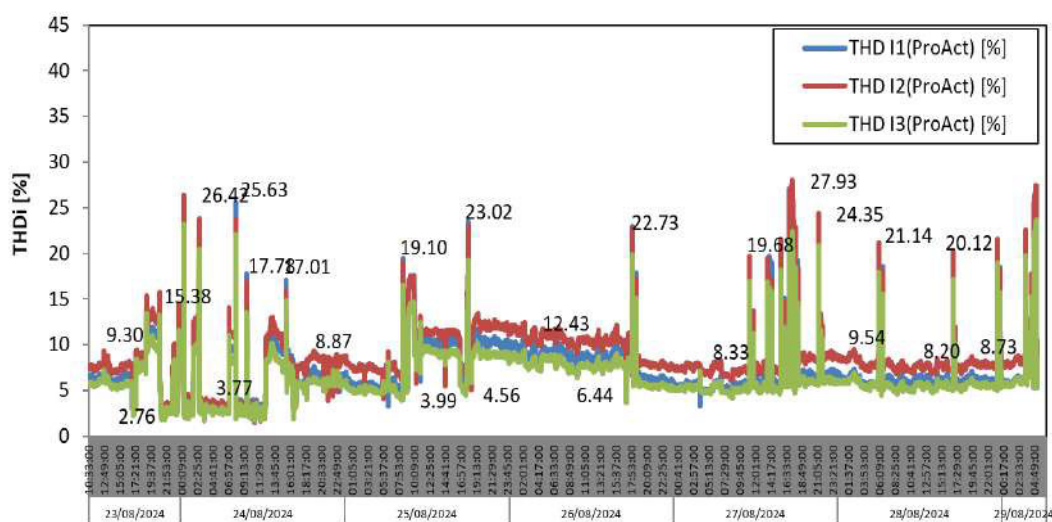


Figura 53 Medición THDi. Fuente. Elaboración propia

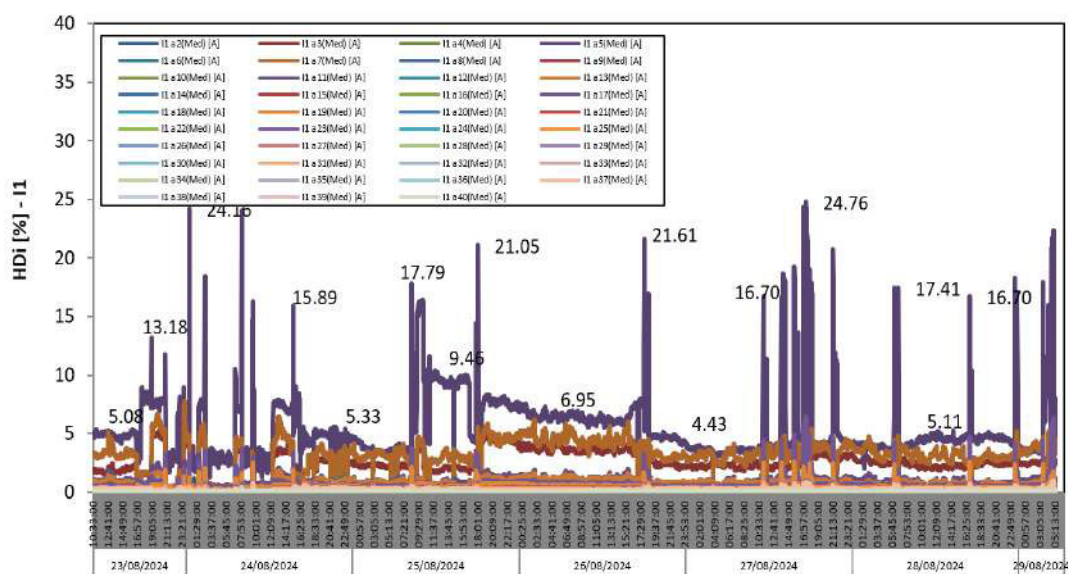


Figura 54 Medición HDi (%) I1. Fuente. Elaboración propia

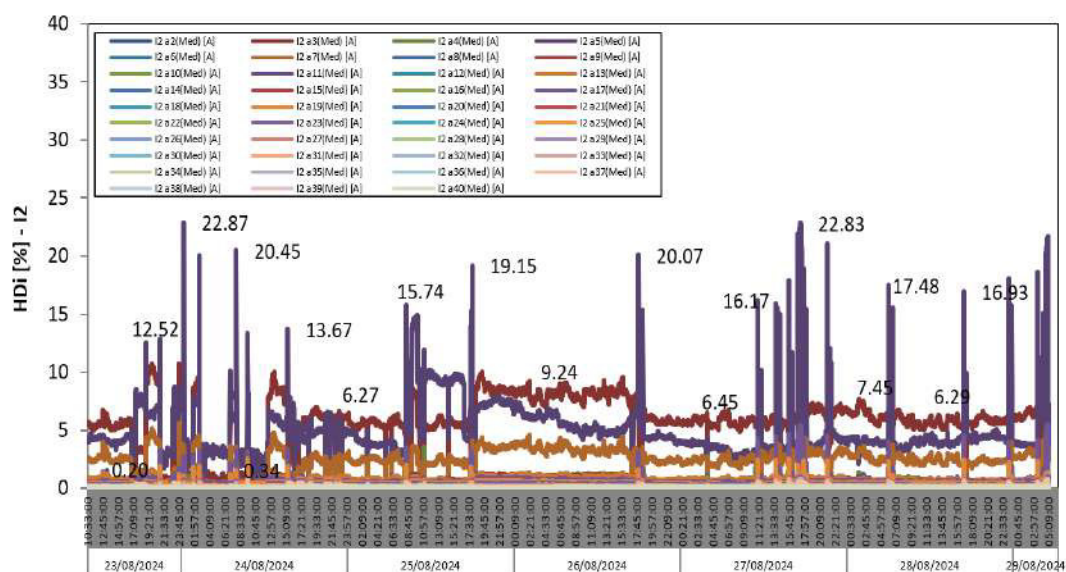


Figura 55 Medición HDi (%) I2. Fuente. Elaboración propia

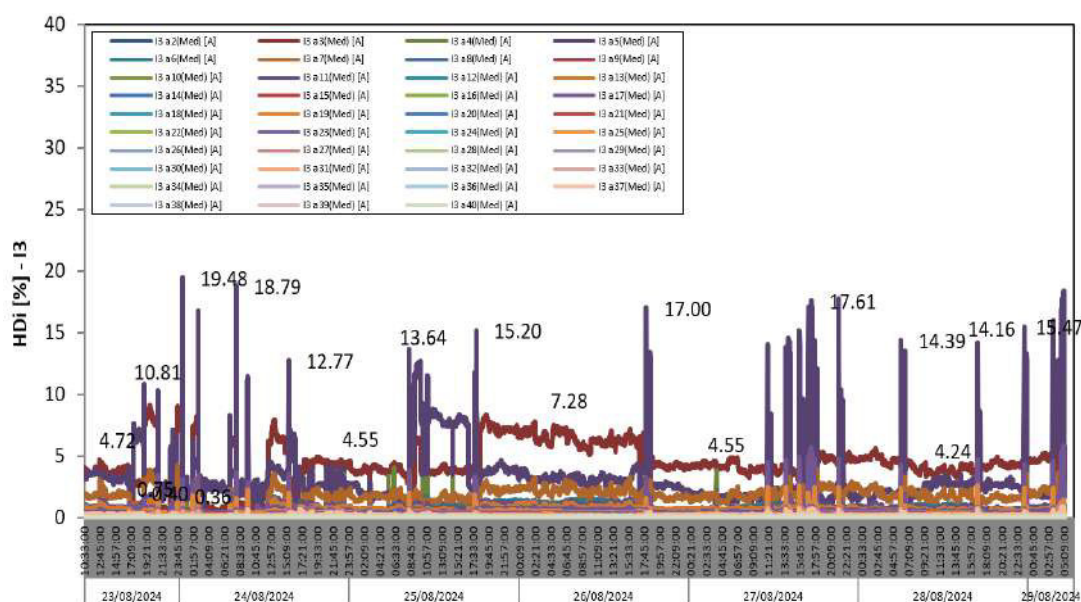


Figura 56 Medición HDi (%) I3. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.2.1 Análisis estadístico de los resultados de medición del equipo 1A comparados con la normativa IEEE 519.

5.1.2.2.1.1 Análisis estadístico de distorsión armónica total de corriente (THDi) en equipo 1A.

Los resultados obtenidos evidencian que los valores máximos de THDi alcanzan hasta 27%, superando ampliamente el límite recomendado por la norma IEEE 519 para el nivel de tensión correspondiente, el cual establece un valor de referencia del 5%. Esta condición indica una presencia significativa

de corrientes armónicas en el equipo 1A, lo que podría generar efectos adversos como sobrecalentamiento en conductores, incremento de pérdidas técnicas y posibles afectaciones en equipos sensibles conectados al mismo sistema.

Asimismo, se observa que los valores promedio (15%) se mantienen también por encima del límite normativo, lo que confirma que la distorsión no corresponde a un evento aislado sino a una condición recurrente durante el periodo de medición. La variabilidad entre valores máximos, medios y mínimos sugiere una relación directa entre el nivel de carga del equipo y la magnitud de la distorsión armónica generada.

Cuadro 5 Análisis estadístico de (THDi) en equipo 1A

	R [%]			S [%]			T [%]			IEEE519
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	
THDi	27	15	3	27	15	3	27	15	3	5%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.2.1.2 Análisis estadístico de distorsión armónica individual de corriente (HDi) en equipo 1A.

El análisis estadístico de la distorsión armónica de corriente en el equipo 1A durante el tiempo del estudio evidencia la presencia de múltiples armónicos que superan los límites establecidos en la norma IEEE 519. Sin embargo, la presencia del 5° armónico destaca con valores superiores al 19% en todas las fases, superando ampliamente el límite máximo permitido del 4% establecido por dicha norma. Asimismo, se observa que los armónicos de orden 7° y 11° presentan también contribuciones significativas, aunque en menor magnitud respecto al 5°. Se aprecia además que los valores máximos registrados muestran una clara predominancia en los armónicos impares, mientras que los armónicos de orden superior disminuyen progresivamente su magnitud, aunque siguen aportando a la distorsión total del sistema. La dispersión entre valores máximos, medios y mínimos indica una variabilidad dependiente del nivel de carga y de las condiciones operativas durante el periodo de medición.

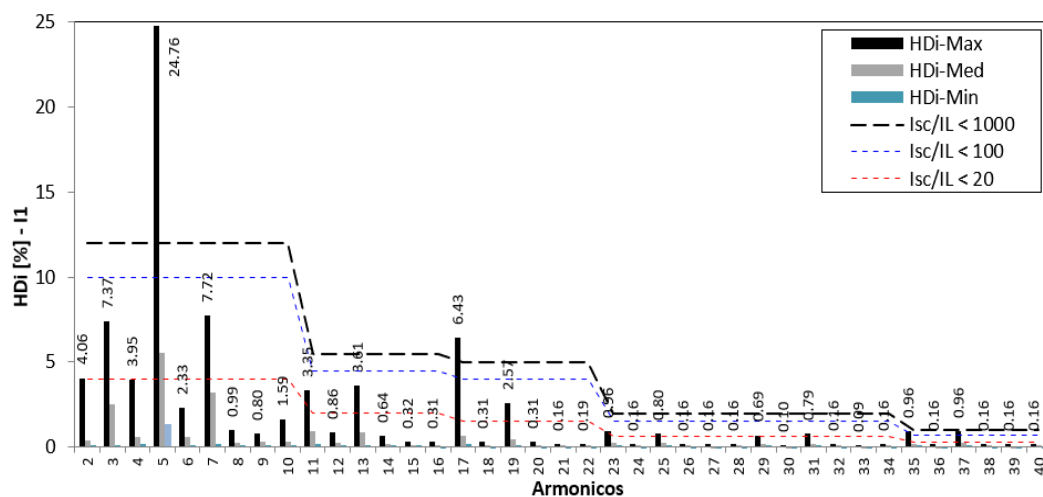


Figura 57 Análisis estadístico de (HDI) en equipo 1A - L1. Fuente.

Elaboración propia

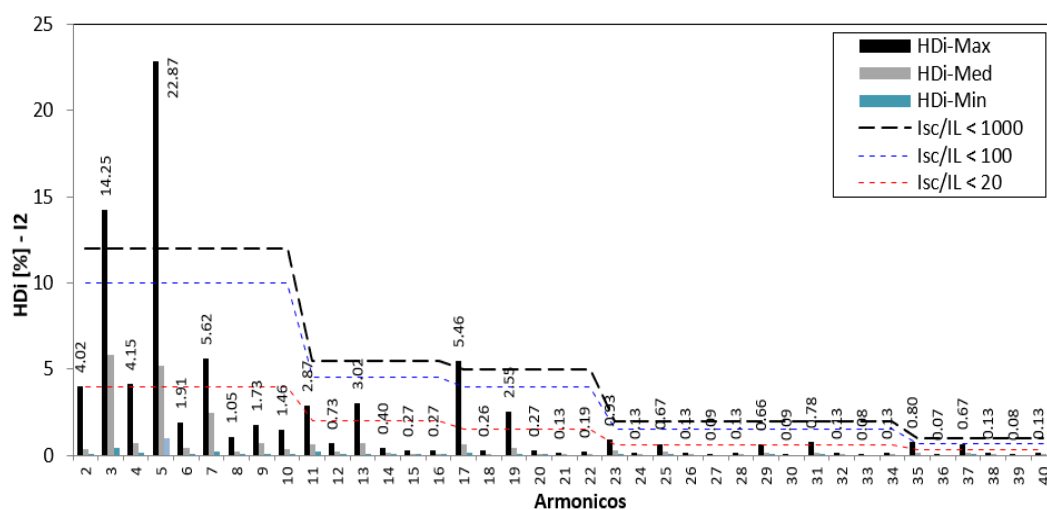


Figura 58 Análisis estadístico de (HDI) en equipo 1A - L2. Fuente.

Elaboración propia

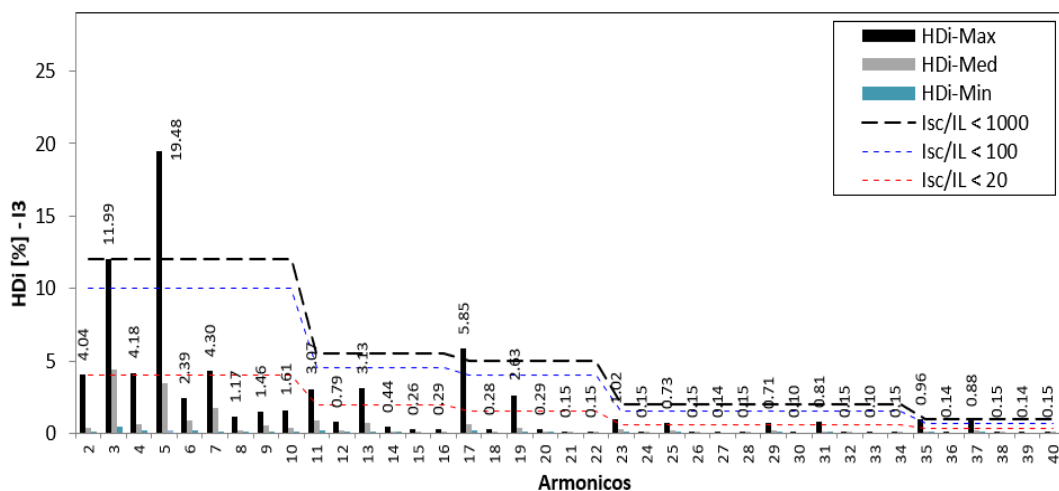


Figura 59 Análisis estadístico de (HDI) en equipo 1A - L3. Fuente.

Elaboración propia.

5.1.2.3 Resultados de medición equipo 2 – sala eléctrica 1200-ER-021

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la medición de calidad de energía realizado en campo con en el equipo 2 (Metrel 2892) con cargas operando a menos del 50% de su cargabilidad total.



Figura 60 Equipo de medición en el VFD 1140HP. Fuente. Elaboración propia

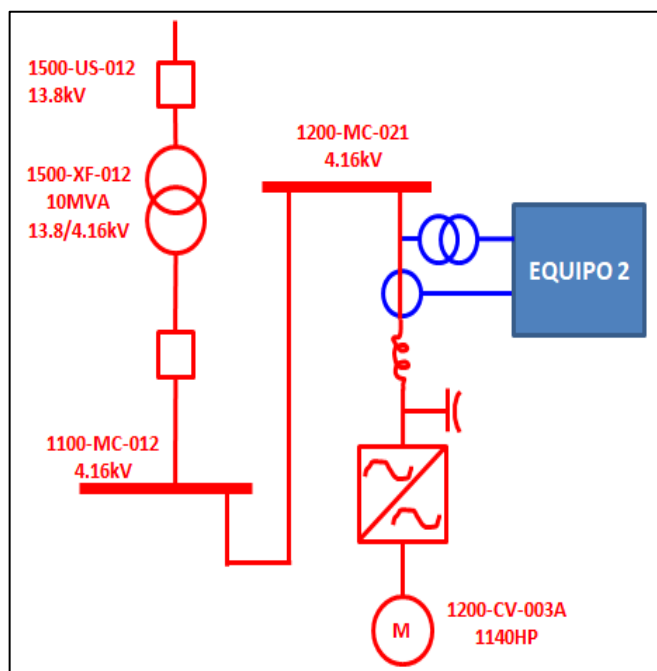


Figura 61 Unifilar del lugar de instalación EQUIPO 2. Fuente. Elaboración propia

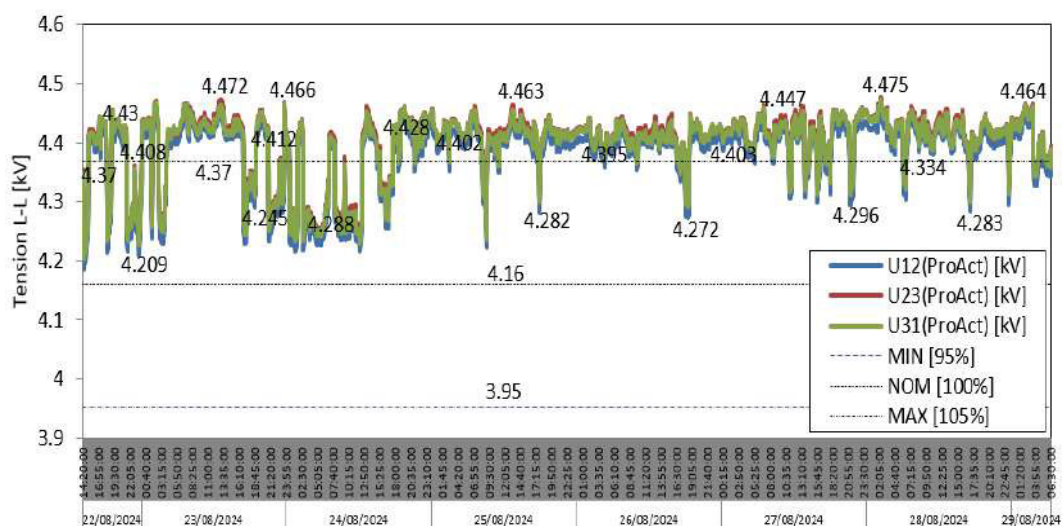


Figura 62 Medición de tensiones L-L. Fuente. Elaboración propia

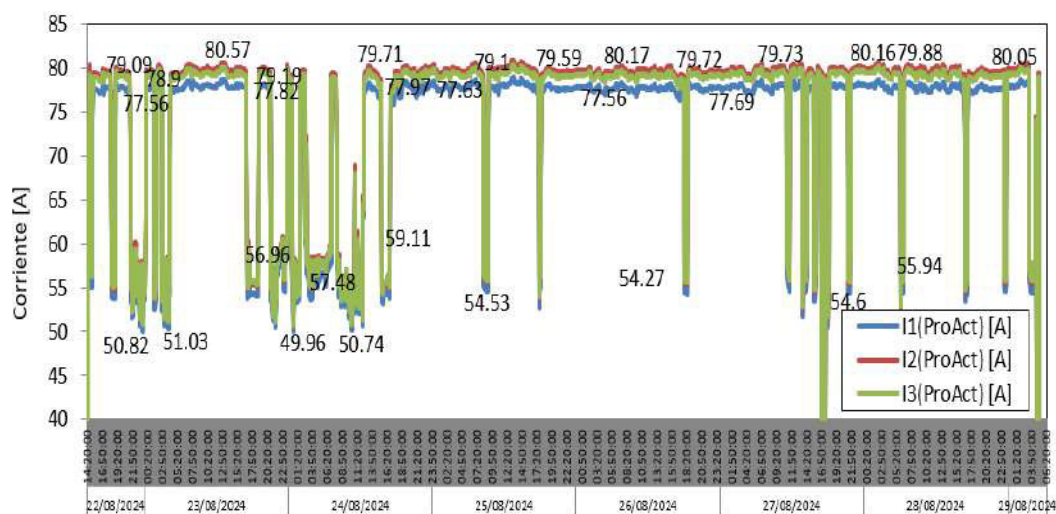


Figura 63 Medición de corriente de línea. Fuente. Elaboración propia

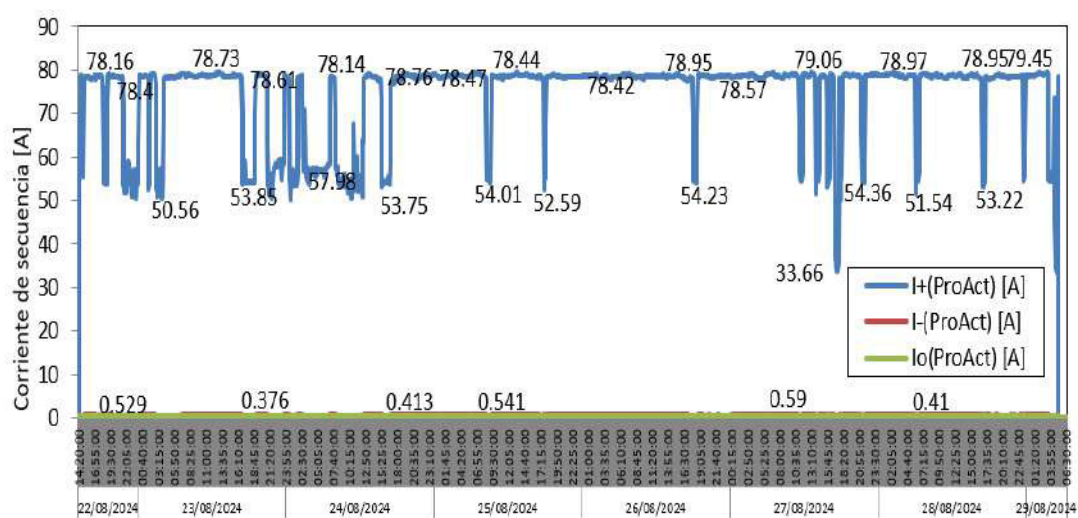


Figura 64 Medición de corriente de secuencia. Fuente. Elaboración propia

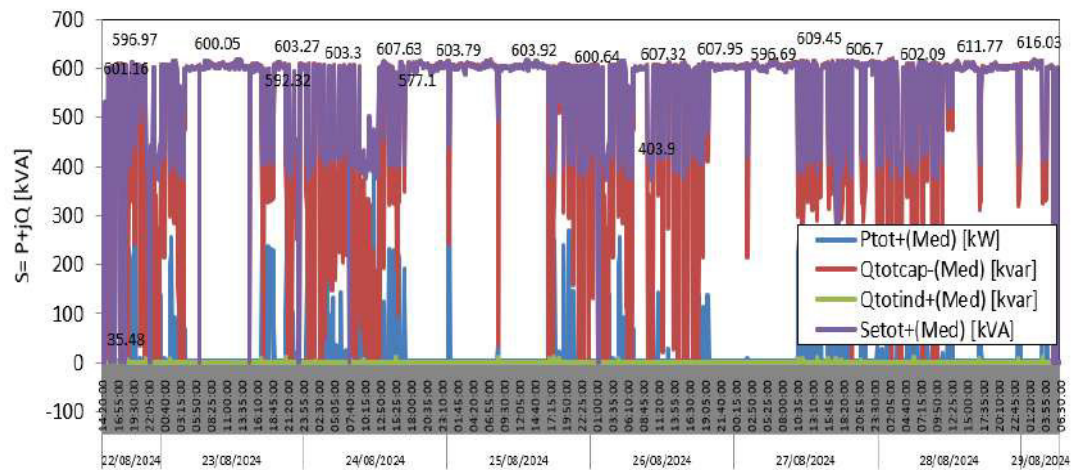


Figura 65 Medición potencias aparente, activa, reactiva (CAP, IND)

