

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Electrónica

Trabajo de Suficiencia Profesional

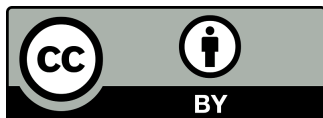
Análisis de distorsión armónica Planta Graphics, Laboratorios Portugal SRL

Godofredo Barrantes Zapana

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electrónico

Arequipa, 2021

Repositorio Institucional Continental
Trabajo de suficiencia profesional



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Continental, por haber tenido la gentileza de aceptar a mi solicitud de graduación por Trabajo de Suficiencia Profesional.

Al ingeniero Jorge Asencio Sifuentes López, quien me asesoró durante la elaboración y revisión de este documento, mostrando una actitud proactiva, sencillez, entusiasmo y experiencia.

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Suficiencia Profesional a mi querida familia; a mi esposa, Mary Marlene; a mis hijos, Rommel y Omar, y a mi hija Karla, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza que me brindaron a lo largo de todos estos años y durante el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN EJECUTIVO

Las plantas industriales, actualmente, utilizan gran cantidad de equipos electrónicos para la optimización de los procesos, como regulación de velocidad de motores, arrancadores suaves, instrumentación y control de proceso, fuentes de alimentación ininterrumpida, equipos computacionales, sistemas de comunicación, iluminación LED, entre otros.

Estos elementos electrónicos denominados cargas no lineales, por un lado, tiene un efecto positivo en la mejora de los procesos industriales, por otro lado, tiene un impacto negativo, ya que generan los fenómenos llamados armónicos, estos distorsionan la onda fundamental de tensión y corriente, produciendo fallas y operaciones anormales en los equipos.

Asimismo, en una planta industrial con una ampliación crecen las cargas y demandas de ciertas áreas, esto conlleva al incremento también de cargas no lineales y cambio de las características y la topología de la red eléctrica, entonces se hace necesario monitorear y analizar de los armónicos presentes periódicamente.

Las apariciones de los armónicos en el sistema eléctrico crean problemas como: el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de los dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros efectos.

El presente trabajo consiste en un análisis de los armónicos de tensión y corriente de una planta industrial de baja potencia, aproximadamente 200kW; como trabajo se realizan las mediciones con el equipo adecuado. Luego, se efectúan el análisis de datos capturado y el planteamiento de soluciones. Es recomendable realizar este monitoreo con un equipo, basado con normas técnicas internacionales IEC o IEEE. Asimismo, es importante la buena configuración del equipo de acuerdo con la necesidad y el alcance del análisis. De esta manera, se obtendrán los datos e información cercano de lo real del sistema eléctrico.

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional tiene como objetivo principal identificar el dispositivo o máquina que inyecta armónicos al sistema eléctrico de la Planta Portugal Graphics.

Este documento puede servir como referencia para el uso y la comprensión de estudiantes de ingeniería, profesionales del área de calidad de energía y personal técnico especializado.

El análisis de armónicos y su mitigación son temas interesantes para un ingeniero, ya que permite aplicar muchos conceptos sobre la respuesta en frecuencias de los circuitos en estado permanente; los elementos de la red como: resistencias, inductores, capacitores están diseñados para operar para una frecuencia determinada, en general, 60Hz, cuando son sometidos a una frecuencia de operación diferente, sus respuestas de operación cambian, incrementando o disminuyendo sus impedancias, dependiendo de la configuración y conexión de estos, ante esta situación surge una impedancia de distorsión por armónicos.

La combinación de las corrientes distorsionadas y las impedancias de distorsión, deforman la señal de tensión que idealmente es sinusoidal. Esta señal distorsionada de tensión recibe los demás equipos electrónicos adyacentes como alimentación o referencia, los cuales afectan en una mala operación de los equipos.

Cuando se diseña o implementa un equipo nuevo, es importante conocer el nivel de emisión de armónicos o las normas de fabricación de los equipos, con el fin de tomar las precauciones y consecuencias posteriores que, al final, ayudará evitar fallas de equipos por distorsión de armónicos en el sistema.

En el capítulo I, se mencionan los datos generales de la empresa de servicios POWENERGY SRL, dedicado a dar servicios en el área eléctrica, su política, misión y visión de la empresa.

En el capítulo II, se dan a conocer los aspectos generales de las actividades profesionales, el área del desarrollo de las labores del personal y actividades fundamentales.

El capítulo III, trata del marco teórico, los fundamentos teóricos aplicables para este trabajo, sin mucha rigurosidad matemática, teoría básica de generación de armónicos, normativa existente en el Perú e internacional, métodos de mitigación de armónicos.

En el capítulo IV, se presenta el desarrollo del trabajo de análisis de armónicos de la planta industrial, la metodología, el enfoque del análisis, la instrumentación utilizada, los cuadros resumen de los armónicos.