$S = P + jQ$. Fuente. Elaboración propia

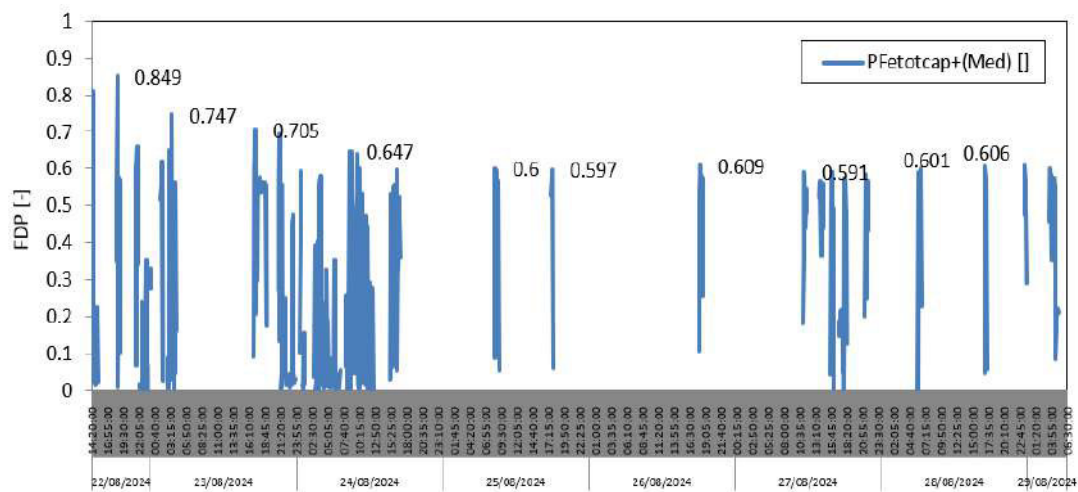


Figura 66 Medición registro de factor de potencia. Fuente. Elaboración propia

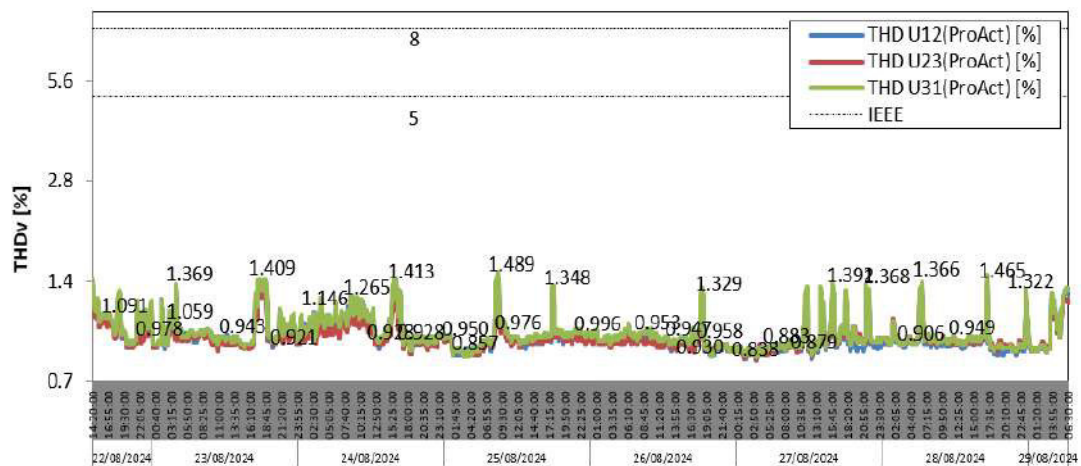


Figura 67 Medición THDv. Fuente. Elaboración propia

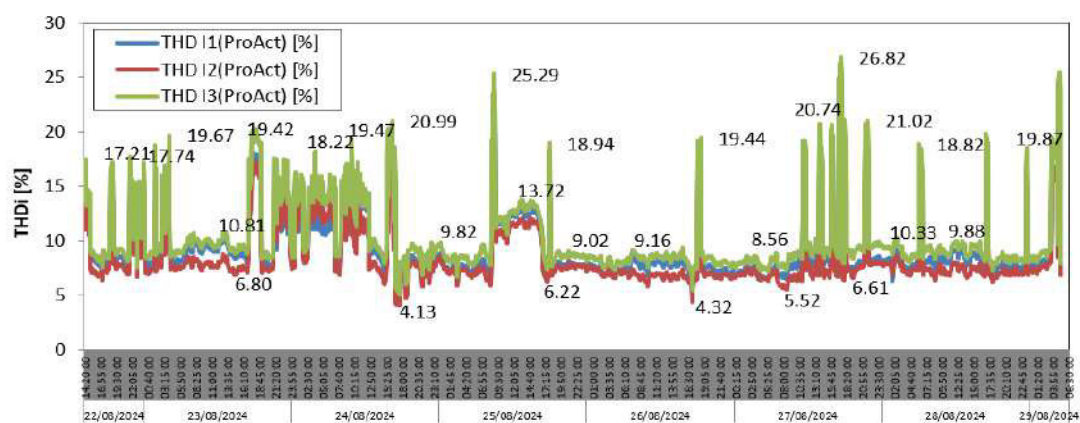


Figura 68 Medición THDi (%). Fuente. Elaboración propia

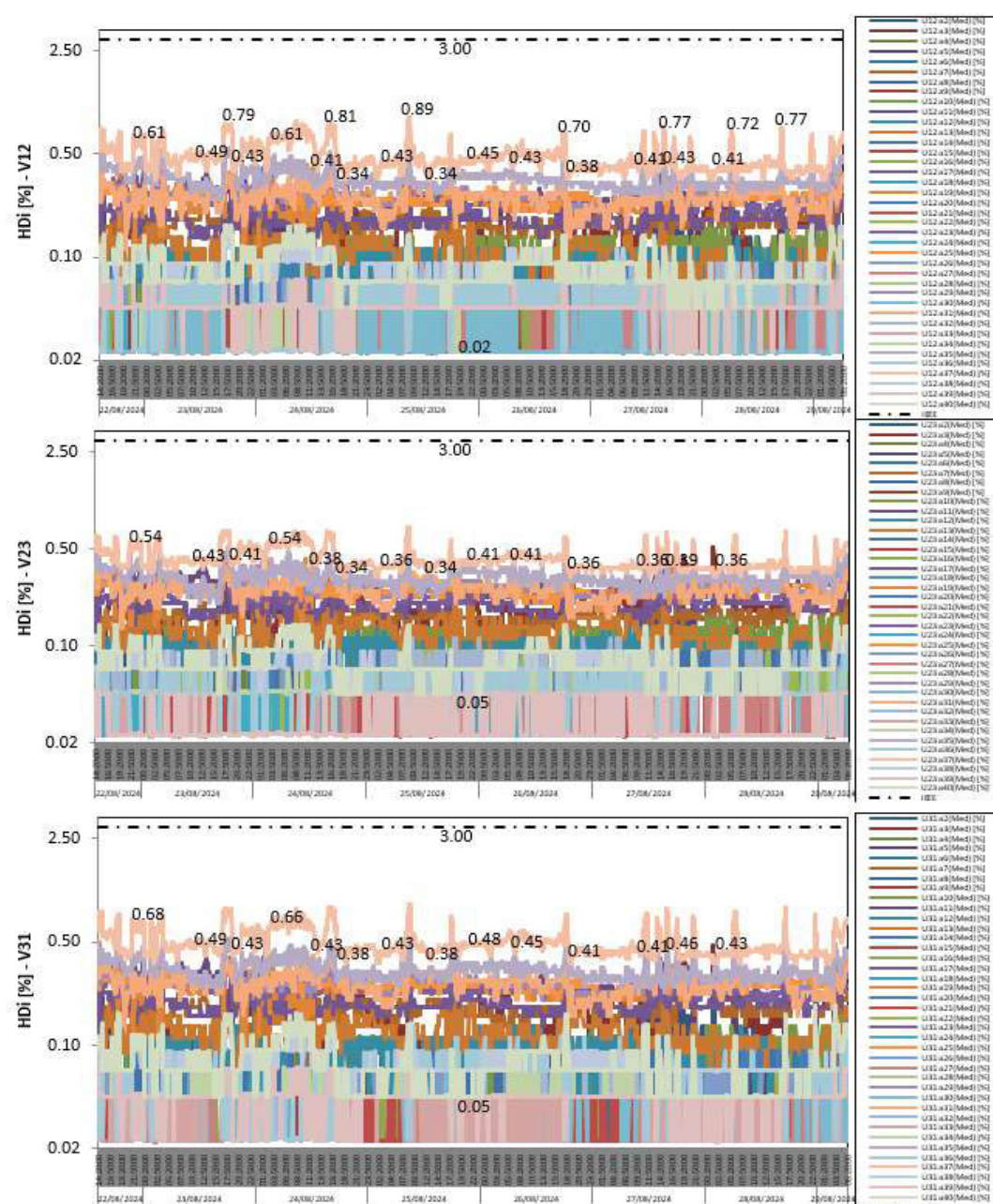


Figura 69 Medición HDv. Fuente. Elaboración propia

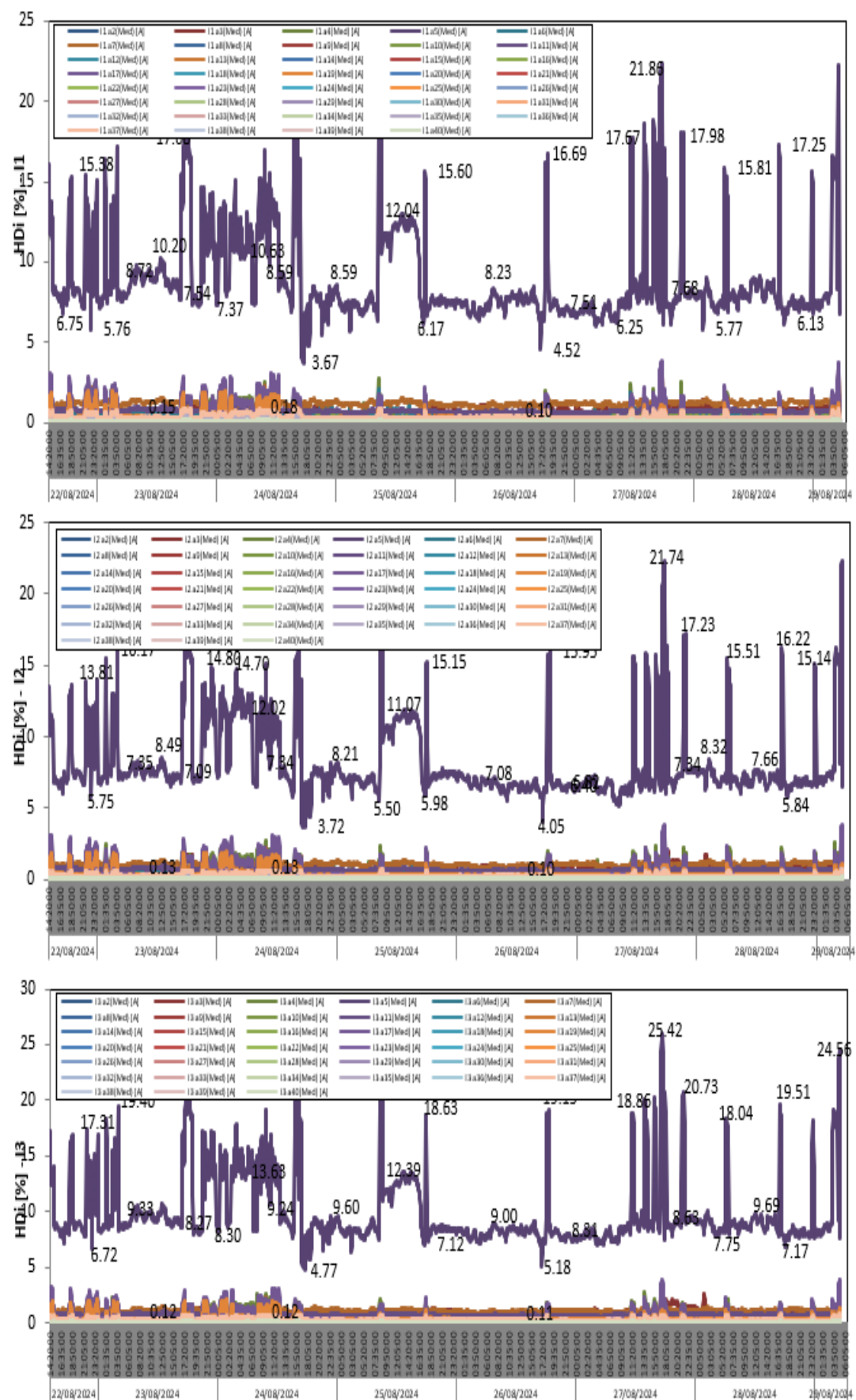


Figura 70 Medición HDI. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.3.1 Análisis estadístico de los resultados de medición del equipo 2 comparados con la normativa IEEE519 y NTCSE.

5.1.2.3.1.1 Análisis estadístico de distorsión armónica total de tensión (THDv) en equipo 2.

Los valores medidos de la distorsión armónica total de tensión en el equipo 2 durante el tiempo del estudio muestran niveles que se encuentran dentro de los rangos permitidos por la normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE).

Como se observa en el Cuadro 6, los valores máximos registrados alcanzan 1.46%, mientras que los valores promedio se sitúan en 1.15% y los mínimos en 0.83%, evidenciando una baja variabilidad durante el periodo de medición. Estos resultados se mantienen considerablemente por debajo del límite del 5% establecido por IEEE 519 y del 8% indicado por la NTCSE, lo que indica que el nivel de distorsión de tensión no representa una condición crítica en el punto evaluado.

Cuadro 6 Análisis estadístico de (THDv) en equipo 2

	R-S [%]			S-T [%]			T-R [%]			IEEE 519	NTC SE
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min		
THDv	1.46	1.15	0.83	1.46	1.15	0.83	1.46	1.15	0.83	5%	8%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.3.1.2 Análisis estadístico de distorsión armónica individual de tensión (HDv) en equipo 2.

Los valores medidos de la distorsión armónica de tensión en el equipo 2 durante el tiempo del estudio muestran niveles que se encuentran dentro de los rangos permitidos por la normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE). Los valores individuales de los armónicos se mantienen considerablemente por debajo del límite del 3% establecido para armónicos individuales de tensión, evidenciando un adecuado desempeño del sistema en términos de la distorsión armónica de tensión.

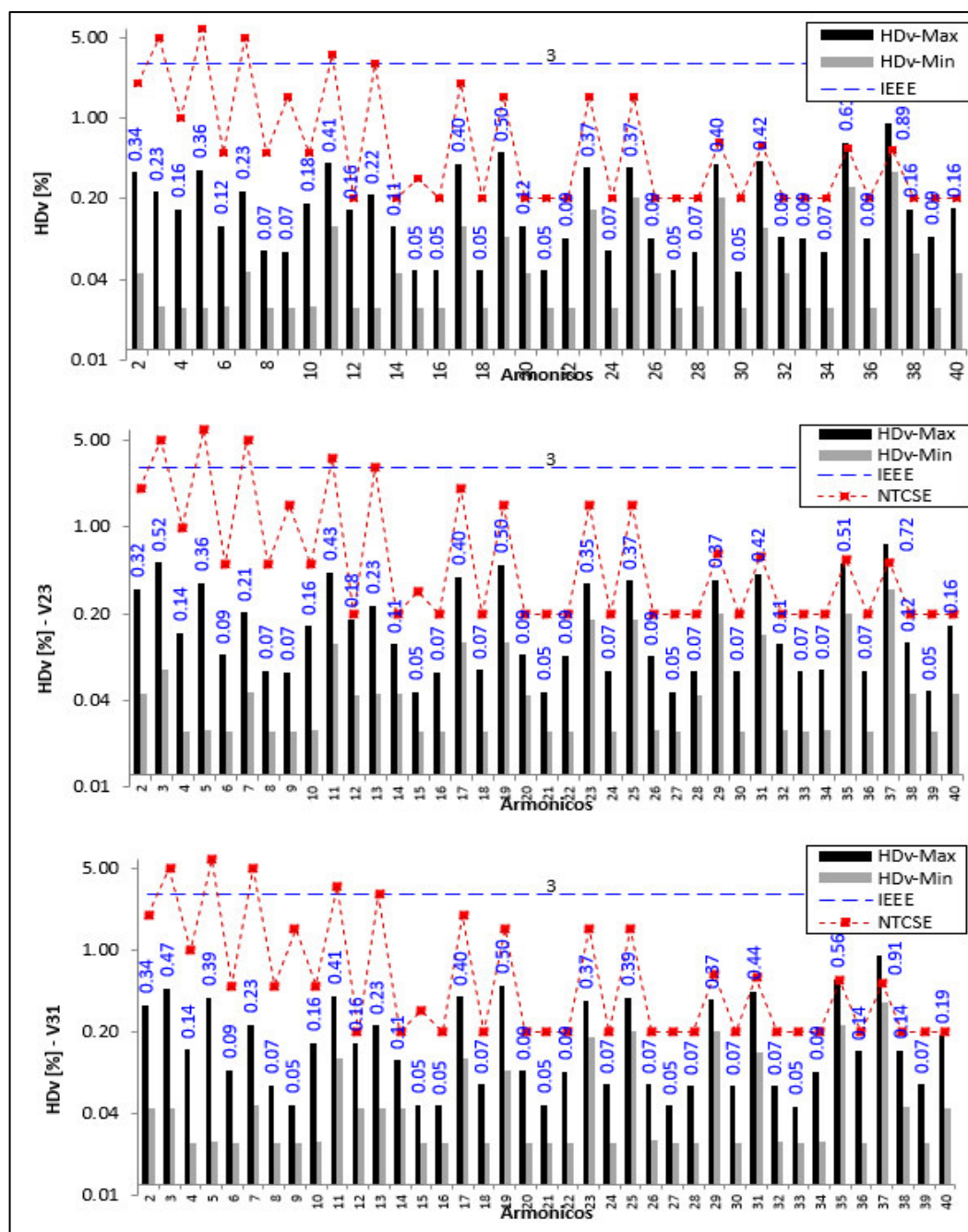


Figura 71 Análisis estadístico de (HDv) en equipo 2. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.3.1.3 Análisis estadístico de distorsión armónica total de corriente (THDi) en equipo 2

Los valores medidos de la distorsión armónica total de corriente en el equipo 2 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran fuera de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) como se muestra en el cuadro 4, cabe recalcar que los valores medidos dependen del nivel de cargabilidad existente en el sistema analizado.

Cuadro 7 Análisis estadístico de (THDi) en equipo 2

	R [%]			S [%]			T [%]			IEEE519
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	
THDi	25	15	4	25	15	4	25	15	4	5%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.3.1.4 Análisis estadístico de distorsión armónica de corriente en equipo 2.

El análisis estadístico de la distorsión armónica de corriente en el equipo 2 durante el tiempo del estudio evidencia la presencia de múltiples armónicos que superan los límites establecidos en la norma IEEE 519, sin embargo, la presencia del 5to armónico destaca con valores superiores al 20% en todas las fases y superando ampliamente el límite máximo permitido del 4% establecido en la norma IEEE 519.

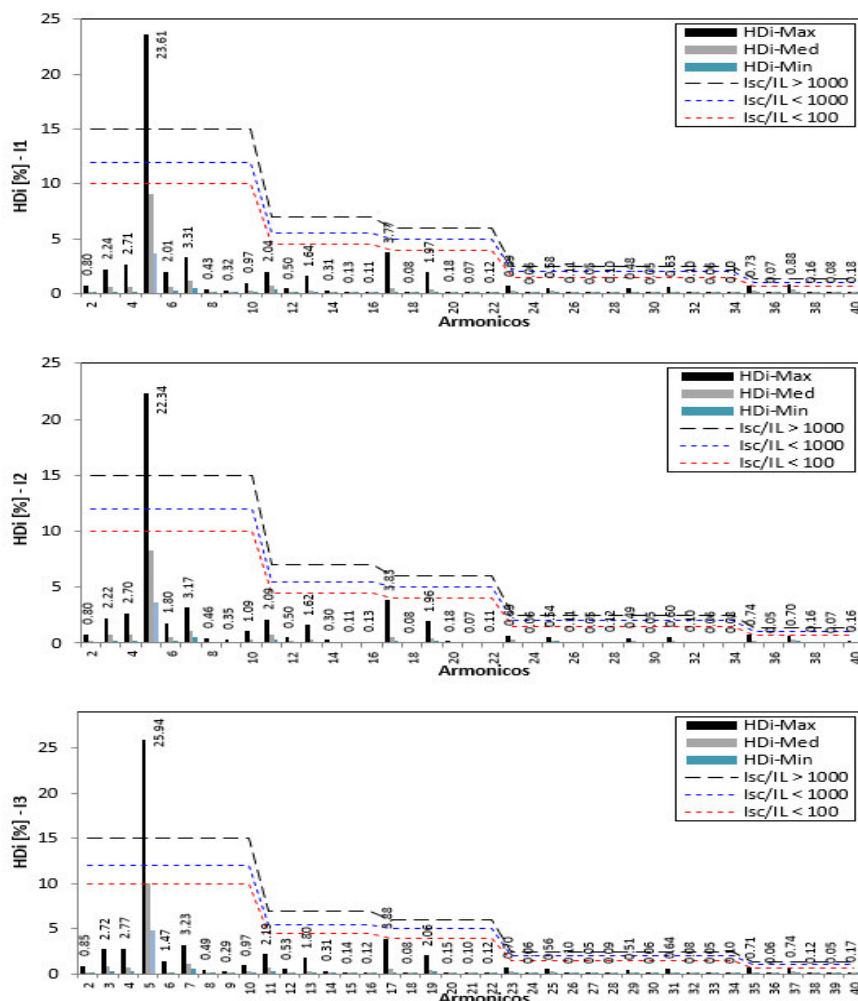


Figura 72 Análisis estadístico de (HDI) en equipo 2. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.4 Resultados de medición equipo 3 – S.E Totoral 13.8Kv

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la medición de calidad de energía realizado en campo con en el equipo 3 (Metrel MI2892) con cargas operando a menos del 50% de su cargabilidad total en el área 1200.



Figura 73 Equipo de medición en el SE TOTORAL. Fuente. Elaboración propia

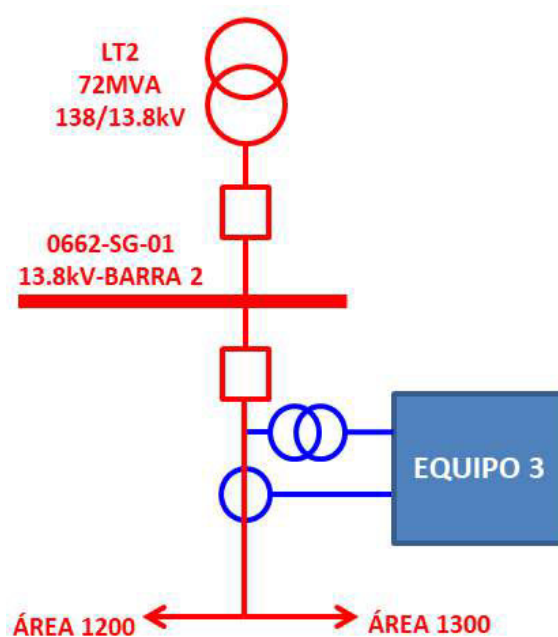


Figura 74 Unifilar del lugar de instalación EQUIPO 3. Fuente. Elaboración propia

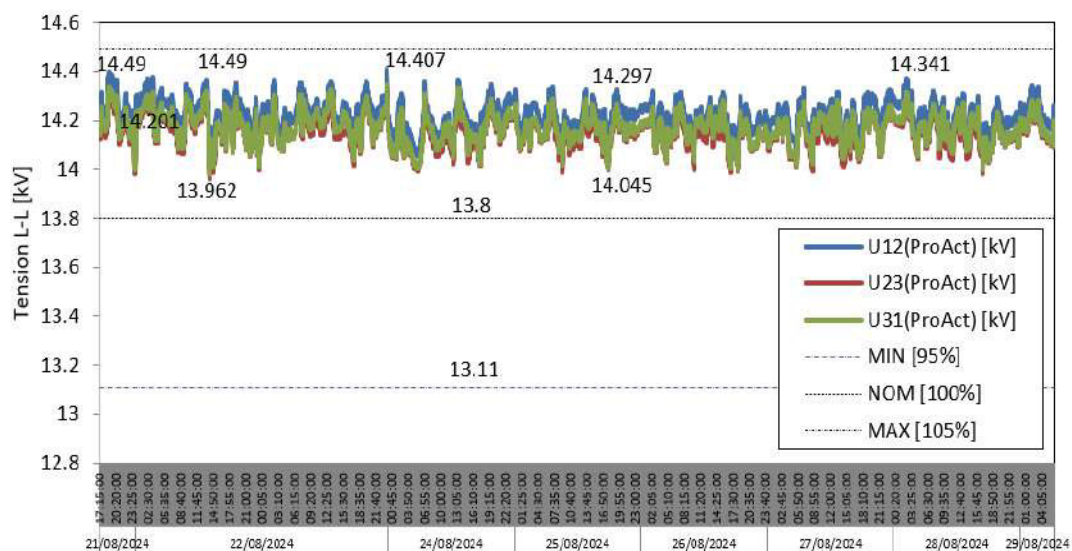


Figura 75 Medición de tensiones L-L. Fuente. Elaboración propia

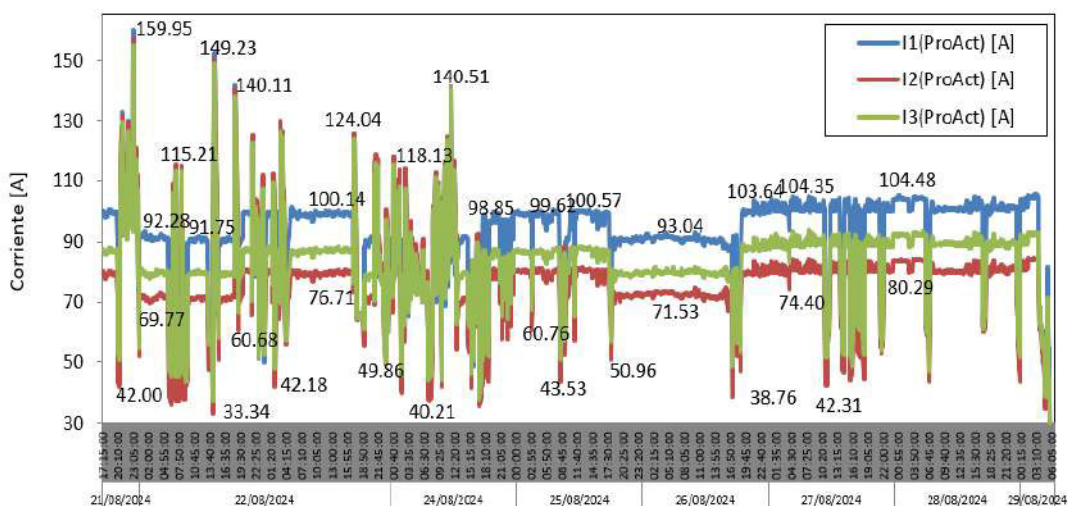


Figura 76 Medición de corriente de línea. Fuente. Elaboración propia

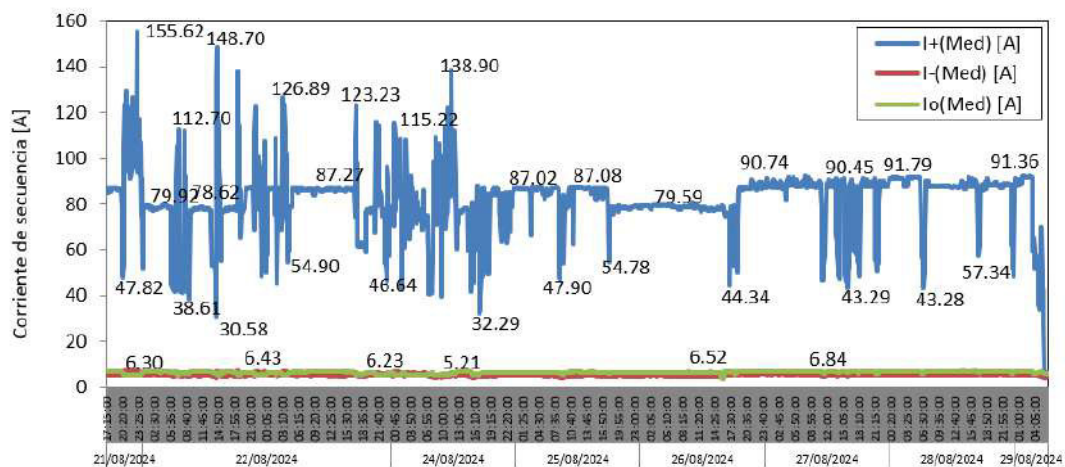


Figura 77 Medición de corriente de secuencia. Fuente. Elaboración propia

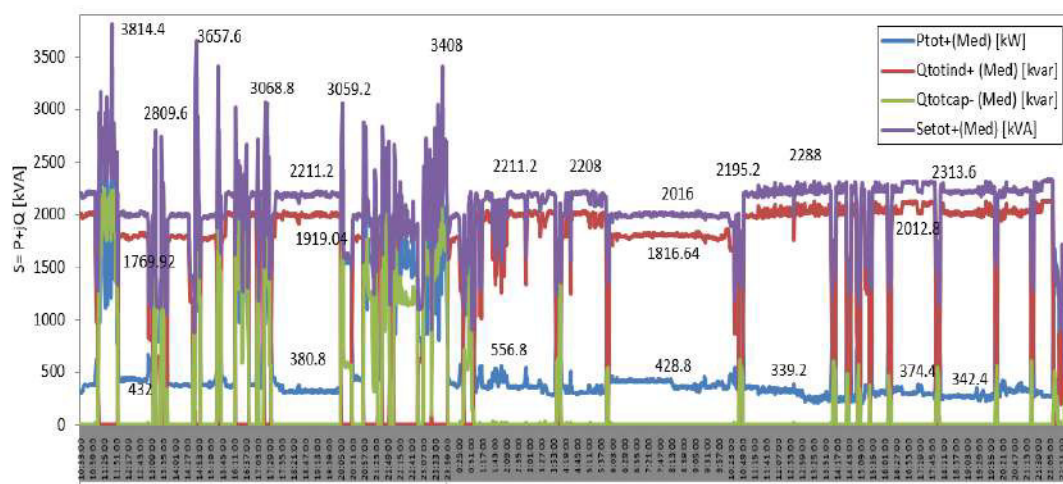


Figura 78 Medición potencias aparente, activa, reactiva (CAP, IND)

$S = P + jQ$. Fuente. Elaboración propia

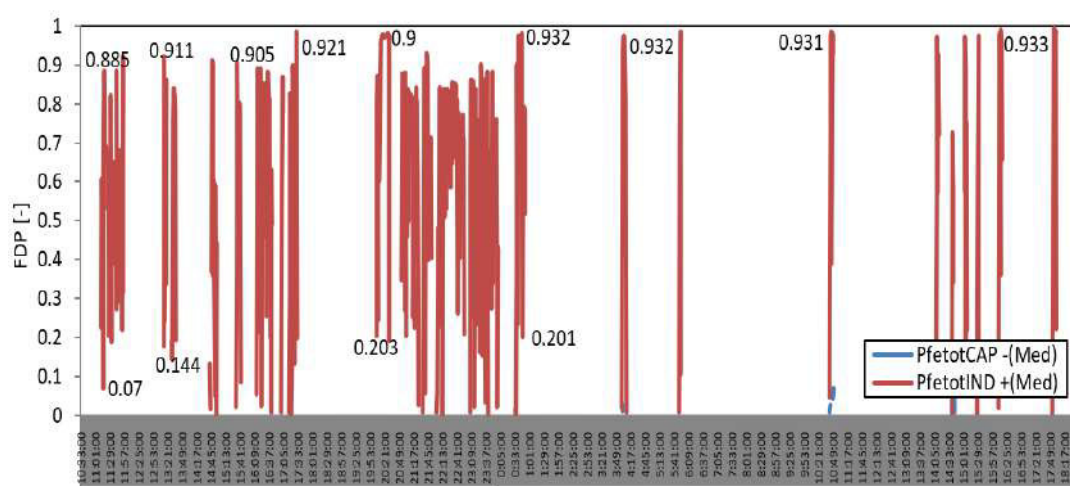


Figura 79 Medición registro de factor de potencia. Fuente. Elaboración propia

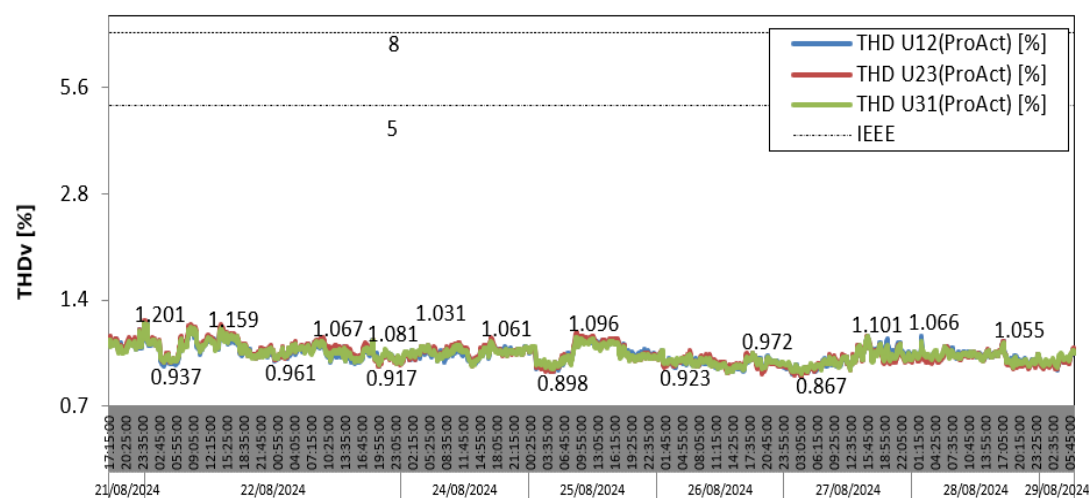


Figura 80. Medición THDv. Fuente. Elaboración propia

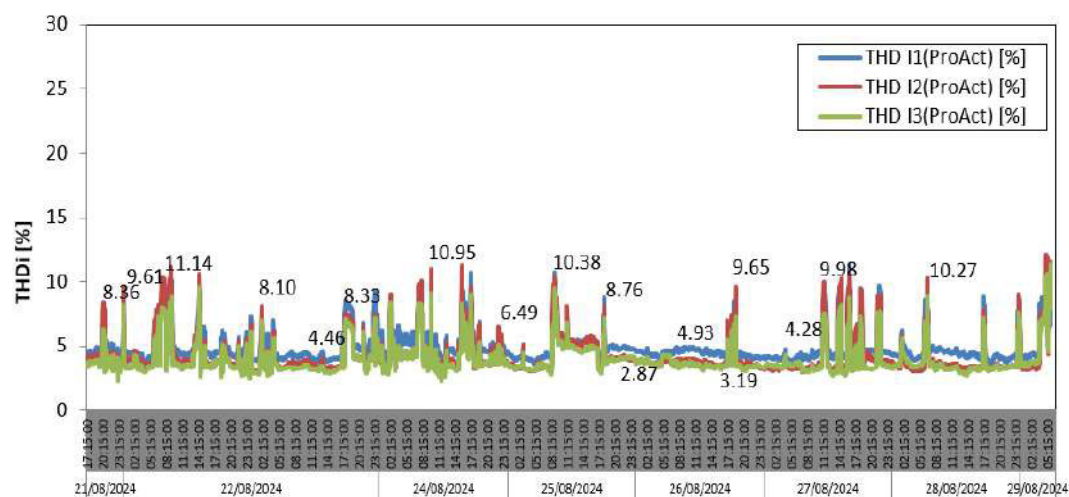


Figura 81 Medición THDi. Fuente. Elaboración propia

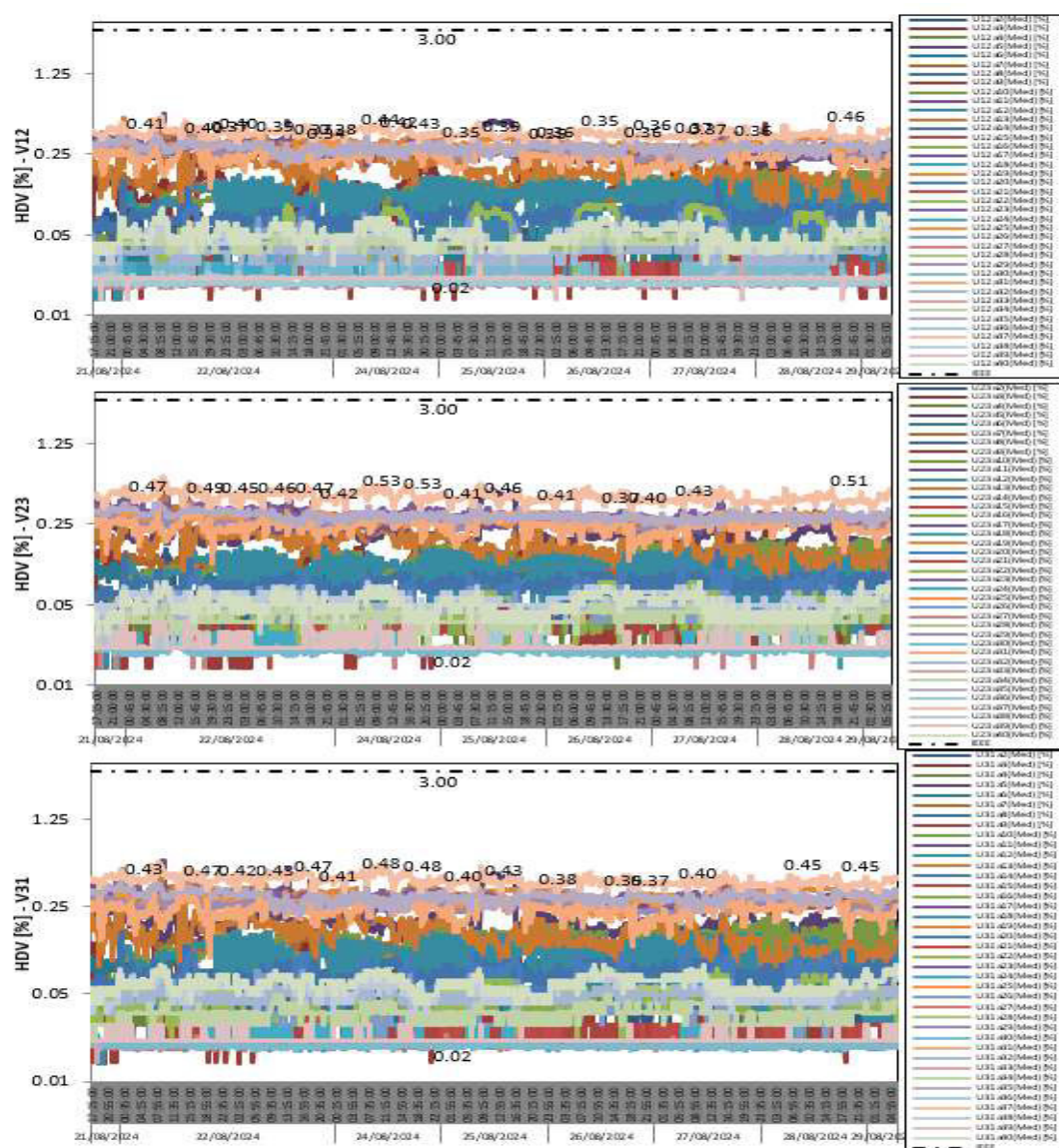


Figura 82 Medición HDV. Fuente. Elaboración propia

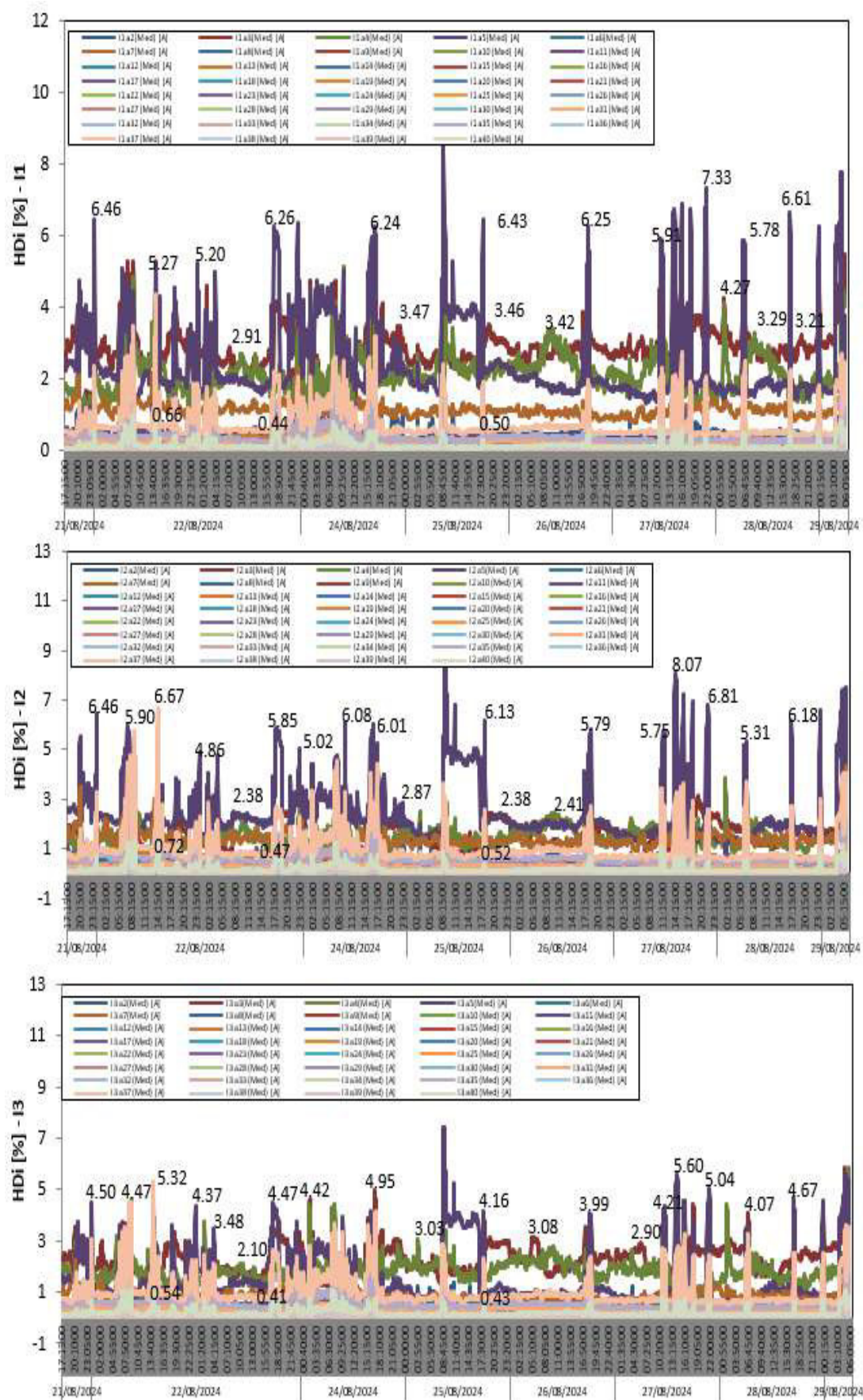


Figura 83 Medición HDI. Fuente. Elaboración propia

5.1.2.4.1 Análisis estadístico de los resultados de medición del equipo 3 comparados con la normativa IEEE519 y NTCSE.

5.1.2.4.1.1 Análisis estadístico de distorsión armónica total de tensión (THDv) en equipo 3.

Los valores medidos de la distorsión armónica total de tensión en el equipo 3 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran dentro de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE).

Asimismo, se observa que los valores máximos registrados no superan el 1.2%, manteniéndose considerablemente por debajo del límite del 5% establecido por la norma IEEE 519. La variación entre los valores máximos, medios y mínimos es reducida, lo que evidencia estabilidad en el comportamiento armónico del sistema. Estos resultados permiten concluir que el equipo 3 opera bajo condiciones adecuadas de calidad de energía.

Cuadro 8 Análisis estadístico de (THDv) en equipo 3

	R-S [%]			S-T [%]			T-R [%]			IEEE 519	NTC SE
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min		
THDv	1.2	1.03	0.86	1.2	1.03	0.86	1.2	1.03	0.86	5%	8%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.4.1.2 Análisis estadístico de distorsión armónica individual de tensión (HDv) en equipo 3.

Los valores medidos de la distorsión armónica de tensión en el equipo 3 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran dentro de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) y la normativa eléctrica nacional peruana (NTCSE).

los armónicos individuales evaluados se mantienen por debajo del límite del 3% establecido por la norma NTCSE para distorsión individual de tensión. No se identifican incrementos significativos en órdenes armónicos específicos que puedan indicar fenómenos de resonancia.

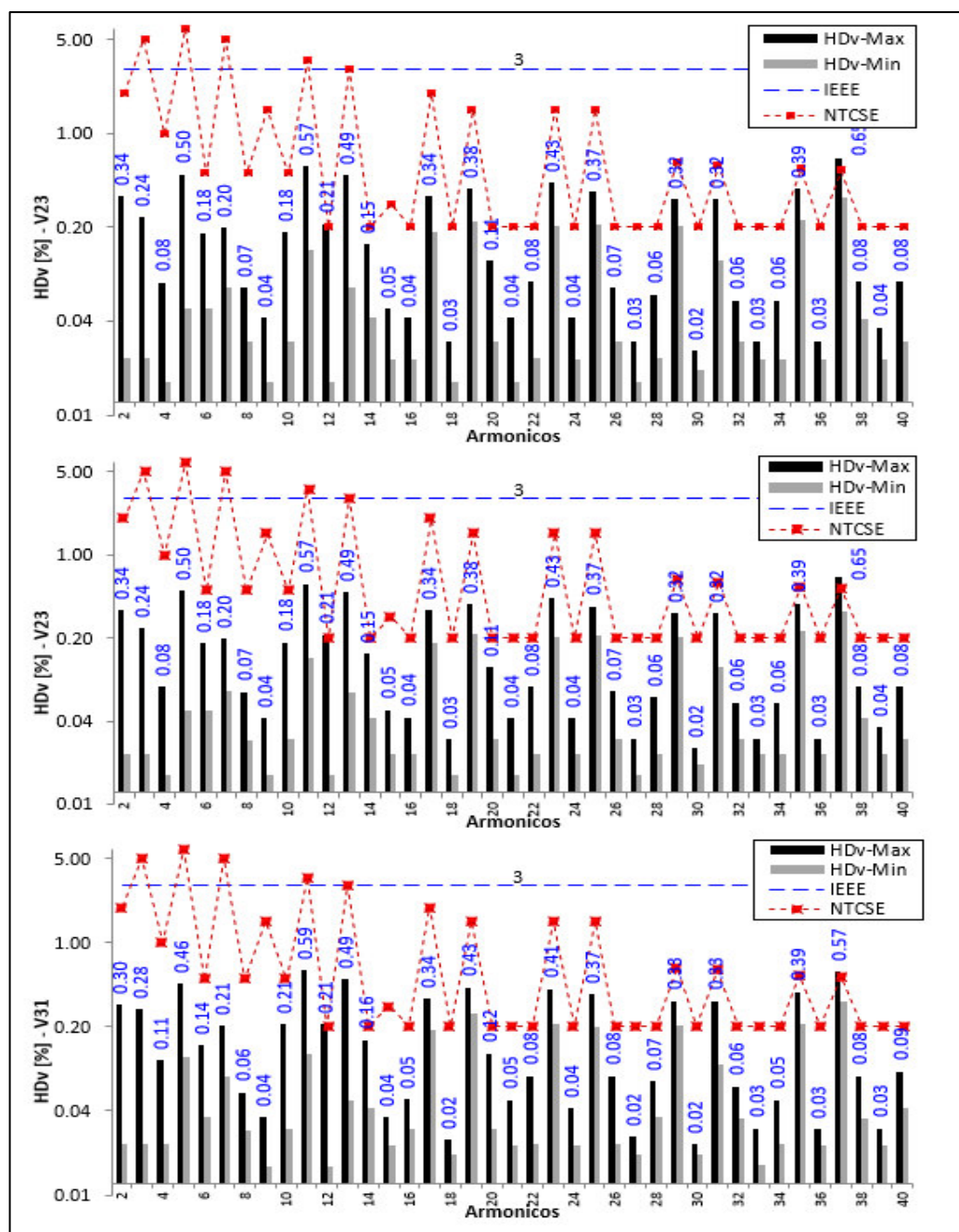


Figura 84 Análisis estadístico de (HDv) en equipo 3. Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.4.1.3 Análisis estadístico de distorsión armónica total de corriente (THDi) en equipo 2

Los valores medidos de la distorsión armónica total de corriente en el equipo 3 durante el tiempo del estudio muestran valores que se encuentran fuera de los rangos permitidos por normativa eléctrica internacional (IEEE 519) como se muestra en el cuadro 9, cabe recalcar que los valores medidos dependen del nivel de cargabilidad existente en el sistema analizado.

Cuadro 9 Análisis estadístico de (THDi) en equipo 3

	R [%]			S [%]			T [%]			IEEE519
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	
THDi	11	7	3	11	7	3	11	7	3	5%

Fuente. Elaboración propia.

5.1.2.4.1.4 Análisis estadístico de distorsión armónica de corriente en equipo 3.

El análisis estadístico de la distorsión armónica de corriente en el equipo 3 durante el tiempo del estudio evidencia la presencia de múltiples armónicos que superan los límites establecidos en la norma IEEE 519, sin embargo, la presencia del 5to armónico destaca con valores superiores al 7% en todas las fases y superando ampliamente el límite máximo permitido del 4% establecido en la norma IEEE 519.

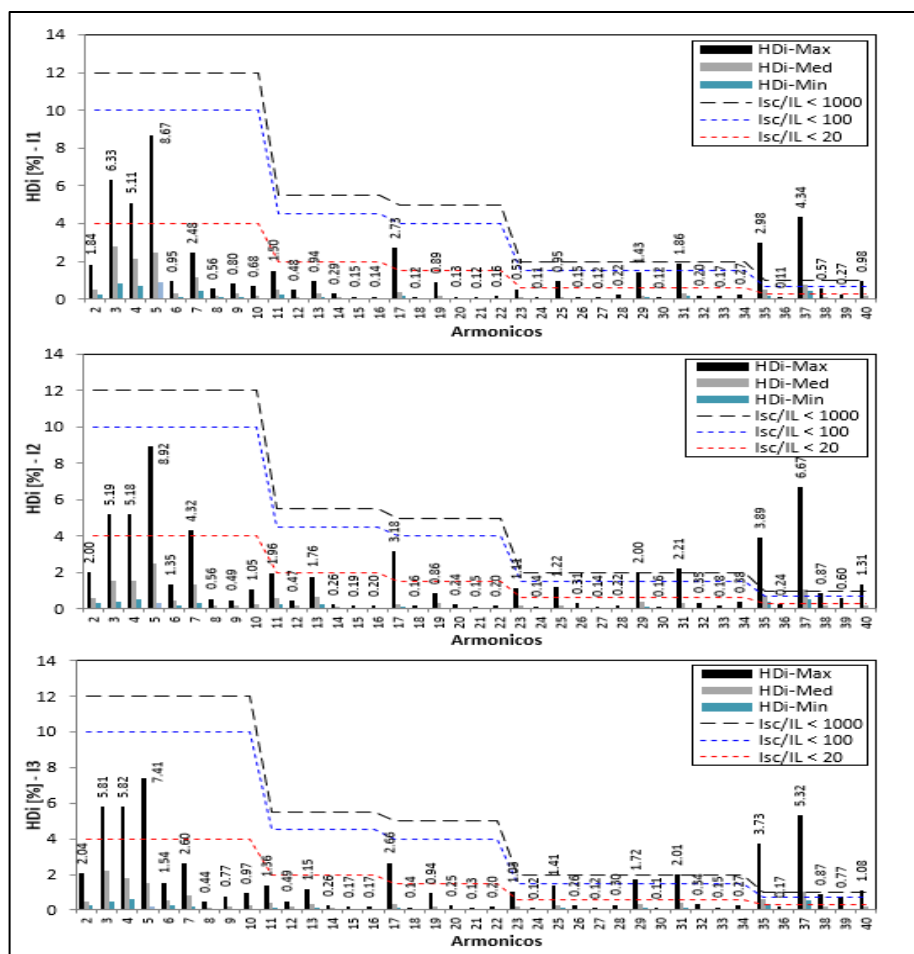


Figura 85 Análisis estadístico de (HDI) en equipo 3. Fuente. Elaboración propia.

5.1.3 Análisis eléctrico del área 1200 con software Etap.

En esta sección se desarrolla el modelado del sistema eléctrico del área 1200 área 1300 y S.E total en el software Etap, tomando como referencia los parámetros eléctricos registrados durante la etapa de puesta en marcha en el área 1200, la información técnica documental y de la red eléctrica suministrada por la unidad minera. Es importante mencionar que el área 1300 es una unidad que trabaja bajo condiciones de carga nominal, manteniendo un funcionamiento estable en el periodo de evaluación, mientras que el Área 1200 se encontraba en proceso de puesta en marcha, operando con niveles de cargabilidad menores 50% de la carga nominal.

Ambas áreas son alimentadas desde una celda principal en la S.E. Totoral, por lo que su análisis conjunto permite evaluar la interacción eléctrica entre ellas y su incidencia en los indicadores de calidad de energía. El objetivo principal de la simulación es determinar el comportamiento de los niveles de distorsión armónica y de la potencia reactiva bajo diferentes escenarios de cargabilidad en el área 1200 y a partir de los resultados obtenidos se definirán las alternativas más adecuadas para la mitigación de armónicos y la mejora del factor de potencia.

5.1.3.1 Punto conexión del sistema eléctrico

La S.E Totoral en 13.8kV, es alimentada con dos transformadores de potencia, LT1 de 40MVA y LT2 67MVA, los mismos que bajan la tensión de 138kV a 13.8kV, finalmente, los dos transformadores, están separados en el lado de 13.8kV, con un interruptor de enlace (TIE), para las maniobras de mantenimiento.

La operación con el TIE abierto o cerrado, viene a ser un factor importante para el análisis de calidad de energía, ya que nos ofrece valores de cortocircuito distintos y estos se involucran directamente en el análisis de límites máximos según la norma IEEE 519.

A continuación, se muestra la S.E Totoral 138/13.8kV. Esta configuración operativa permite evaluar diferentes escenarios de rigidez del sistema eléctrico en la barra de 13.8kV.

5.1.3.2 Consideraciones del cálculo para el estudio

Para la red equivalente en la barra de conexión al sistema de 138KV, se ha considerado los valores otorgados por la mina e indicados en el COES.

Cuadro 10 Red equivalente barra de 138kV

BARRA	Scc [MVA]		Icc [kA]		X/R		FUENTE
	3PH	1PH	3PH	1PH	3PH	1PH	
138KV	1400.197	1461.796	5.858	6.116	7.782	6.075	COES

Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se indica un cuadro resumen con los datos de la red equivalente de la barra 13.8KV del transformador LT1, estos datos fueron hallados a partir de simulación de corto circuito en Etap, para la simulación de armónicos en el sistema en base a las mediciones realizadas en campo.

Cuadro 11 Red equivalente 13.8KV

BARRA	3PH [kA]	X/R	1PH[kA]	X0/R0
13.8KV	15.221	17.776	0.398	0.0063

Fuente. Elaboración propia.

Los casos de simulación, se va a considerar los casos más críticos de corriente de corto circuito, de la configuración de la subestación principal que corresponde cuando el transformador LT1 está en operación, ya que la corriente de corto circuito influye directamente en los límites máximos para corrientes armónicas.

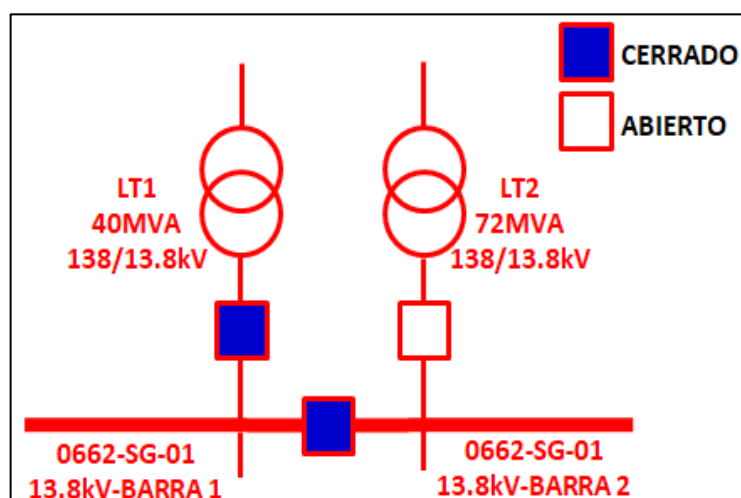


Figura 88 Alimentación desde el transformador LT1. Fuente. Elaboración propia

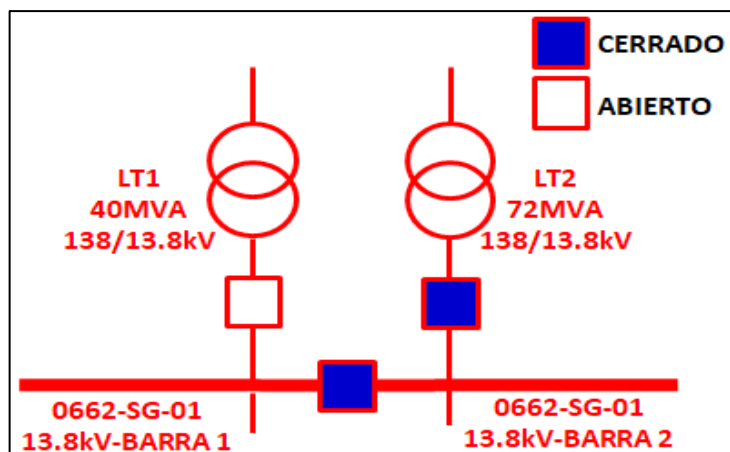


Figura 89 Alimentación desde el transformador LT2. Fuente. Elaboración propia

5.1.3.3 Cálculo de ISC/IL

En base a las 2 posibles alimentaciones de los transformadores LT1 y LT2 se hace la simulación de cortocircuito en ETAP en las barras del sistema a estudiar y se divide entre la corriente nominal de las zonas a estudiar. Con los cálculos de I_{sc}/I_L , se ha definido los casos más críticos para las simulaciones, para este caso resulta alimentada desde el transformador LT1.

Cuadro 12 Cálculo de I_{sc} / I_L

ÁREA 1200	CORRIENTE NOMINAL	Isc (KA)/ IL							
		LT1	LT2	LT1	LT2	LT1	LT2	LT1	LT2
		15.22	20.92	3.06	3.23	6.84	7.10	5.66	5.83
S.E Totoral 13.8Kv	1.600A	9.5	13.1						
Sala 1100 13.8kV TR 10MVA	418.3A			7.3	7.7				
Sala 1100 4.16kV TR 10MVA	1387.8A					4.9	5.1		
Sala 1200 4.16kV VFD 1140HP	135.8A							41.7	42.9

Fuente. Elaboración propia.

5.1.3.4 Escenario de simulación

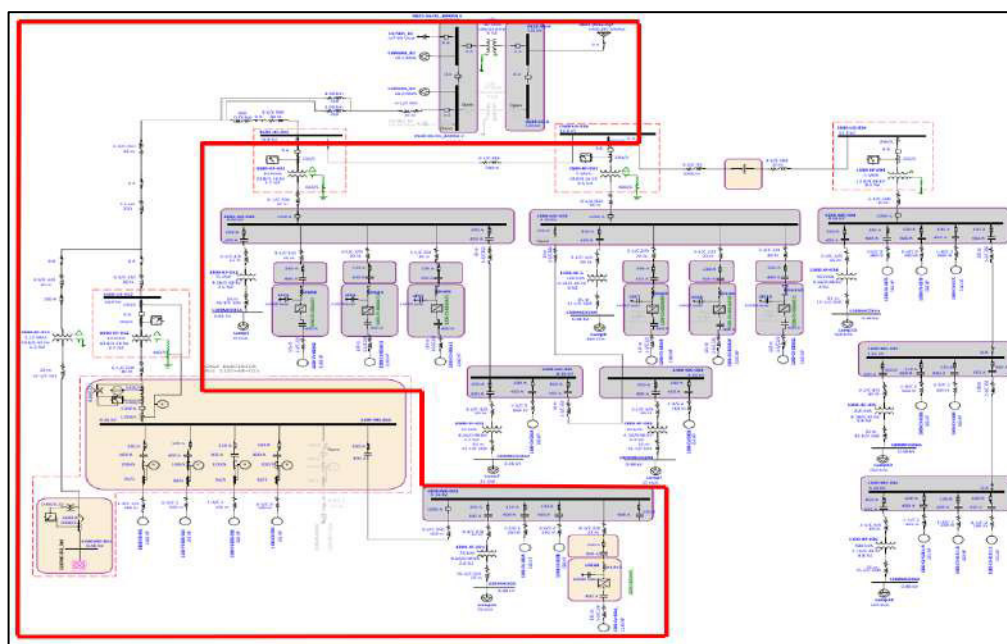


Figura 90 Escenario de simulación. Fuente. Elaboración propia

5.1.3.5 Escenarios de simulación de las cargas

Para todas las cargas que componen el área 1200 que son las salas eléctricas 1100-ER-011 y 1200-ER-021, se simularán a un 25%, 50% y 90% de cargabilidad.

5.1.3.6 Punto de acoplamiento común (PCC)

El PCC para el análisis de armónicos será la entrada de alimentación en media tensión de la sala 1100-ER-011 ya que esta es la entrada de alimentación tanto para la sala 1100-ER-011 y sala 1200-ER-021 que componen el área 1200

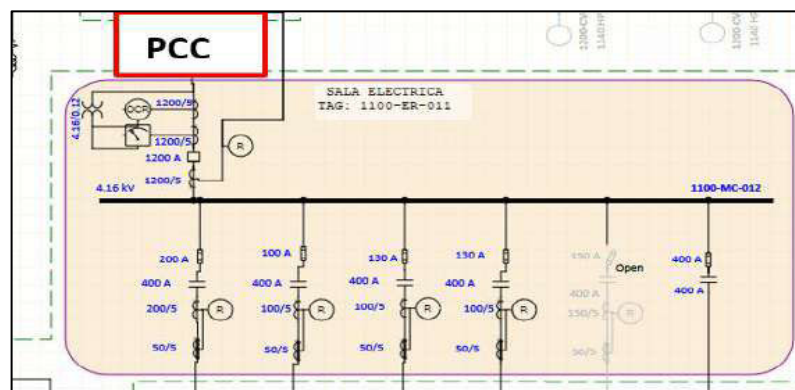


Figura 91 Puntos de acoplamiento común (PCC). Fuente. Elaboración propia

5.1.3.7 Parametrización de armónicos de tensión y corriente en la simulación del sistema eléctrico en Etap

En esta sección trata de la representación adecuada de los armónicos en Etap, fundamental para obtener resultados que reflejen el comportamiento real del sistema. Se modelará la fuente de conexión a la red, se modelarán las cargas generadoras de armónicos de corriente y las cargas con bajo factor de potencia, ya que son ellas las que inyectan corrientes deformadas que interactúan con la red.

5.1.3.7.1 Armónicos de tensión de la red barra 13.8kV - S.E Totoral

Se tienen los siguientes datos de las mediciones de calidad realizadas en campo, se tomará los valores máximos para las simulaciones de fuente de armónicos de tensión, para las fases RST.

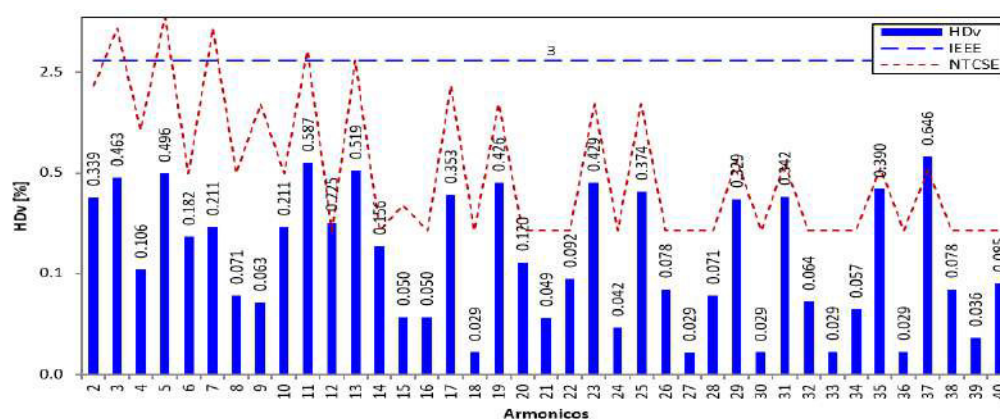


Figura 92 HDv –SE TOTORAL 13.8kV. Fuente. Elaboración propia

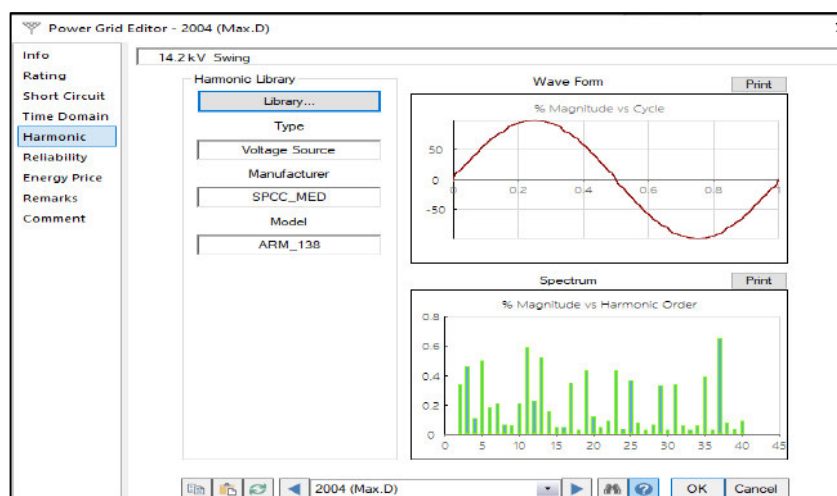


Figura 93 Modelamiento de fuente armónica de tensión en S.E total lado 13.8kv en Etap. Fuente. Elaboración propia

Cuadro 13 Armónicos de tensión fases R, S y T

Armónicos Individuales	HDv [%]	IEEE [%]	NTCSE [%]
2	0.339	3	2
3	0.463	3	5
4	0.106	3	1
5	0.496	3	6
6	0.182	3	0.5
7	0.211	3	5
8	0.071	3	0.5
9	0.063	3	1.5
10	0.211	3	0.5
11	0.587	3	3.5
12	0.225	3	0.2
13	0.519	3	3
14	0.156	3	0.2
15	0.050	3	0.3
16	0.050	3	0.2
17	0.353	3	2
18	0.029	3	0.2
19	0.426	3	1.5
20	0.120	3	0.2
21	0.049	3	0.2
22	0.092	3	0.2
23	0.429	3	1.5
24	0.042	3	0.2
25	0.374	3	1.5
26	0.078	3	0.2
27	0.029	3	0.2
28	0.071	3	0.2
29	0.329	3	0.61
30	0.029	3	0.2
31	0.342	3	0.59
32	0.064	3	0.2
33	0.029	3	0.2
34	0.057	3	0.2
35	0.390	3	0.54
36	0.029	3	0.2
37	0.646	3	0.52
38	0.078	3	0.2
39	0.036	3	0.2
40	0.085	3	0.2

Fuente. Elaboración propia.

5.1.3.7.2 Armónicos de corriente en VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021

La información entregada por la mina y por los registros de campo se corrobora que el variador instalado en la sala 1200-ER-021 es un variador marca Rockwell Automation con Rectificador de modulación por ancho de pulsos (PWM) debido a sus Reactor de línea y capacitores en la entrada del variador encontrados en la medición en campo, estas características encontradas en campo fueron contrastadas con los diagramas eléctricos del variador proporcionados por la mina y datasheet del fabricante del variador.

Toda esta identificación técnica fue fundamental para modelar adecuadamente el variador en el software ETAP, permitiendo definir correctamente el tipo de rectificador, el espectro armónico esperado y los parámetros eléctricos asociados. De esta manera, la simulación armónica realizada refleja de forma representativa el comportamiento real del equipo en operación, garantizando coherencia entre los resultados medidos en campo y los obtenidos mediante modelamiento.



Figura 94 VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021. Fuente. Elaboración propia

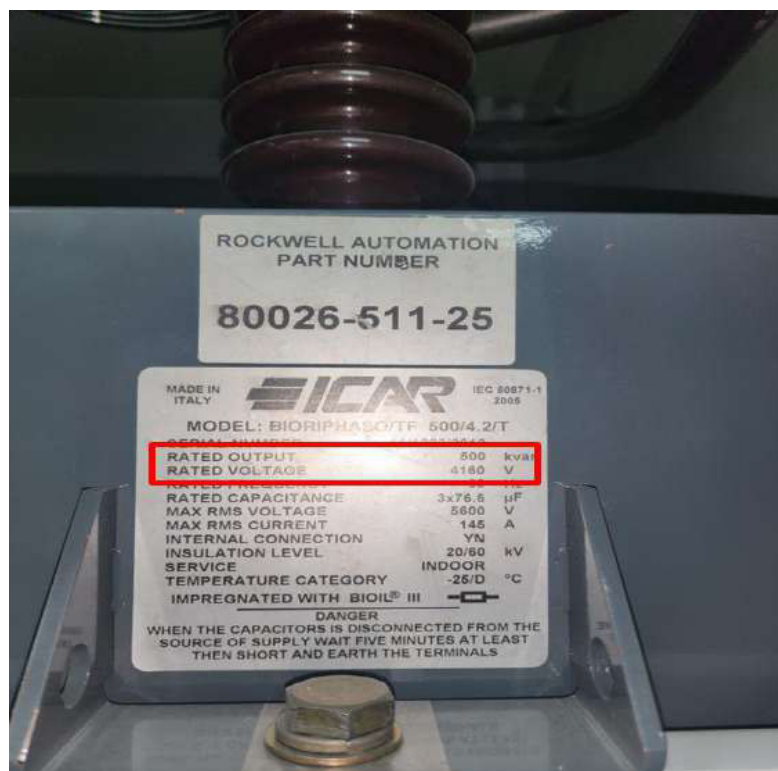


Figura 95 Capacitor de entrada VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021.

Fuente. Elaboración propia



Figura 96 Reactor de entrada VFD 1140HP DE LA SALA 1200-ER-021.

Fuente. Elaboración propia

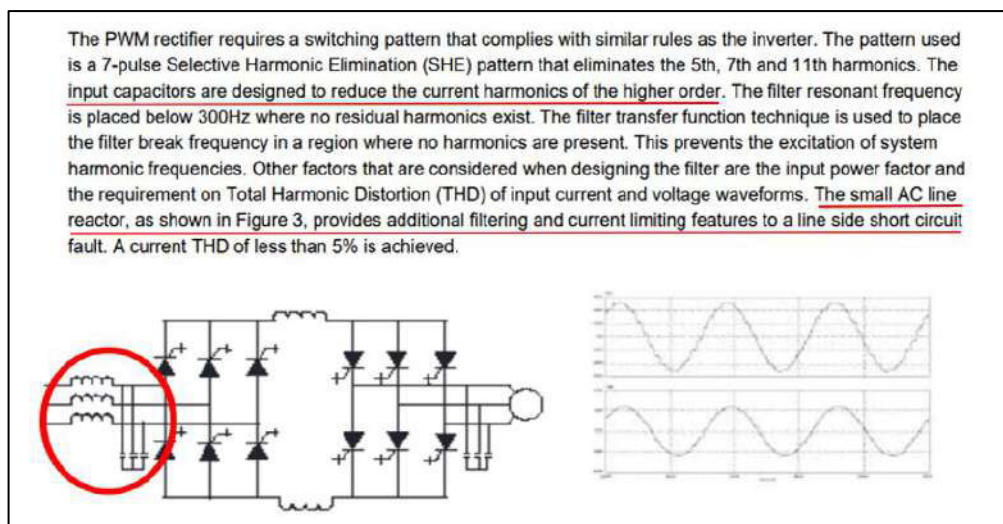


Figura 97 Datasheet de variador con rectificador PWM. Fuente. Datos tomados de Rockwell Automation (2002).

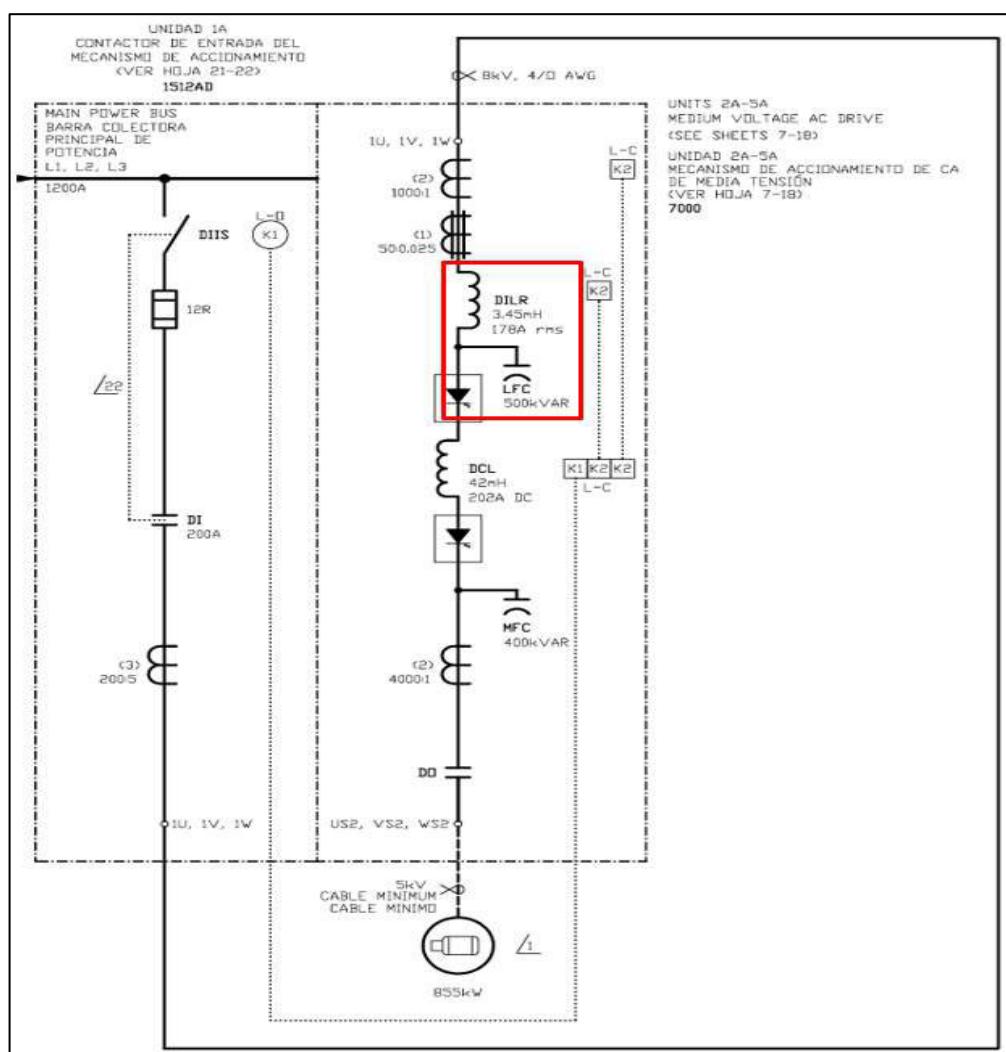


Figura 98 Diagrama eléctrico VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021 proporcionado por la mina. Fuente. Elaboración propia

Con todo lo expuesto para las simulaciones de inyección de armónicos del VFD 1140HP, se ha considerado el siguiente dato para la simulación que serán el espectro de armónicos del variador, el reactor de entrada y el capacitor de entrada:

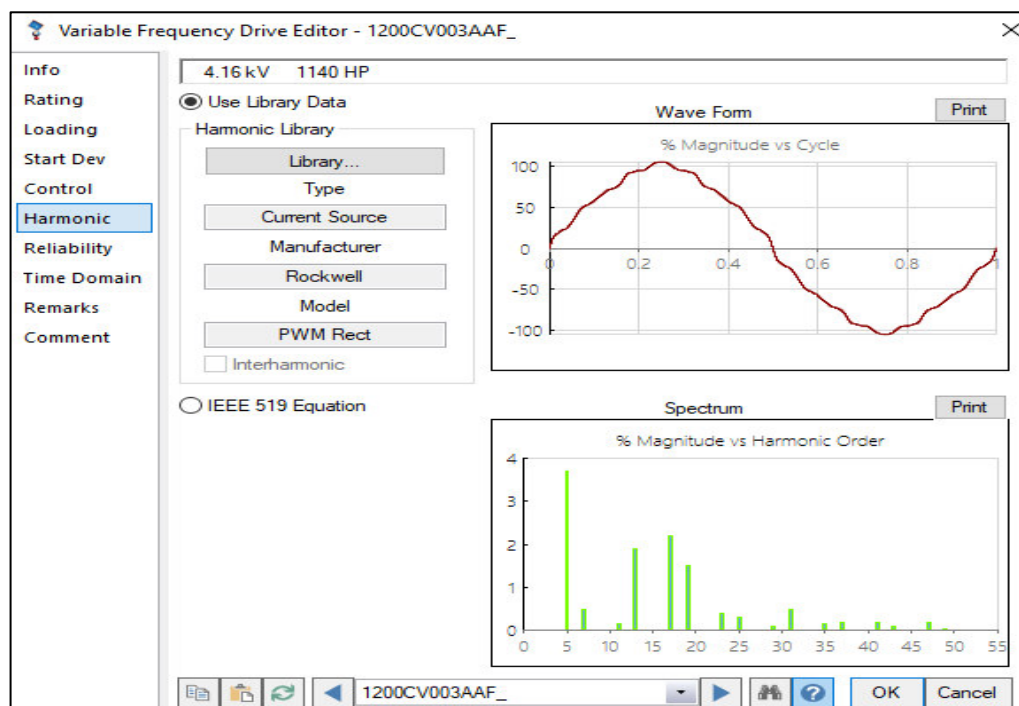


Figura 99 Espectro de armónicos en VFD 1140HP DE LA SALA 1200-ER-021. Fuente. Elaboración propia

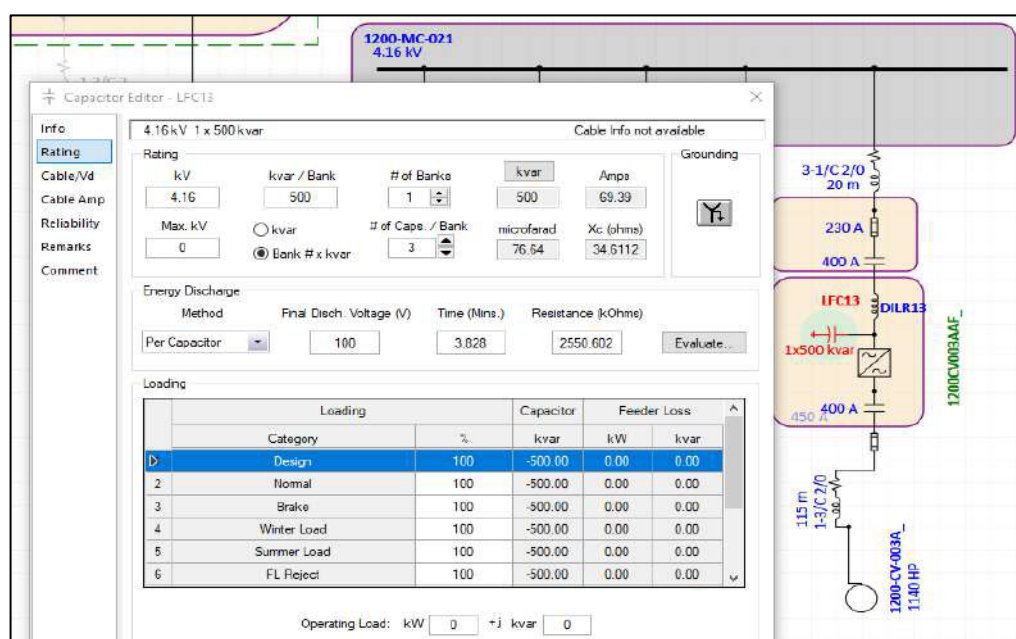


Figura 100 Capacitor de entrada VFD 1140HP DE LA SALA 1200-ER-021. Fuente. Elaboración propia.

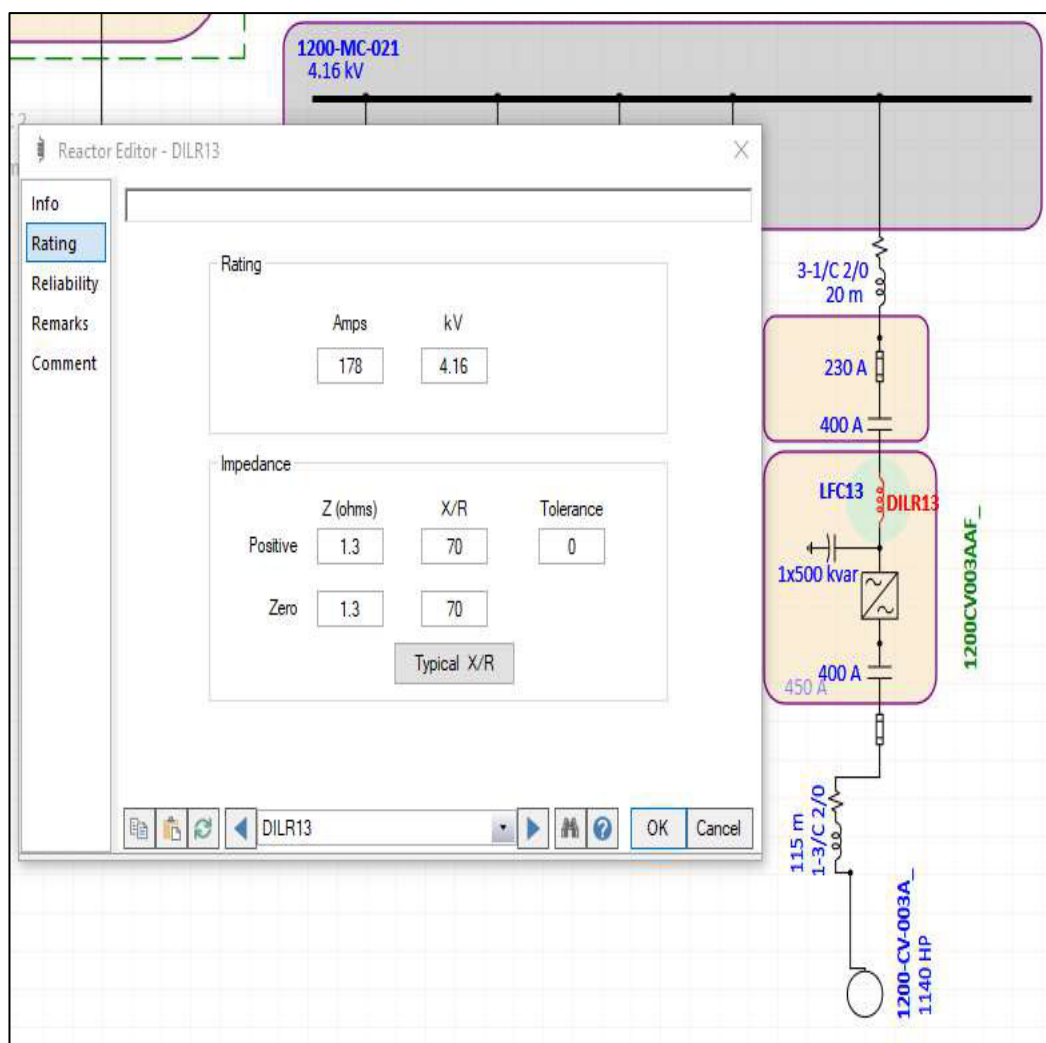


Figura 101 Reactor de entrada VFD 1140HP de la sala 1200-ER-021.

Fuente. Elaboración propia

5.1.3.8 Resultados de simulación

5.1.3.8.1 Motores en 4.16kV - 25% de carga

Para este escenario, se han realizado las simulaciones de armónicos, con el siguiente resultado:

Cuadro 14 Resultados simulación régimen armónico-motores al 25%

CASO	1100-ER-011 (PCC)			1200-ER-021		
	THDi	HDi 5h	THDv	THDi	HDi 5h	THDv
25%	%	%	%	%	%	%
	19.52	19.5	0.871	23.05	23	3.54

Fuente. Elaboración propia.

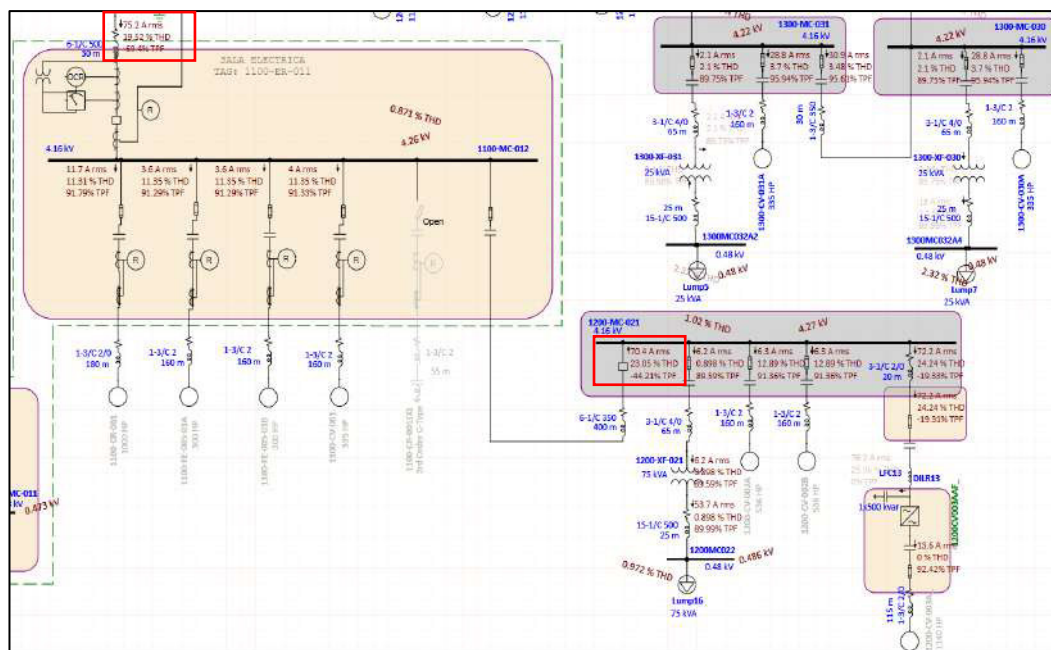


Figura 102 Resultados simulación régimen armónico-motores al 25%.
Fuente. Elaboración propia

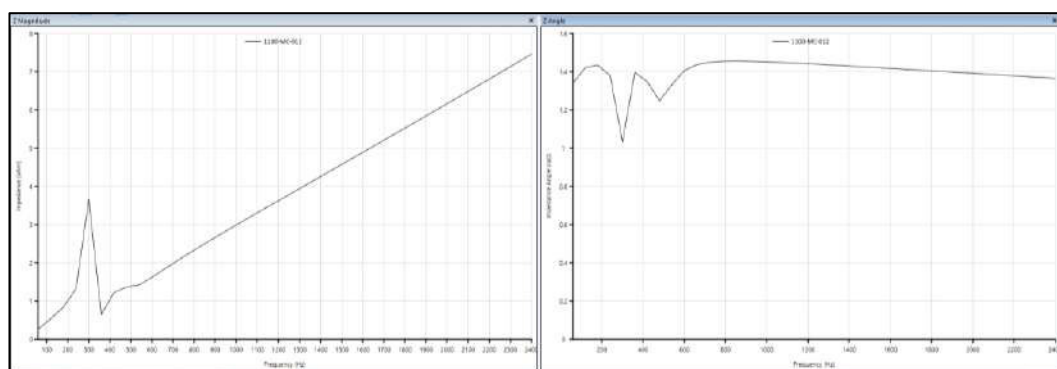


Figura 103 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1100-MC-012 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

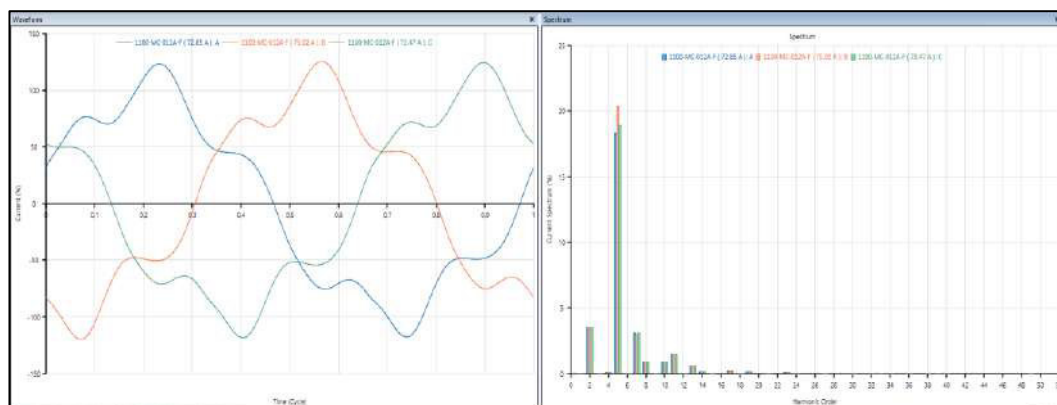


Figura 104 HDI - MCC MT TAG: 1100-MC-012(En MAIN). Fuente. Elaboración propia

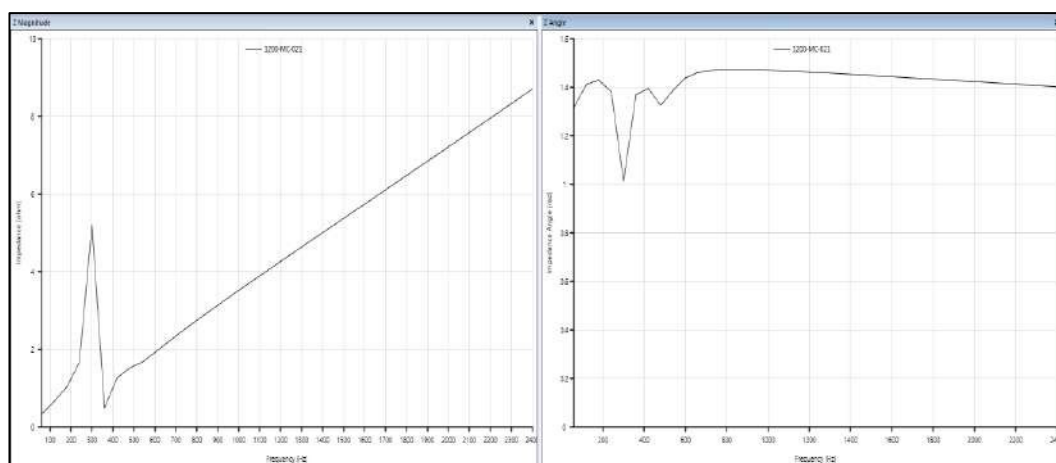


Figura 105 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1200-MC-021 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

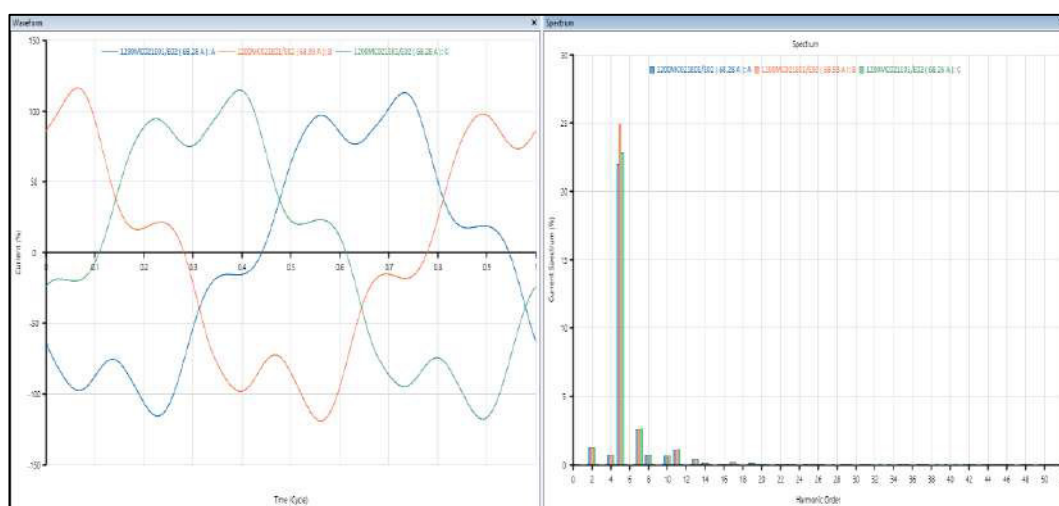


Figura 106 HDI - MCC MT TAG: 1200-MC-021. Fuente. Elaboración propia

5.1.3.8.2 Motores en 4.16kV - 50% de carga

Para este escenario, se han realizado las simulaciones de armónicos al 50% de carga de los motores en 4.16kV, con lo que se tiene el siguiente resultado:

Cuadro 15 Resultados simulación régimen armónico-motores al 50%

CASO	1100-ER-011 (PCC)			1200-ER-021		
	THDi	HDi 5h	THDv	THDi	HDi 5h	THDv
50%	%	%	%	%	%	%
	18.39	18.3	2.86	37.92	37.9	3.54

Fuente. Elaboración propia.

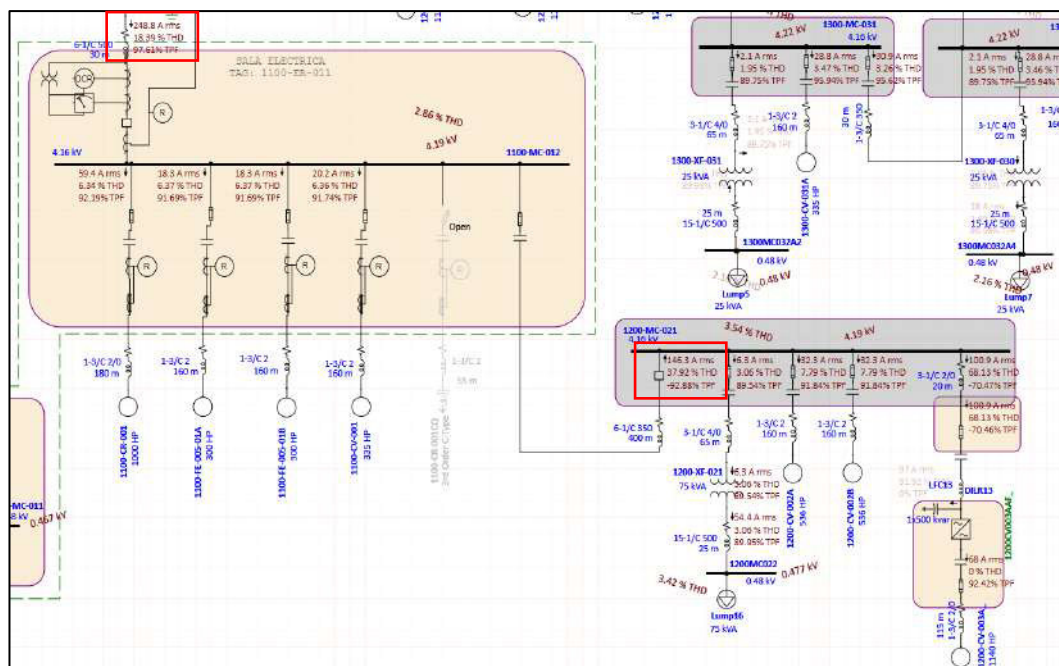


Figura 107 Resultados simulación régimen armónico-motores al 50%.
Fuente. Elaboración propia

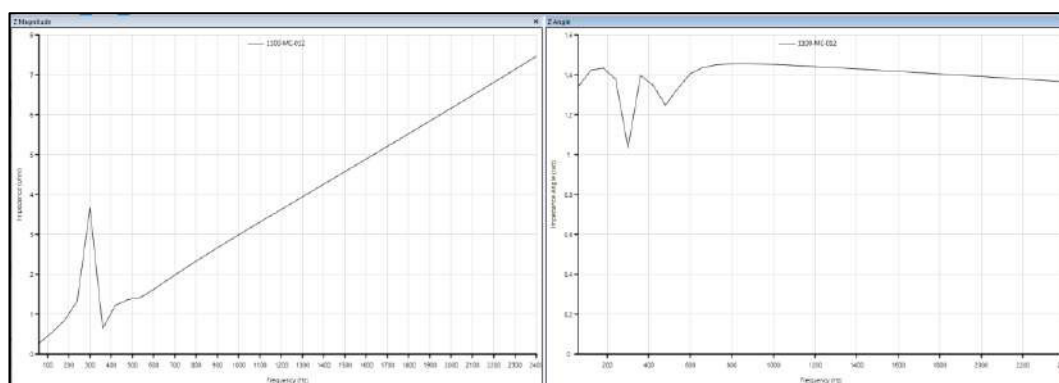


Figura 108 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1100-MC-012 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

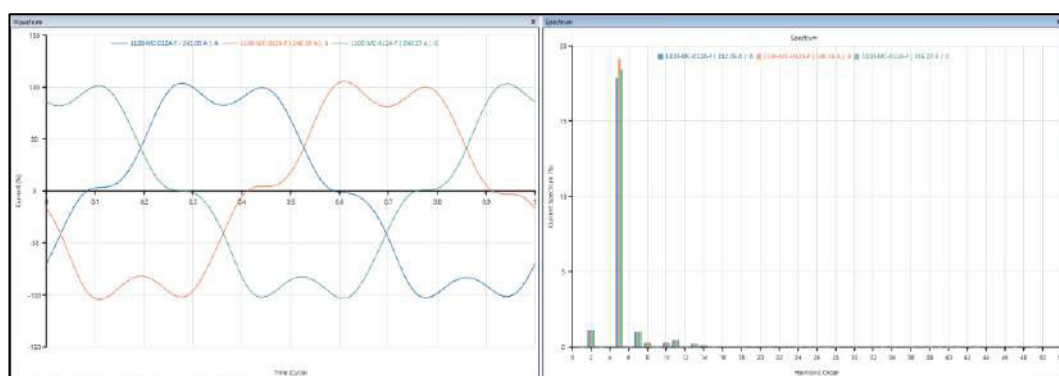


Figura 109 HDI - MCC MT TAG: 1100-MC-012(En MAIN). Fuente. Elaboración propia

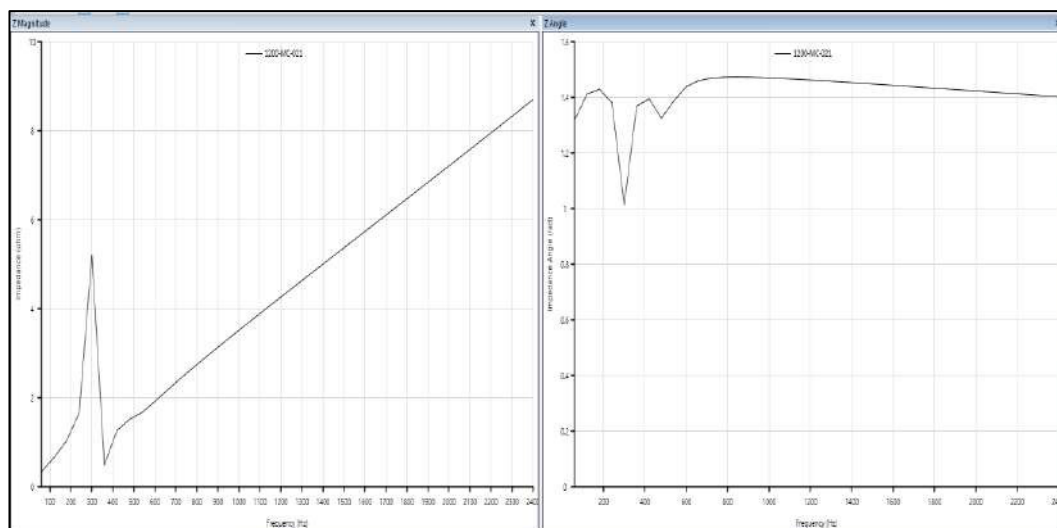


Figura 110 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1200-MC-021 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

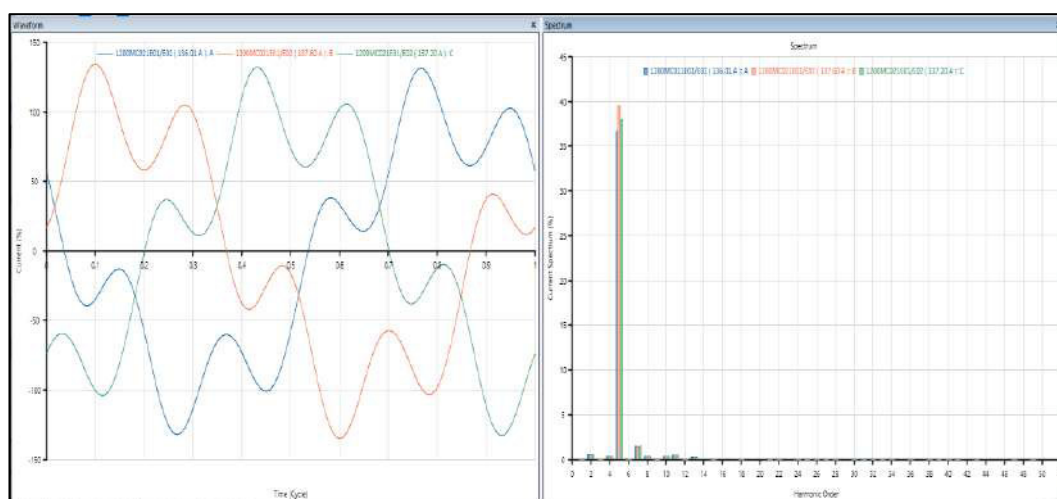


Figura 111 HDi - MCC MT TAG: 1200-MC-021. Fuente. Elaboración propia

5.1.3.9 Motores en 4.16kV - 90% de carga

Para este escenario, se han realizado las simulaciones de armónicos al 90% de carga de los motores en 4.16kV, con lo que se tiene el siguiente resultado:

Cuadro 16 Resultados simulación régimen armónico-motores al 90%

CASO	1100-ER-011 (PCC)			1200-ER-021		
	THDi	HDi 5h	THDv	THDi	HDi 5h	THDv
90%	%	%	%	%	%	%
	20.16	20.1	5.41	48.07	48	6.69

Fuente. Elaboración propia.

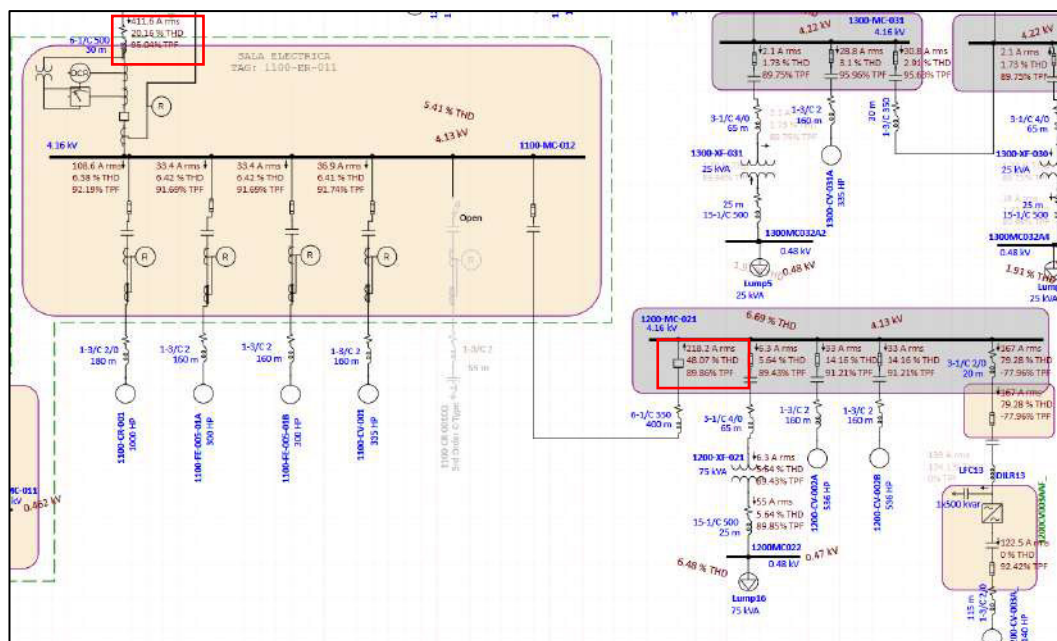


Figura 112 Resultados simulación régimen armónico-motores al 90%.
Fuente. Elaboración propia

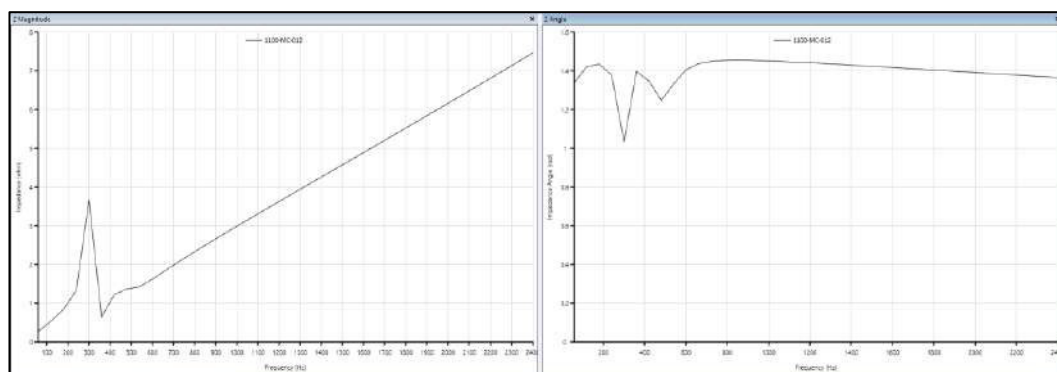


Figura 113 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1100-MC-012 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

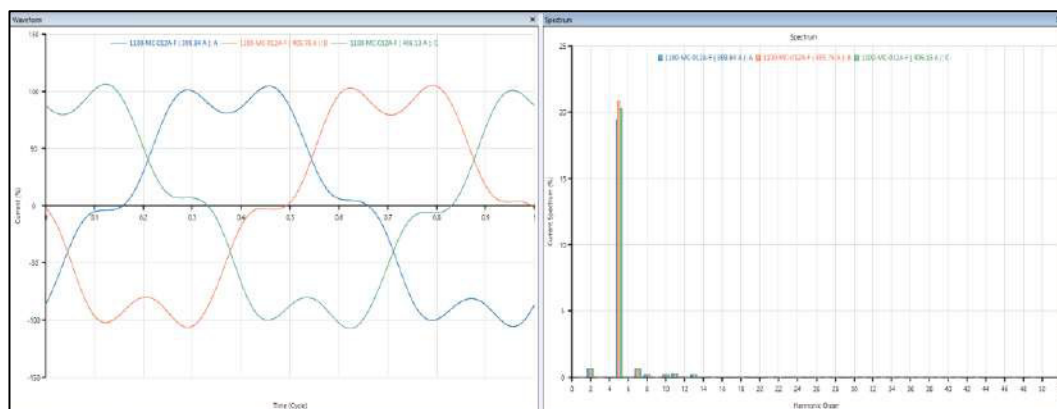


Figura 114 HDI - MCC MT TAG: 1100-MC-012(En MAIN). Fuente.
Elaboración propia

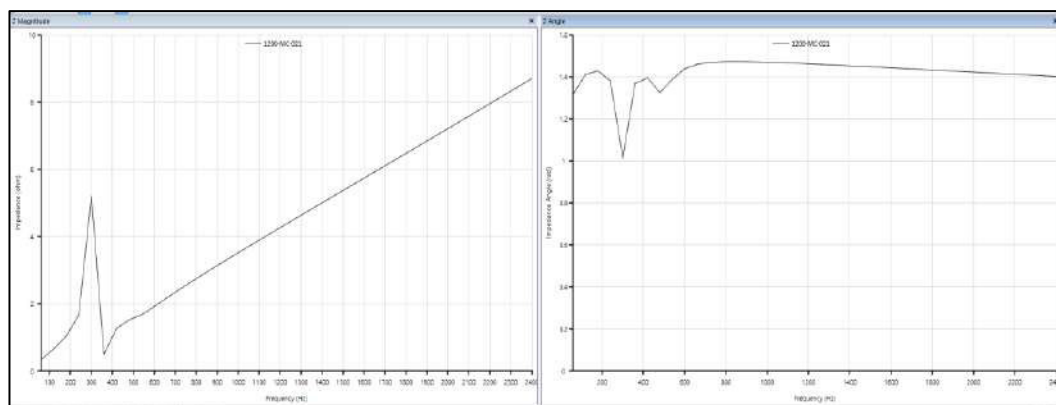


Figura 115 Barrido de frecuencia MCC MT TAG: 1200-MC-021 (Magnitud) (ángulo). Fuente. Elaboración propia

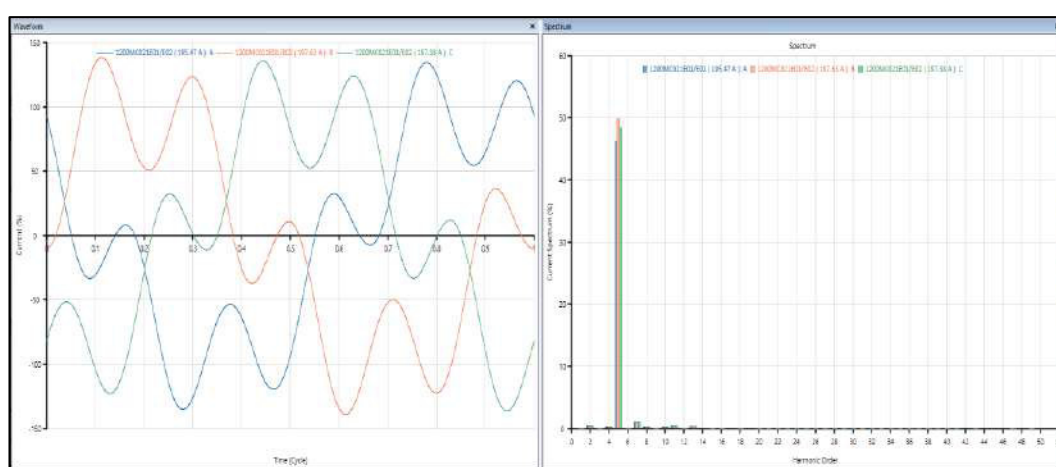


Figura 116 HDI - MCC MT TAG: 1200-MC-021. Fuente. Elaboración propia

5.1.3.8 Flujo de potencia

Para el flujo de potencia se tomó como referencia la información proporcionada por la mina y los datos medidos en campo, donde el factor de potencia en el Área 1200 es de 85.6%, De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación de flujo de potencia desarrollada en Etap, la potencia activa y reactiva consumida por el sistema en condición de operación nominal del área 1200 es de 11649 kW y 4517 kvar respectivamente. El análisis de flujo de potencia permitió verificar el nivel de demanda de potencia reactiva suministrada por la red y evaluar su influencia directa en la magnitud de la corriente total del sistema. Se determinó que el bajo factor de potencia incrementa la potencia aparente y, en consecuencia, la corriente circulante en alimentadores y transformadores, generando mayores pérdidas técnicas y un uso menos eficiente de la capacidad instalada.

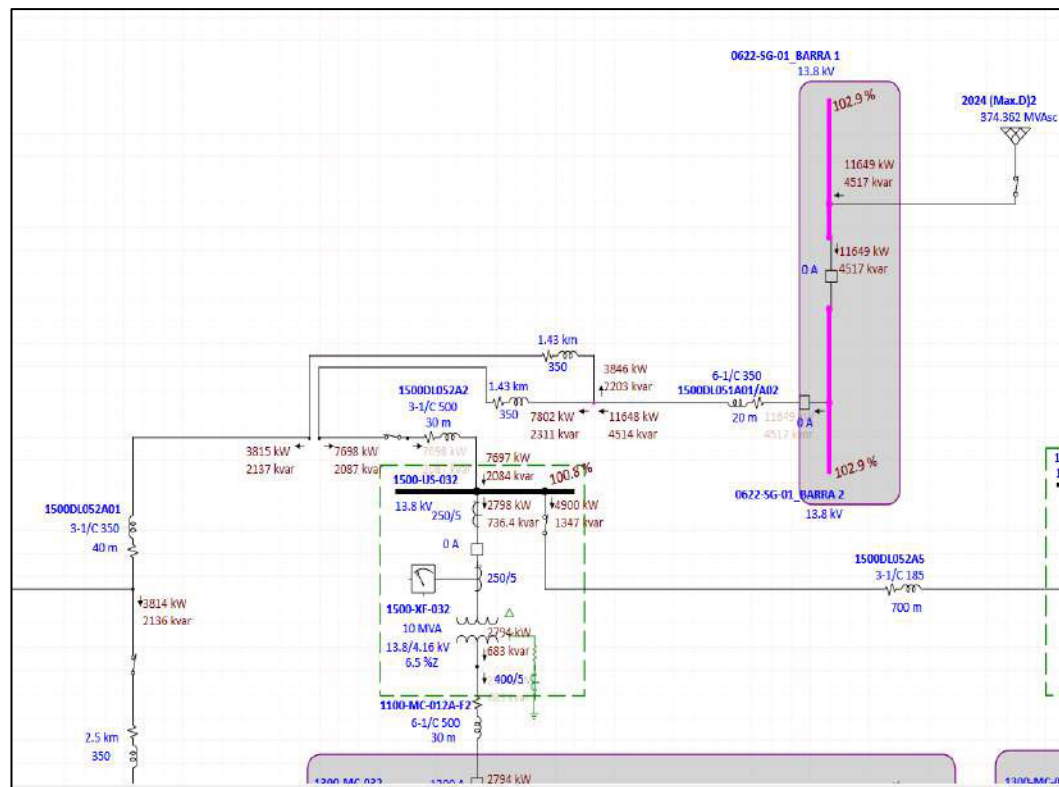


Figura 117 Flujo de potencia en punto de conexión al sistema. Fuente. Elaboración propia

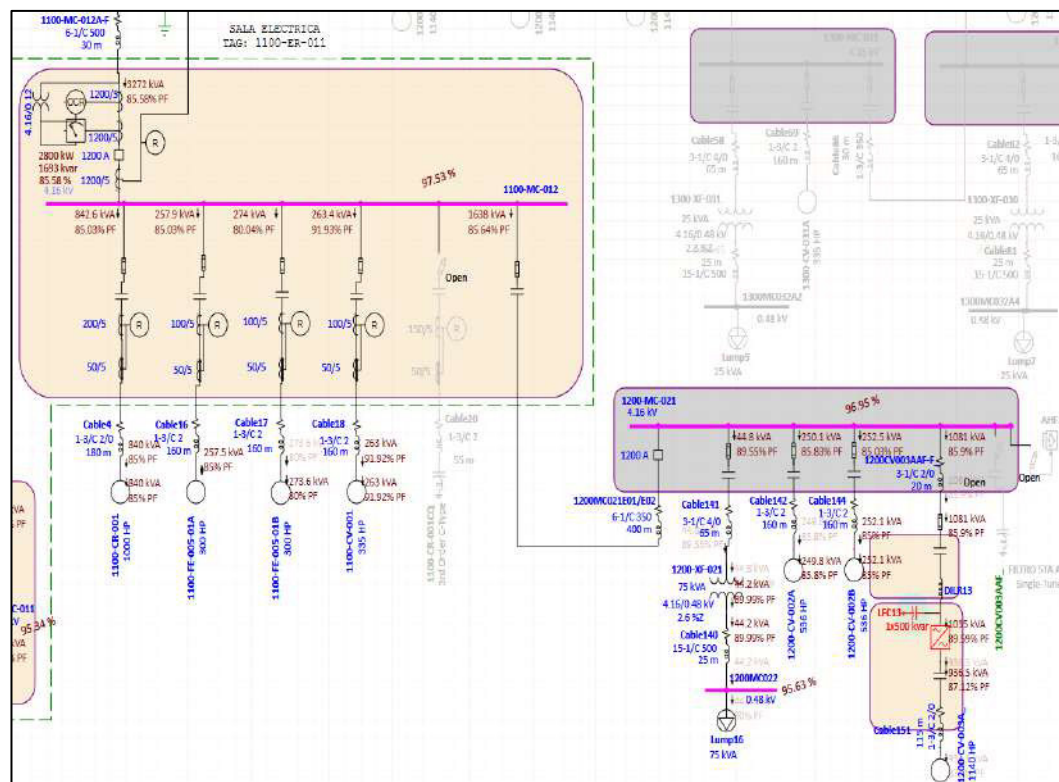


Figura 118 Flujo de potencia en área de estudio. Fuente. Elaboración propia

5.1.4 Análisis para la mitigación de armónicos y reducción de potencia reactiva mediante filtro de armónicos.

En esta sección se evalúa el comportamiento del sistema con las incorporaciones de un filtro pasivo y un filtro activo de armónicos, donde se observa que el filtro activo es la mejor solución tanto para mitigar los armónicos y controlar el factor de potencia. El análisis consideró la reducción de la distorsión armónica, el nivel de compensación de potencia reactiva y el impacto en la corriente demandada por el sistema. Las simulaciones realizadas evidencian que el filtro activo presenta un mejor desempeño ante variaciones operativas y permite una compensación más precisa, contribuyendo a una mejora sostenida en la calidad de energía del área 1200.

5.1.4.1 Evaluación del comportamiento del área 1200 con el uso de filtro pasivo de armónicos.

- a) Como primer paso se realiza flujo de potencia en Etap para obtener la potencia aparente y factor de potencia donde $S = 3272 \text{ KVA}$ y $\text{PF} = 85.6\%$ en el PCC y en la barra donde se ubica el variador de media tensión el cual es causante de los armónicos en el sistema $S = 1637 \text{ KVA}$ Y $\text{PF} = 85,6\%$.

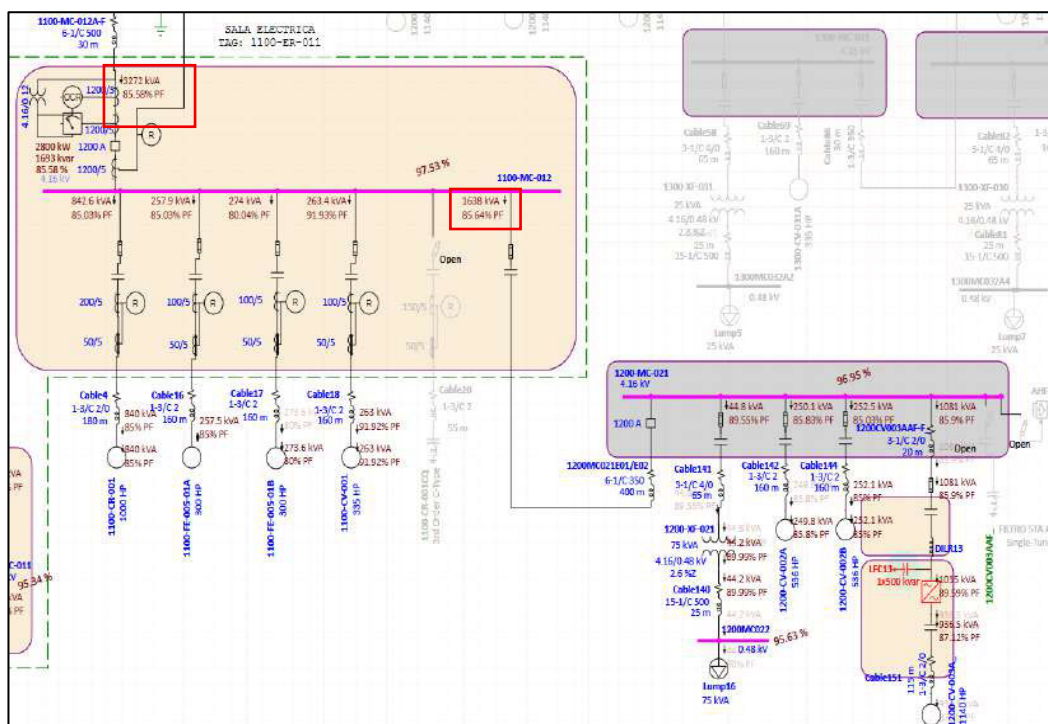


Figura 119 Flujo de potencia en ETAP. Fuente. Elaboración propia

Figura 122 Resultados del capacitor, inductor y resistencia. Fuente.

Elaboración propia

- d) Contrastamos estos resultados obtenidos en ETAP del cálculo del filtro pasivo realizando un cálculo manual en base a las fórmulas de acuerdo a la normativa IEEE Std 1531, donde se puede observar que los resultados obtenidos en los calculo son similares a los resultados obtenidos en ETAP.

- Cálculo de la potencia reactiva de compensación Q_c , nuestro objetivo es calcular la potencia reactiva necesaria para obtener un $FP=95\%$, donde nuestro factor de potencia inicial es de $FP_1 = 85.6\%$.

$$P = (1638)(85.6\%) = 1402.13 \text{ kW}$$

$$\alpha = \cos^{-1}(0.856) = 31.13^\circ \rightarrow \tan(31.13^\circ) = 0.6039$$

$$\beta = \cos^{-1}(0.95) = 18.19^\circ \rightarrow \tan(18.19^\circ) = 0.3287$$

$$Q_c = Q_{eff} = P(\tan(\alpha) - \tan(\beta))$$

$$Q_c = 1402.13(0.6039 - 0.3287)$$

$$Q_c = 385.96 \text{ Kvar} \approx 386.4 \text{ Kvar}$$

- Cálculo de la reactancia efectiva del sistema, donde $Q_c = Q_{eff}$.

$$X_{eff} = \frac{V_{ll}^2}{Q_{eff}} = \frac{4.16kv^2}{386.4kvar}$$

$$X_{eff} = 44.83\Omega$$

- Cálculo de la reactancia capacitiva del filtro, esta reactancia capacitiva se calcula en base a la frecuencia armónica que se requiere resonar en el sistema que para este caso es la 5ta armónica, pero de acuerdo a normativa, IEEE Std 1531, se recomienda calcular un entre 3 % y 15 % por debajo de la frecuencia de la armónica objetivo por eso se está considerando $h=4.75$.

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

$$X_c = \left(\frac{4.75^2}{4.75^2 - 1} \right) (44.83) = 46.91\Omega$$

- Cálculo de la reactancia inductiva del filtro, donde $h=4.75$

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{46.91}{4.75^2}$$

$$X_L = 2.08\Omega \approx 1.9849\Omega$$

- Cálculo de la capacitancia del filtro

$$C = \frac{1}{(2\pi)(f)(X_c)} = \frac{1}{(2\pi)(60)(46.91)}$$

$$C = 56.5\mu F \approx 59.23\mu F$$

- Cálculo de la inductancia del filtro

$$L = \frac{X_L}{(2\pi)(f)} = \frac{2.08}{(2\pi)(60)}$$

$$L = 5.52mH$$

- Cálculo de la resistencia del filtro

$$R = \frac{(X_L)(h)}{(Q_f)} = \frac{(2.08)(4.75)}{(30)}$$

$$R = 0.33\Omega$$

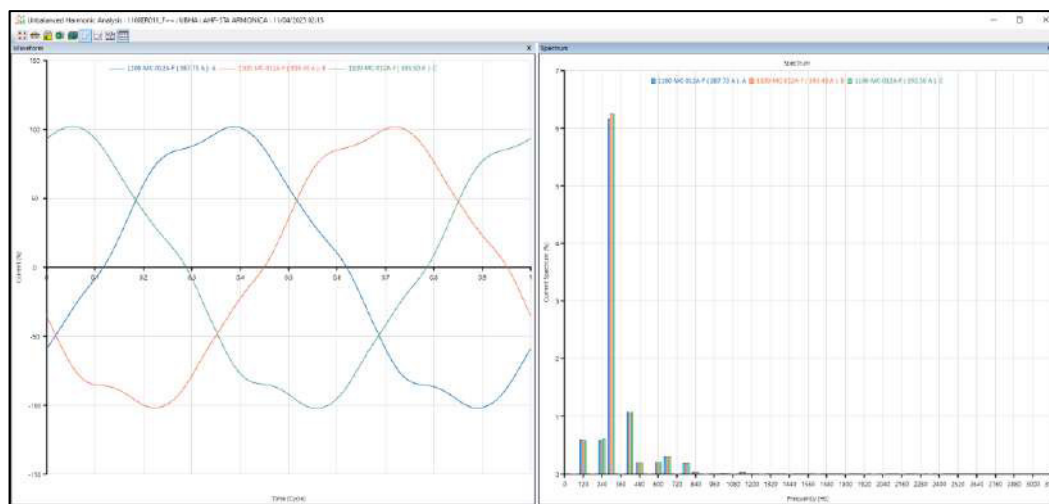


Figura 124 Distorsión armónica de corriente en PCC (sala 1100-ER-011) con el uso del filtro pasivo de 5ta armónica. Fuente. Elaboración propia

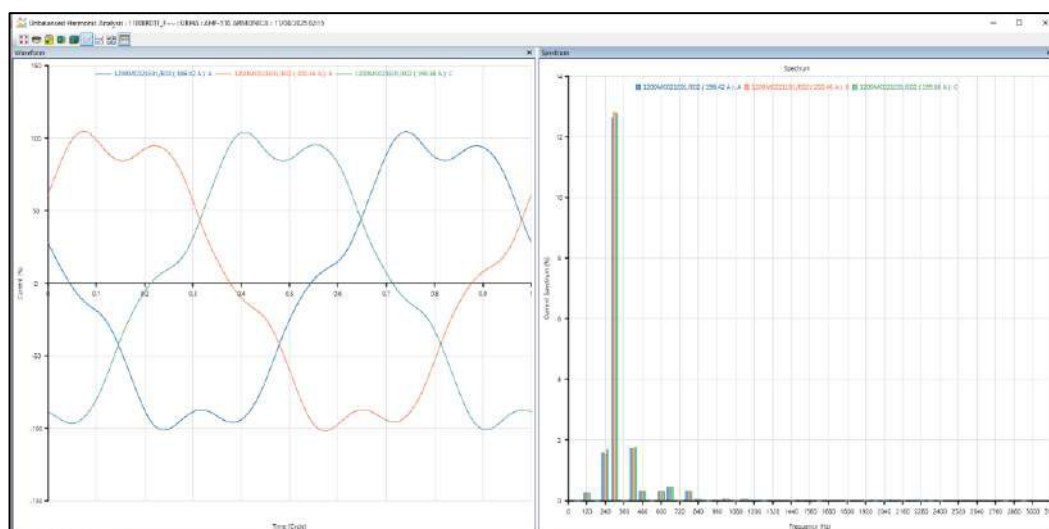


Figura 125 Distorsión armónica de corriente en sala 1200-ER-021 con el uso del filtro pasivo de 5ta armónica. Fuente. Elaboración propia

5.1.4.2 Evaluación del comportamiento del área 1200 con el uso de filtro activo de armónicos

- a) Para la selección adecuada del filtro de activo de armónicos necesitamos los datos de $V_{LL} = 4.16KV$ y la corriente nominal del filtro activo que se define como la corriente de 5ta armónica (94.5A) más la corriente reactiva para compensar el factor de potencia ($\frac{386,4 \text{ QKVAR}}{\sqrt{3} \times 4.19KV} = 53,63A$) con lo que resulta $I_n = 150A$, el objetivo del filtro activo de armónicos es que los armónicos de corriente sean menores al 1.5% y que el factor de potencia sea $FP > 95\%$.

Figura 126 Filtro de activo de armónicos. Fuente. Elaboración propia

- b) Análisis de resultados de la simulación con la incorporación de un filtro activo, donde se observa que el filtro activo logra mitigar eficazmente las armónicas de corriente generadas por el variador de media tensión teniendo como resultado un con un $THDi < 1.5\%$ y aumentar el factor de potencia $FP > 95\%$ tanto en el PCC y la entrada a la barra del variador de media tensión. Estos resultados logran estar dentro de los límites permitidos por la normativa IEEE519 ($THDi < 5\%$).

Cuadro 18 Resultados simulación con filtro activo de armónicos.

CASO	1100-ER-011 (PCC)			1200-ER-021		
	THDi	HDi 5h	THDv	THDi	HDi 5h	THDv
Filtro	%	%	%	%	%	%
Activo	1.22	0.9	1.3	1.21	0.9	1.28

Fuente. Elaboración propia.

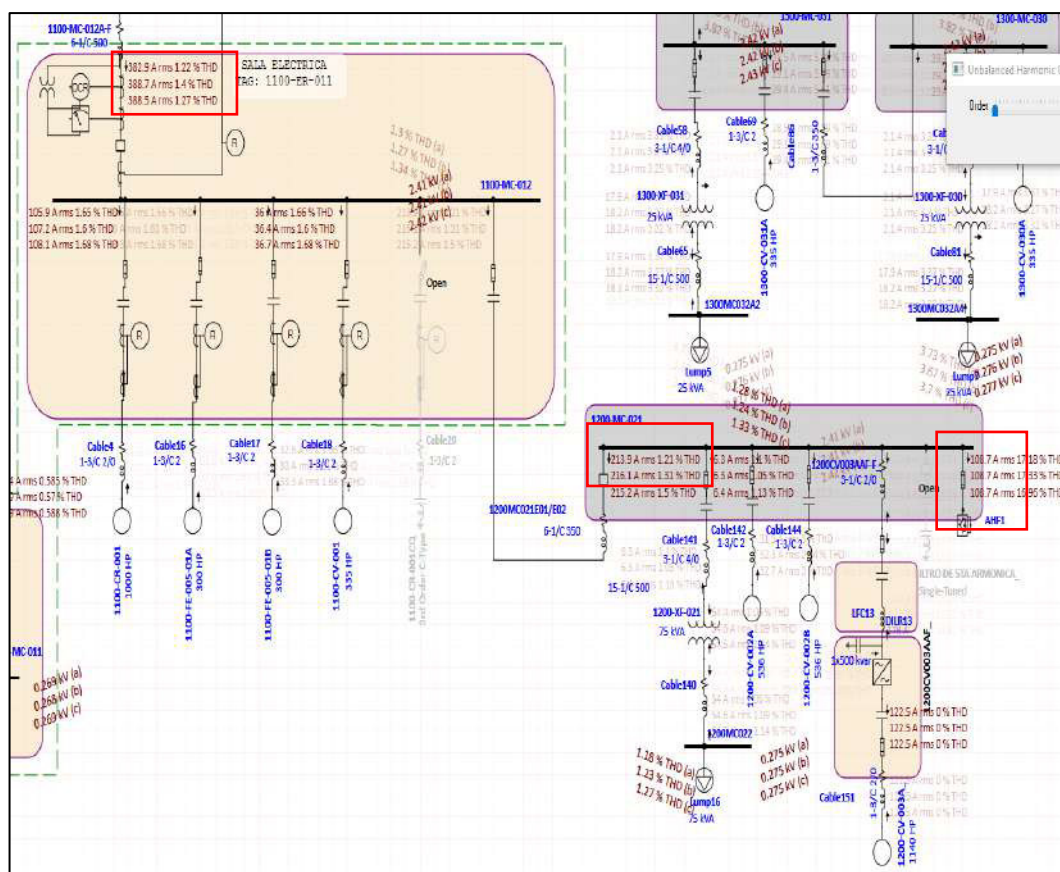


Figura 127 Resultados de la simulación con la incorporación de un filtro activo. Fuente. Elaboración propia

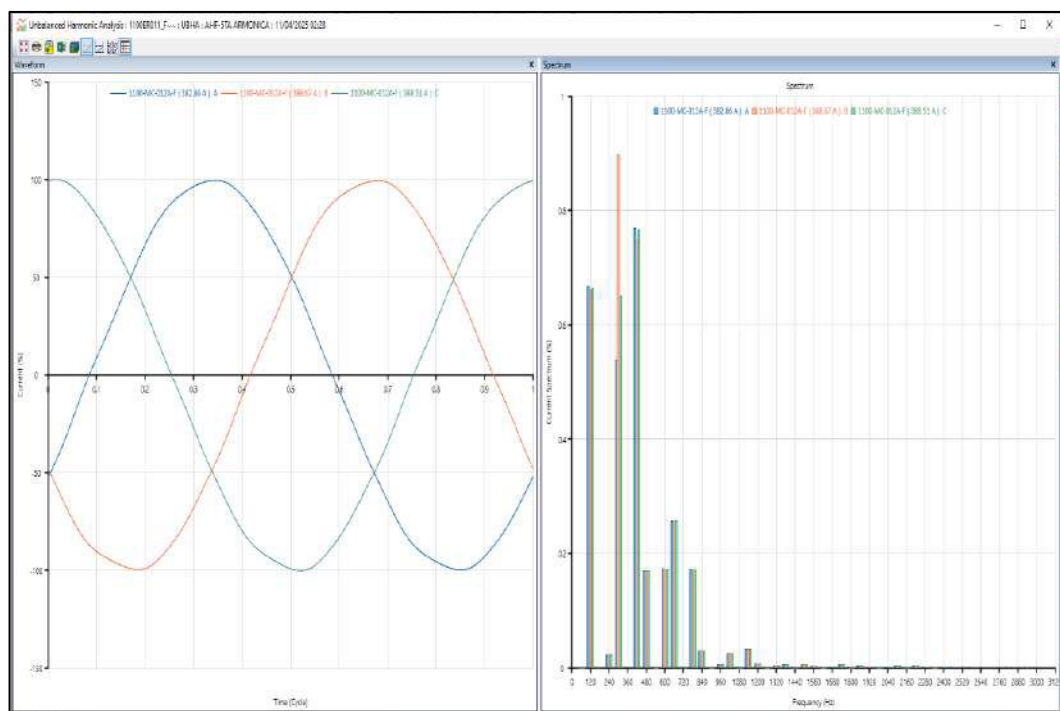


Figura 128 Distorsión armónica de corriente en PCC (sala 1100-ER-011) con el uso del filtro activo. Fuente. Elaboración propia

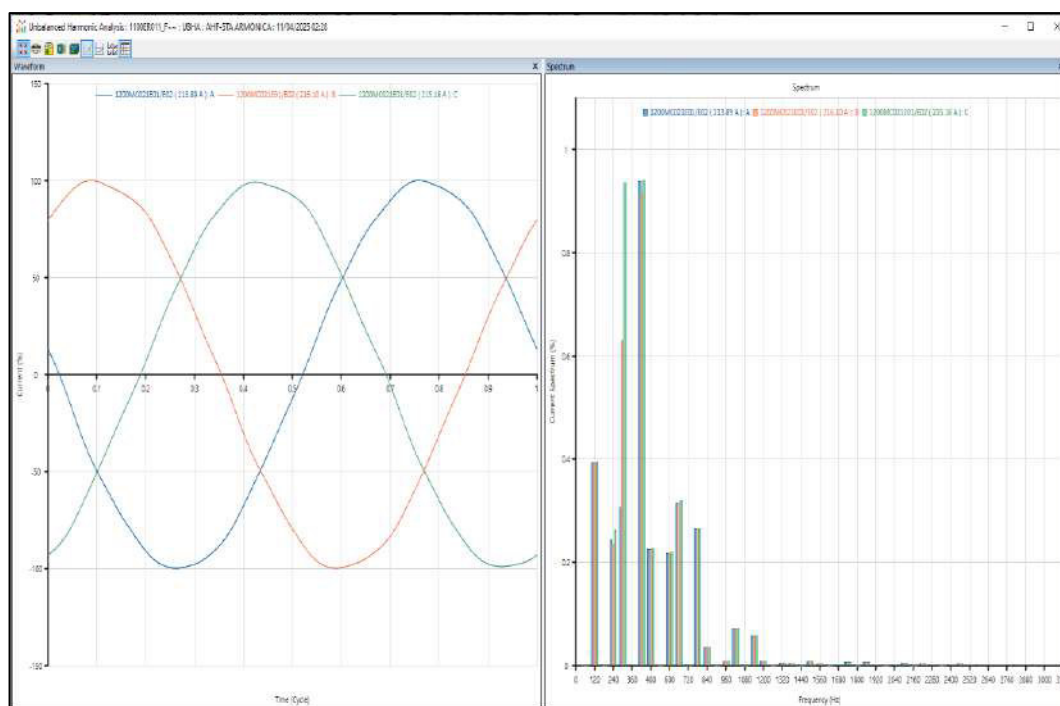


Figura 129 Distorsión armónica de corriente en sala 1200-ER-021 con el uso del filtro activo. Fuente. Elaboración propia

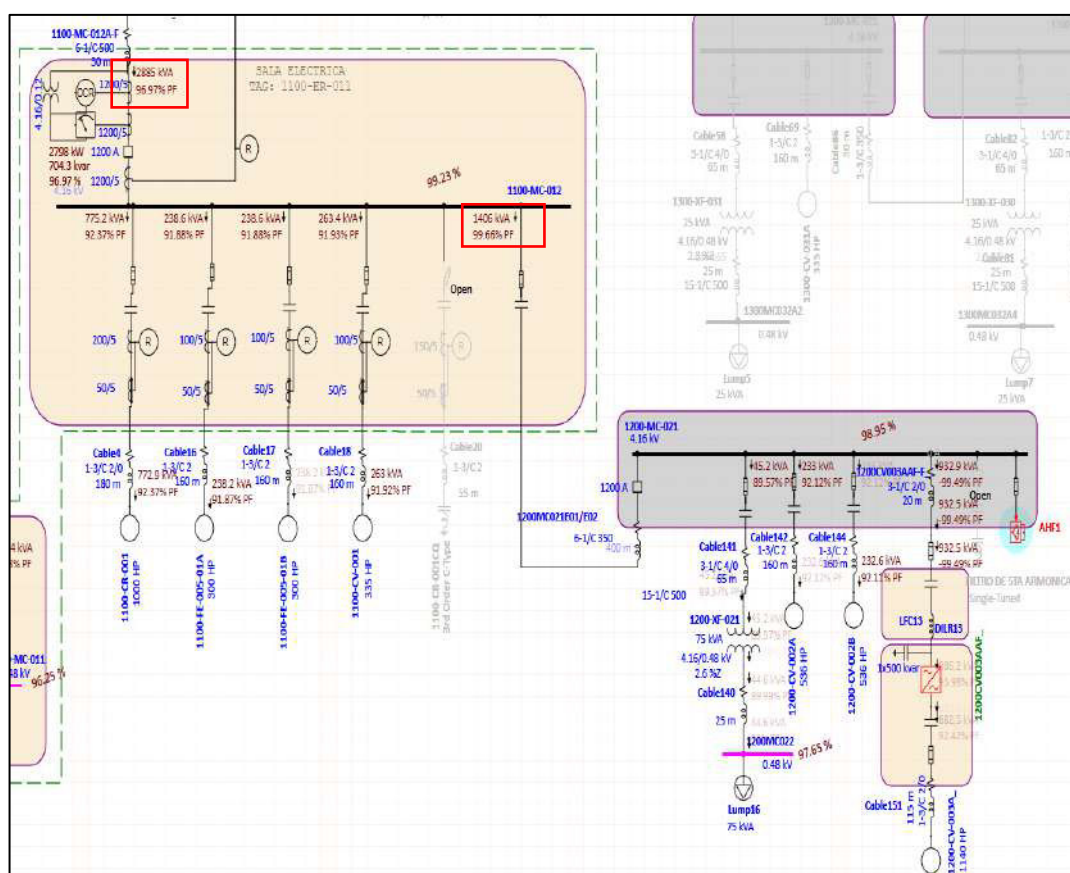


Figura 130 Factor de potencia con la incorporación del filtro activo en el PCC (Sala 1100-ER-011). Fuente. Elaboración propia

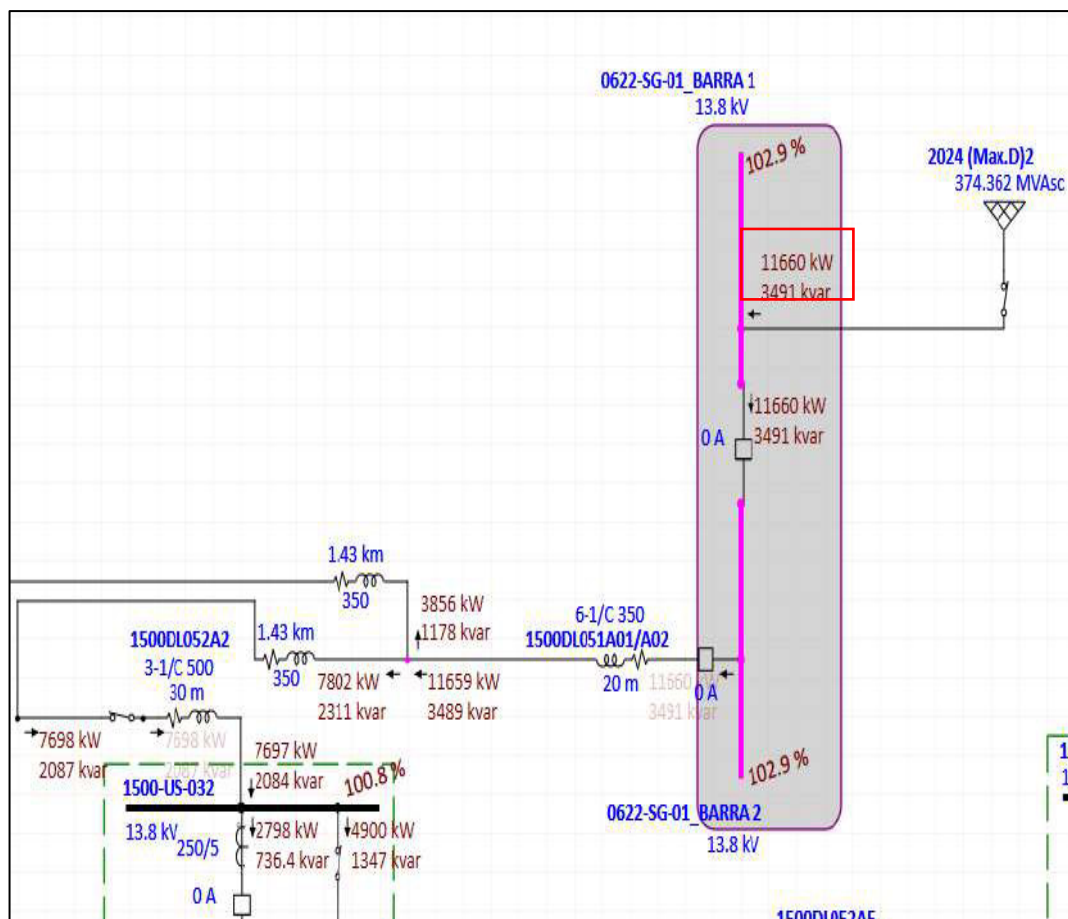


Figura 131 Potencia activa y reactiva en el punto de conexión al sistema con la incorporación del filtro activo. Fuente. Elaboración propia

5.1.5 Análisis de escenarios para la selección de la solución de mitigación de armónicos y reducción de potencia reactiva.

En función de los resultados comparativos obtenidos, se sustenta la selección del filtro activo de armónicos como la alternativa más eficiente para la mejora de la calidad de energía eléctrica.

5.1.5.1 Análisis de mitigación de armónicos para el cumplimiento de la norma de calidad de energía IEEE 519.

En el PCC, los escenarios sin filtro presentan THDi entre 18.39% y 20.16%, superando los límites de la norma IEEE 519. Con el filtro pasivo, el THDi se reduce a 6.33% (68% de reducción) pero aún no se cumple la norma, existe riesgo de resonancia y no es flexible ante el cambio de cargas. El filtro activo reduce el THDi a 1.22% (93.9% de reducción), elimina la resonancia armónica y cumple la norma IEEE 519, demostrando ser la alternativa más eficiente para mejorar la calidad de energía eléctrica.

Cuadro 19 Análisis comparativo de mitigación de armónicos en PCC

Escenario	Carga [%]	THDi [%]	HDi ₅ [%]	Resonancia armónica	Cumple IEEE 519
Medición en campo					
Sala 1100-ER-011 (PCC) Equipo 1	50	16	19	NO	NO
Simulación sin filtro					
Sala 1100-ER-011 (PCC)	25	19.52	19.5	NO	NO
Simulación sin filtro					
Sala 1100-ER-011 (PCC)	50	18.39	18.3	NO	NO
Simulación sin filtro					
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	20.16	20.1	NO	NO
Simulación con filtro pasivo					
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	6.33	6.3	Existe riesgo de resonancia	NO
Simulación con filtro activo					
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	1.22	0.9	No existe riesgo de resonancia	SÍ

Fuente. Elaboración propia.

5.1.5.2 Análisis de reducción de potencia reactiva para evitar multas por baja calidad de energía

En el PCC de la Sala 1100-ER-011, los escenarios sin compensación presentan un FP de 0.85 y demandas de hasta 4517 kVAr, generando multas por baja calidad de energía. Con la implementación de filtros pasivo y activo, el FP mejora a 0.95, reduciendo la potencia reactiva en 22.7% y eliminando las penalidades económicas.

Cuadro 20 Análisis comparativo de reducción de potencia reactiva en PCC

Escenario	Carga [%]	FP [%]	Kvar en punto de conexión a la red	Penalidad por baja calidad de energía
Medición en campo				
Sala 1100-ER-011 (PCC) Equipo 1	50	0.85	1800kvar	SÍ
Simulación sin filtro				
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	0.85	4517Kvar	SÍ
Simulación con filtro pasivo				
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	0.95	3490Kvar	NO
Simulación con filtro activo				
Sala 1100-ER-011 (PCC)	90	0.95	3490Kvar	NO

Fuente. Elaboración propia.

5.1.5.2 Análisis de reducción de sobrecalentamiento y deterioro en los equipos eléctricos.

En condición ideal sin armónicos, la corriente es de 403 A, generando pérdidas Joule de 487.2xR. En el escenario sin filtro, la presencia de armónicos incrementa la corriente RMS a 411 A, elevando las pérdidas Joule a 508.2xR, lo que evidencia un sobrecalentamiento adicional debido a armónicos. Con la implementación del filtro pasivo, la corriente RMS se reduce a 394 A, disminuyendo las pérdidas Joule a 466.4xR, lo que representa una reducción del 8.2% del sobrecalentamiento. Finalmente, el filtro activo reduce la corriente RMS a 382 A y las pérdidas Joule a 439.8xR, logrando una reducción del 13.5%, lo que confirma su mayor efectividad para mitigar el sobrecalentamiento y el deterioro de los equipos eléctricos.

Cuadro 21 Análisis comparativo de reducción de sobrecalentamiento en PCC

Escenario	Carga [%]	FP [%]	THDI [%]	I RMS (A)	Perdidas Joule (KW)	Impacto en equipos eléctricos
Ideal sin armónicos	90	0.85	0	403	487,2 x R	Condición de diseño
Simulación sin filtro 1100-ER-011 (PCC)	90	0.85	20.16	411	508,2 x R	Sobrecalentamiento por armónicos
Simulación con filtro pasivo 1100-ER-011 (PCC)	90	0.95	6.33	394	466,4 x R	Reducción de 8.2% en sobrecalentamiento de equipos
Simulación con filtro activo 1100-ER-011 (PCC)	90	0.95	1.22	382	439,8 x R	Reducción de 13.5% en sobrecalentamiento de equipos

Fuente. Elaboración propia.

5.1.6 Análisis económico de la propuesta de implementación de un filtro activo.

5.1.6.1 Inversión inicial (CAPEX)

$$CAPEX = \text{Costo del equipo} + \text{transporte} + \text{instalacion} + \text{pruebas} + \text{ingenieria}$$

$$CAPEX = 350,000 \text{ dólares}$$

$$CAPEX = 1,295,000 \text{ soles}$$

5.1.6.2 Gasto operativo (OPEX)

$$OPEX = \text{Mantenimiento} + \text{respuestos} + \text{supervision}$$

$$OPEX = (1,295,000)(3\%)$$

$$OPEX = 40,000 \text{ soles anuales}$$

5.1.6.3 Ahorro generado de energía reactiva

por la reducción de la energía reactiva, el contrato de usuarios libres de energía de SPCC se menciona que los cobros por energía reactiva serán facturados de acuerdo al procedimiento, precio y moneda establecidos por Osinergmin.

$$\text{Ahorro por hora} = (\text{kvar en exceso})(\text{Soles. kvar. hora})$$

$$\text{Ahorro por hora} = (1022.3)(0.0331)$$

$$\text{Ahorro por hora} = 33.83 \text{ soles}$$

$$\text{Ahorro anual} = (1022.3)(0.0331)(24\text{horas})(365\text{días})$$

$$\text{Ahorro anual} = 297,096.72 \text{ soles}$$

5.1.6.4 Ahorro generado de mantenimiento

por la reducción de costos de mantenimiento por la mitigación de armónicos en el sistema eléctrico afectado y la mejora de la vida útil de los equipos.

$$\text{Ahorro anual} = (\text{Costo de mantenimiento})(0.20)$$

$$\text{Ahorro anual} = (500,000)(0.20)$$

$$\text{Ahorro anual} = 100,000 \text{ soles}$$

5.1.6.5 Ahorro neto anual

El ahorro neto es la suma de los ahorros generados menos los opex

$$\text{Ahorro neto anual} = 297,096.72 + 100,000 - 40,000$$

$$\text{Ahorro neto anual} = 357,096.72 \text{ soles}$$

5.1.6.6 Periodo de recuperación del capital (Payback) y Vida útil del filtro activo

$$Payback = \frac{Capex}{Ahorro\ neto\ anual}$$

$$Payback = \frac{1,295,000}{357,096.72} = 3,6\ años$$

$$Vida\ util\ del\ filtro\ activo = 15\ años$$

$$\therefore Payback < Vida\ util\ del\ filtro\ activo$$

→ la inversión se recupera rápidamente

5.1.6.7 Retorno de la inversión (ROI) y tasa mínima atractiva de retorno (TMA)

$$ROI = \frac{Ahorro\ neto\ anual}{Capex}$$

$$ROI = \frac{357,096.72}{1,295,000} = 27.58\% \text{ anual}$$

$$TMA = 12\% \text{ anual}$$

$$\therefore ROI > TMA \rightarrow \text{La inversión es atractiva financieramente}$$

5.1.6.8 Valor actual neto (VAN)

$$VAN = Ahorro\ anual \left(\frac{1 - (1 + TMA)^{vida\ util}}{TMA} \right)$$

$$VAN = 357,096.72 \left(\frac{1 - (1 + 12\%)^{15\ años}}{12\%} \right)$$

$$VAN = 1,137,330 \text{ soles} \rightarrow VAN > 0 = \text{El proyecto genera valor}$$

$$\therefore VAN > 0 \rightarrow \text{El proyecto genera valor}$$

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

6.1 Discusión

La investigación permitió analizar el comportamiento del sistema eléctrico del Área 1200 mediante mediciones en campo y simulaciones en ETAP a distintos niveles de carga. Los resultados confirmaron que la distorsión armónica y el consumo de potencia reactiva afectan significativamente la calidad de energía de la unidad minera.

Se identificó que el variador de frecuencia de media tensión VFD 1140HP genera elevados niveles de THDi bajo diversas condiciones de operación, superando los límites recomendados y coincidiendo con el sustento teórico desarrollado. Esta situación incrementa pérdidas eléctricas, provoca sobrecalentamiento en equipos y reduce su vida útil. Asimismo, el consumo de potencia reactiva disminuye el factor de potencia, aumenta la potencia aparente y expone al sistema a penalidades económicas.

En cuanto a las alternativas de mitigación, el filtro pasivo logró mejoras parciales, pero no redujo la distorsión armónica total a valores compatibles con la norma IEEE 519, evidenciando limitaciones técnicas. En contraste, el filtro activo redujo el THDi por debajo del 2% y elevó el factor de potencia por encima del 95%, mostrando una compensación más eficaz ante variaciones de carga.

Finalmente, el análisis técnico-económico demuestra que el filtro activo es la alternativa más eficiente y viable para el Área 1200, al garantizar cumplimiento normativo, reducir pérdidas y optimizar el desempeño del sistema eléctrico.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones

El sistema eléctrico del Área 1200 presenta altos niveles de distorsión armónica, principalmente generados por el variador de frecuencia instalado. Las mediciones y simulaciones evidenciaron valores de THDi superiores a los límites de la norma IEEE 519, confirmando una deficiente calidad de energía que afecta motores, transformadores y cables.

Asimismo, se identificó un elevado consumo de potencia reactiva debido a los motores de media tensión, lo que provoca bajo factor de potencia, mayor potencia aparente y riesgo de penalidades económicas, además de contribuir al calentamiento y reducción de la vida útil de los equipos.

El barrido de frecuencia sin filtrado mostró que no existe resonancia armónica directa; sin embargo, se detectó un pico cercano a frecuencias críticas, indicando proximidad a una posible condición de resonancia ante futuras modificaciones del sistema.

La evaluación del filtro pasivo evidenció una reducción parcial de armónicos, pero sin cumplir los límites normativos ni eliminar el riesgo asociado a la condición de resonancia identificada.

El Filtro Activo de Armónicos demostró ser la alternativa más efectiva, reduciendo el THDi a valores inferiores al 2% y compensando la potencia reactiva por encima del 95%, mejorando el factor de potencia y la estabilidad del sistema. El análisis técnico-económico confirma su viabilidad al disminuir pérdidas, evitar penalidades y prolongar la vida útil de los equipos.

Con ello, se cumple el objetivo de evaluar y proponer una solución técnicamente viable para mejorar la calidad de energía del Área 1200.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

8.1 Recomendaciones

Implementar el Filtro Activo de Armónicos como solución integral en el Área 1200, ya que asegura la reducción efectiva de armónicos, la corrección dinámica de potencia reactiva y la eliminación del riesgo de resonancia.

Debido a que el barrido de frecuencia del sistema mostró cercanía a una posible resonancia, se recomienda evitar la instalación de bancos de capacitores convencionales o filtros pasivos sin un estudio técnico detallado que analice nuevamente la frecuencia natural del sistema.

Ejecutar barridos de frecuencia cada vez que se modifiquen cargas, se agreguen equipos o se implementen nuevas tecnologías, para garantizar que el sistema no se aproxime a condiciones resonantes peligrosas.

Capacitar al personal técnico sobre interpretación de espectros armónicos, análisis de frecuencia y comportamiento de filtros activos, con el objetivo de mejorar la gestión operativa y preventiva del sistema eléctrico.

CAPITULO IX: BIBLIOGRAFIA

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos. Obtenido de <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/1.1%20Fundamentos%20de%20circuitos%20electricos%205ta.%20Edicion%20sadiku.pdf>
- Aranda Mendoza, J. R. (2015). Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/f5a74805-0709-4393-a6f6-fc00a0905fad>
- Arroyo García, C. P. (2024). Diseño de un sistema de filtros de armónicos para mejorar la calidad de energía eléctrica en el túnel Gambeta. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/7f0769da-252b-4b6a-a42d-19c6b20888254>
- Astudillo Mora, L., Vásquez Vega, A., & Rojas Serrano, J. (2016). Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia. Científica, 20(1), 3–11. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/614/61447568001/61447568001.pdf>
- Campos Bravo, W. J. (2009). Control de armónicos mediante filtros activos de potencia. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/1d5f2482-2fcd-4df7-9e07-f10a59605fb0>
- Cárdenas, P. F., Jiménez, F., & Peña Cortés, C. A. (2009). Filtro activo de potencia en paralelo: Análisis y diseño. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2(14), 17–24. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/313474105_Filtro_Activo_de_Potencia_en_Paralelo_Analisis_y_Disenio

- Carbajal Jiménez, C. E. (2007). Análisis de resonancia armónica en los sistemas eléctricos. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ca0a604-72fc-412c-ae04-6cbe4f6c980e/content>
- Carrasquilla, S. (2017). Análisis de armónicos en redes residenciales. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/46da6066-1b95-4923-98aa-4c168ed8ec14/content>
- Castañeda Ramírez, B. C. (2017). Implementación de un sistema de compensación reactiva y filtrado de armónicos en las S.E. N.º 1 y 2 de la planta de producción de Clorox. Obtenido de <https://repositorio.unac.edu.pe/item/c7e00d3b-9666-4382-84d9-f55a33971fb7>
- Chagua Ramos, R. F. (2009). Análisis de los filtros activos para compensación en los sistemas eléctricos de potencia. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/e66d824f-c29e-40fb-86d9-ab9ba5a1fe1e>
- Chere Ronquillo, E., & Quiroga Rendón, J. (2025). Simulación de armónicos en redes trifásicas basadas en la normativa ecuatoriana TDD y THD: Caso de estudio en establecimiento recreativo. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29971>
- COES SINAC. (2008). Valorización de energía reactiva. Obtenido de <https://www.coes.org.pe/DATAWEB2/2008/DTR/VALWEB/AGOSTO/Valorizacion%20Transferencia%20Reactiva.pdf>
- Constante Flores, G. E. (2014). Flujo de potencia de armónicos usando MATLAB. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8562>
- Corasaniti, V. F. (2008). Filtros activos de potencia para la compensación de reactivo y armónicas en media tensión. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Filtros-activos-de-potencia-para-la-compensaci%C3%B3n-de-Corasaniti/63ce5a96726ce1f8fe0a7c4ab596f45ca4dd50ec>

- Cutti Pineda, R. (2010). Análisis técnico-económico para la reducción del pago por energía reactiva de acuerdo al pliego tarifario y normas vigentes en medianas industrias. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/82a53653-6343-45d7-b127-550786fe230b/content>
- Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2014). Introduction to electric circuits (9th ed.). Obtenido de <https://schematicsforfree.com/files/Theory%2C%20Education%20%26%20Reference/Theory/Introduction%20to%20Electric%20Circuits%2C%209th%20Ed%20-%20Svoboda%20%26%20Dorf.pdf>
- Gonzales Bone, C., & Ambuludi Veloz, F. (2024). Estudio del contenido de armónicos en la fábrica Chadie y Chadie S. A., planta Guayaquil. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28882>
- González Quintero, J. A. (2002). Compensación de potencia reactiva en sistemas contaminados por armónicos. Obtenido de <https://www.donsion.org/calidad/documentacion/tesis-cuba.pdf>
- Henrnández, D. (2018). Análisis y diseño de filtros pasivos de doble sintonización. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15308/Análisis%20y%20Diseño%20de%20Filtros%20Pasivos%20de%20Doble%20Sintonización.pdf>
- Holguín, M., & Gómez, D. (2010). Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2110>
- IEEE. (1992). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems (IEEE Std 519-1992). Obtenido de <https://www.ieee.org/>
- IEEE. (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems (IEEE Std 519-2014). Obtenido de <https://www.ieee.org/>

- IEEE. (2020). IEEE guide for the application and specification of harmonic filters (IEEE Std 1531-2020). Obtenido de <https://www.ieee.org/>
- Lodhi, E., Lodhi, Z., Fenghua, Z., Xiong, G., Wang, F., Rehman, W., & Sinshaw, T. (2020). Analysis of harmonics detection and their filtration by using active band pass filter for domestic appliances. In Proceedings of the 2020 16th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 232–237). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/344781834_Analysis_of_Harmonics_Detection_and_their_Filtration_by_using_Active_Band_Pass_Filter_for_Domestic_Appliances
- Lumbreras, M. R. (2006). Filtros activos de potencia para la compensación instantánea de armónicos y energía reactiva. Obtenido de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6306>
- OSINERGMIN. (2017a). Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos (NTCSE). Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/NTCSE.pdf
- OSINERGMIN. (2017b). Contrato de suministro de electricidad Kallpa. Obtenido de https://prie.osinergmin.gob.pe/documents/12840/2566825/KLPA_2010_0147514_20140723_1494_00.pdf
- OSINERGMIN. (2018). Opciones tarifarias y condiciones de aplicación de las tarifas a usuario final. Obtenido de <https://www2.osinergmin.gob.pe/publicacionesgrt/pdf/Informativo/INFO-A23N04.pdf>
- Persson, J. (2014). Comparing harmonics mitigation techniques (Rev. 3). Comsys AB. Obtenido de https://comsys.se/wp-content/uploads/2022/04/Comparing_Harmonics_Mitigation_Techniques_2col_REV3.pdf
- Quintana, J. (1996). Armónicas en sistemas eléctricos de distribución: Causas, efectos y medios de atenuación. Obtenido de

<https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ppt1997/0239750/0239750.pdf>

Quispe Cruz, N. N. (2021). Determinación de la tasa de distorsión armónica de la subestación eléctrica principal del proyecto Reubicación de Facilidades – Mina Cerro Verde. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/85403cc6-fab1-4588-9668-8d6e72dea751>

Reyes Trujillo, E. (2005). Aplicación de un filtro activo de corriente en la reducción de armónicos en sistemas eléctricos industriales. Obtenido de <https://sepielectrica.esimez.ipn.mx/Tesis/2005/Aplicacion%20De%20Un%20Filtro%20Activo%20De%20Corriente%20En%20La%20Reduccion%20De%20Armonicos%20En%20Sistemas%20Electricos%20Industriales.pdf>

Rockwell Automation. (2002). Medium voltage drive. Obtenido de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/7000-at001_-en-e.pdf

CAPÍTULO X: ANEXOS

Anexo A

 SOUTHERN COPPER SOUTHERN PERU		REVISIONES				C.R. No.
		REV.	Fecha	P.P.	R.P.	
A	10/2025				REVISIÓN INTERNA	APROBACION
B	10/2025					
O	10/2025				CONSTRUCCIÓN	C.R. No.

APLICACION: ☐ COMENTARIOS ☒ APROBACION ☐ CONSTRUCCIÓN ☐ COMO CONSTRUIDO	CONTRATISTA: _____
NOMBRE DEL PROYECTO: CALIDAD DE ENRGIA ÁREA 1200	EQUIPO TAG No.: _____
EQUIPO: FILTRO ACTIVO	
UBICACIÓN: Área 1200 - Sala Eléctrica 1200-ER-021	

N°	DESCRIPCION	REQUERIDO	UNIT	CONFIRMACION CONTRATISTA
1	GENERAL			
	Proveedor	Por el Vendedor		COMSYS/POWER SIDE
	País	Por el Vendedor		PERU / USA
	Código y estándares	Por el Vendedor		ANSI / NEMA
	Atencion	Por el Vendedor		
	Correo electrónico	Por el Vendedor		
	Teléfono / Fax	Por el Vendedor		
	Propuesta N°	Por el Vendedor		
	Precio de la solución del filtro activo para 4.16kv	Por el Vendedor		350,000 DOLARES
2	CONDICIONES DE SERVICIO			
	Altura de trabajo	3250	m.s.n.m.	3250
	Temperatura del aire		°C	
	Temperatura máxima	40	°C	40
	Temperatura mínima	-4	°C	-5
	Humedad relativa promedio (máxima)	44	%	44
	Condiciones sísmicas	Por Proveedor		Zona peruana N° 3 (equiv. UBC Zone 4)
	Velocidad del Viento	75	Km/h	80
	Precipitación Máximo 24 hrs	89	mm	89
3	REQUERIMIENTOS GENERALES DE DISEÑO			
	Sistema	4.16	kV	4.16
	Variación del sistema	+/- 5	%	+/- 5
	Clase de voltaje	5	kV	Si
	Voltaje de operación nominal	4.16	kV	4.16
	Nivel básico de aislamiento de impulso	60@3250msnm	kV BIL	60@3250msnm
	Corriente de cortocircuito trifásico simétrico	31.5kA @4.16kV	KA	Si
	Fases	3		Si
	Frecuencia	60	Hz	Si
	Corriente de barras principales	1200	A	Si
	Puesta a Tierra del Sistema en 4.16 KV:	Aterrizado por resistencia.		Si
	Corriente (Potencia) Simétrica Cortocircuito	31.5	kA	Si
	Tipo	Autosoportado		Si
	Tipo de diseño	Metal-Enclosed		Si
6	FILTRO ACTIVO ADF P300 0.48V			
	CORRIENTE NOMINAL	Requerido		150A (Valor de cada filtro activo ADF P300, total: Aprox. 5Und.)
	TENSION DEL SISTEMA	Requerido		480 V (208-480 V) ± 10 %
	FRECUENCIA NOMINAL	Requerido		45 - 65 Hz (including floating frequency)
	NUMERO DE FASES	Requerido		3 phase 3 wire
	TIPO DE CONEXION	Requerido		3 phase without neutral (TN, TT, IT)
	COMPENSACION ARMÓNICA	Requerido		Individual compensation up to 49th order
	INDICE DE REDUCCION ARMÓNICA	Requerido		Better than 98%
	COMPENSACION DE COS φ	Requerido		Up to 1.0
	CAPACIDAD DE AMPLUACION	Requerido		Hasta 15 unidades de ADF P300, en paralelo
	TIEMPO DE RESPUESTA	Requerido		< 1 ms
	DISIPACION DE CALOR	Requerido		< 2290 W
	FLUJO DE AIRE	Requerido		600 m³/h / 353 CFM
	NIVEL DE RUIDO	Requerido		< 70 dB(A)
	DIMENSIONES (An x Al x Pr) [IP 54]	Requerido		405 x 2203 x 636 mm [15.95 x 86.73 x 25.03 inch]
	PESO [IP 54]	Requerido		340 kg / 750 lbs
	COLOR DE LA CAJA	Requerido		RAL 7022 (umbral grey)
	PROTECCION DE LA CAJA (IEC 60529)	Requerido		IP32
	COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA	Requerido		EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, Conducted emission EN 55011 class A
10.00	PRUEBAS EN CAMPO			
10.01	Prueba de continuidad eléctrica de los alambres	Requerido		Si, verificación de los cableados de control
10.02	Pruebas de chequeo punto a punto de los circuitos eléctricos	Requerido		Si, Verificación de circuito de control y servicios auxiliares.
10.03	Prueba de la continuidad del sistema de tierras de los equipos	Requerido		Si, Verificación de aterramiento de masa y equipos principales.
10.04	Pruebas de Aislamiento	Requerido		Si, barra principal
10.05	Pruebas de faseo	Requerido		Si, en operación se verifica los fasores en los relés de protección.
10.06	Verificación de la identificación de torque de las barras y cuerpo	Requerido		Si
10.07	Verificación de la operatividad de las puertas	Requerido		Si
NOTAS GENERALES				
REVISADO POR: _____ OBSERVACIONES: ☐ SI ☐ NO		ÁREA: Construcción _____ FECHA: _____ FIRMA: _____		

Figura 132 Hoja de datos del filtro activo de armónicos. Fuente. Elaboración propia

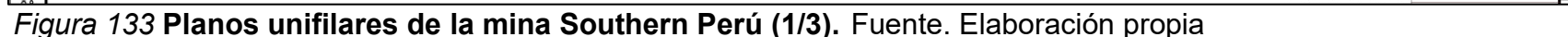


Figura 134 Planos unifilares de la mina Southern Perú (2/3). Fuente. Elaboración propia

**F**

Anexo C

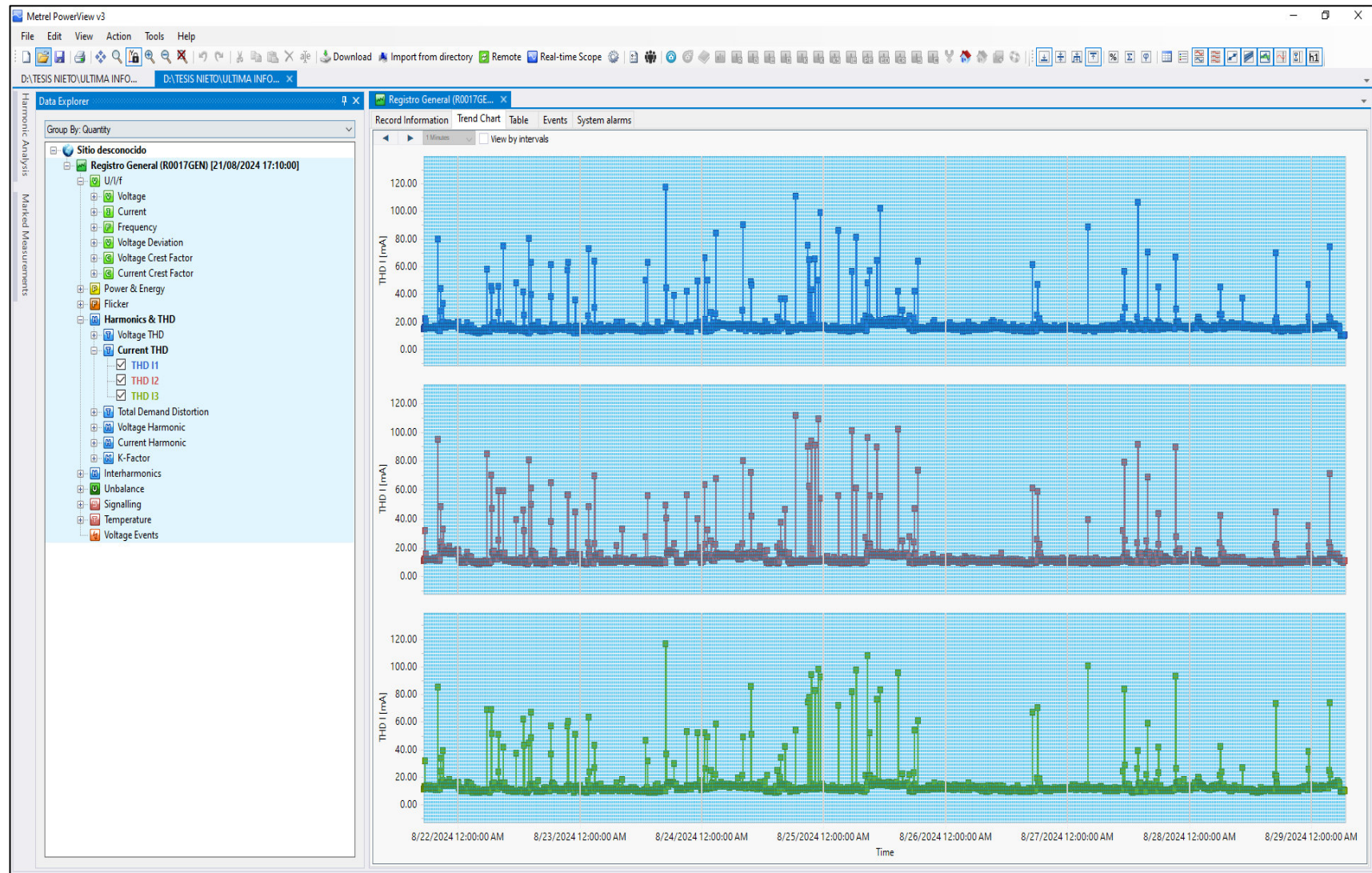


Figura 136 Reporte de medición de los analizadores de redes (1/2). Fuente. Elaboración propia

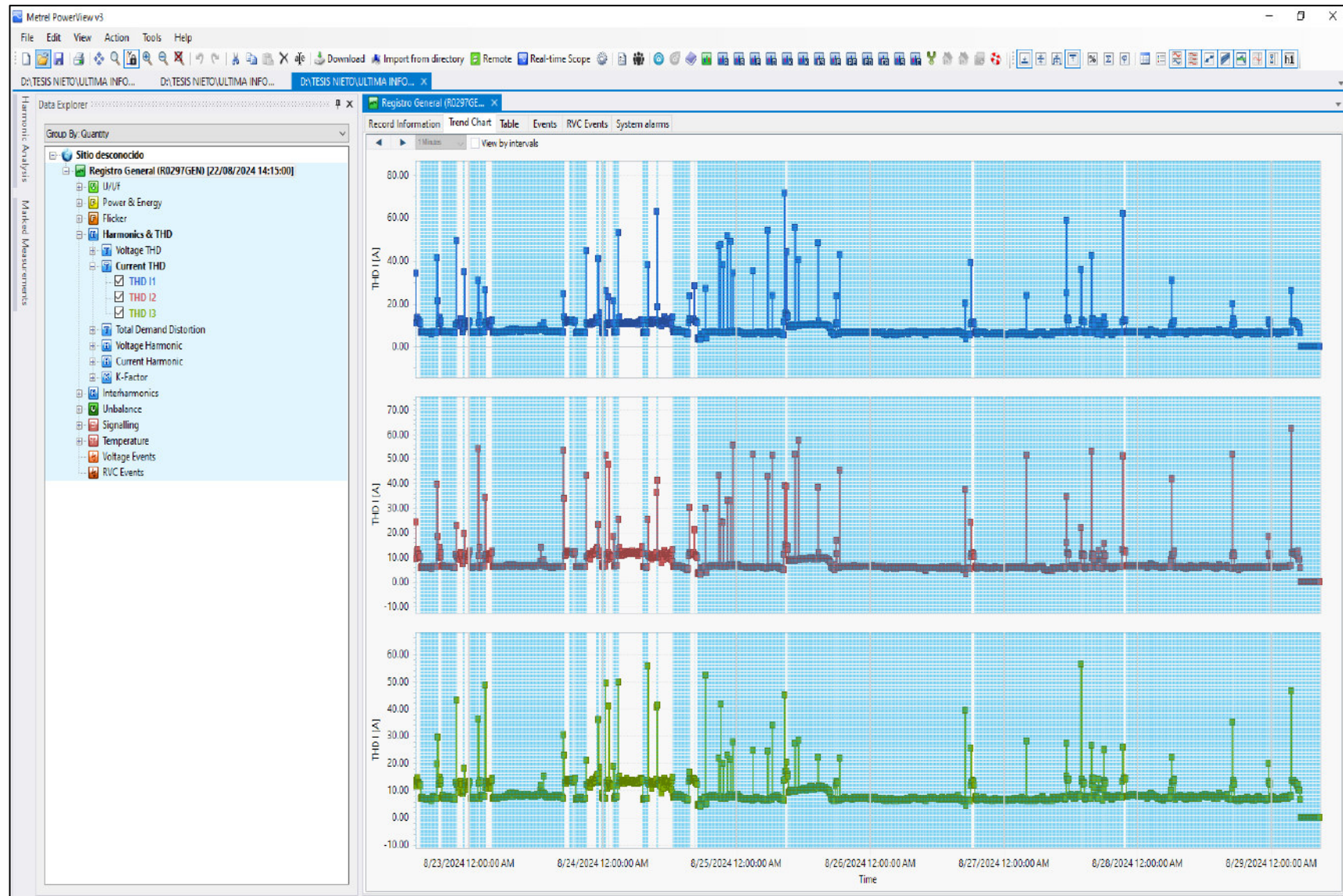


Figura 137 Reporte de medición de los analizadores de redes (2/2). Fuente. Elaboración propia

20	IF THE DRIVE
----	--------------