En el capítulo V, se muestran los resultados finales de las mediciones realizadas, análisis de datos y el planteamiento de las alternativas de solución para reducir los armónicos existentes.

Conclusiones: Se muestran las conclusiones del desarrollo del trabajo, los aspectos más relevantes del análisis y también del equipo de medición de armónicos.

Recomendaciones: Las recomendaciones se basan básicamente en las observaciones encontradas en la parte técnica e importancia de monitorear los armónicos periódicamente, esto conlleva a mantener confiable el sistema eléctrico.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN EJECUTIVO	iv
INTRODUCCION	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xi
CAPITULO I	1
ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA.....	1
1.1. Datos generales	1
1.2. Actividades principales	2
1.3. Reseña histórica.....	3
1.4. Organigrama	4
1.5. Visión y misión.....	4
1.6. Bases legales	5
1.7. Descripción del área donde realiza sus actividades profesionales	5
1.8. Descripción del cargo y de las responsabilidades	7
CAPITULO II	8
ASPECTOS GENERALES DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES	8
2.1. Antecedentes o diagnostico situacional	8
2.2. Identificación de oportunidad o necesidad	9
2.3. Objetivos de la actividad profesional	9
2.4. Justificación de la actividad profesional	9
2.5. Resultados esperados	10
CAPITULO III	11
MARCO TEÓRICO	11
3.1. Introducción	11
3.2. Fundamentos básicos	12
3.3. Distorsión Armónica y Series Fourier	14
3.3.1. Coeficientes de Fourier	15
3.3.2. Transformada de Fourier	16
3.3.3. Transformada rápida de Fourier (FFT)	17
3.4. Fuente de armónicos	18
3.4.1. Cargas industriales	22

3.4.2. Cargas domésticas	23
3.5. Efectos de los armónicos	24
3.6. Reducción y filtrado de los armónicos	26
3.7. Índices generales para distorsión armónica:	32
3.8. Normas de regulación.....	34
CAPITULO IV	43
DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PROFESIONAL	43
4.1. Metodología para el análisis de armónicos	43
4.1.1. Inspección de planta	45
4.1.2. Descripción sistema eléctrico	45
4.1.3. Selección de puntos de monitoreo	48
4.1.4. Equipo de monitoreo (Procedimiento de Instalación y Configuración)	49
4.1.5. Descripción de puntos de monitoreo de tableros de planta	55
4.1.6. Monitoreo tablero de distribución TP-I subestación principal	55
4.1.7. Monitoreo tablero de distribución TP-IPM (TD-03)	63
4.1.8. Monitoreo tablero de distribución TD-01	72
4.1.9. Monitoreo tablero de distribución TD-07	79
CAPITULO V	87
RESULTADOS	87
5.1. Resultados finales de las actividades realizadas	87
5.1.1. Armónicos de tensión.....	87
5.1.2. Armónicos de corriente	89
5.2. Planteamiento de alternativas de solución	91
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFIA.....	101
ANEXOS	102
Anexo A: Orden de Servicio de Medición de Armónicos	103
Anexo B: Calibración del analizador de redes	104
Anexo C: Datos técnicos del analizador de redes	105
Anexo D: Espectro de armónicos mediante software Power log 5.8	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos Empresa POWENERGY SRL.....	12
Tabla 2: Armónicos generados por diferentes cargas.....	36
Tabla 3: Efectos y daños por presencia de armónicos.....	37
Tabla 4: Resumen índice general de armónicos.....	46
Tabla 5: Límites de distorsión de Voltaje según IEEE-519.....	47
Tabla 6: Límites de distorsión de corriente para sistemas clasificados de 120 V a 69kV según IEEE-519.....	47
Tabla 7: Componentes de tensión armónica Armónicos impares no múltiplos de tres IEC-61000-2-4.....	51
Tabla 8: Componentes de armónico de voltaje impares múltiplo de tres IEC-61000-2-4 ...	52
Tabla 9: Componentes de armónico de voltaje pares IEC-61000-2-4.....	53
Tabla 10: Niveles de compatibilidad para distorsión armónica total IEC-61000-2-4.....	53
Tabla 11: Norma técnica peruana de calidad y servicio eléctrico (NTCSE).....	54
Tabla 12: Puntos de Monitoreo.....	61
Tabla 13: Cronograma para la medición de armónicos.....	61
Tabla 14: Características analizador de Redes (Fuente manual del analizador).....	65
Tabla 15: Valores de armónicos individuales de tensión tablero TP-I.....	72
Tabla 16: Valores distorsión Armónica Total THDv Tablero TP-I.....	73
Tabla 17: Valores de armónicos individuales de corriente Tablero TP-I.....	75
Tabla 18: Distorsión Armónica de Demanda TDD Tablero TP-I.....	76
Tabla 19: Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-03.....	80
Tabla 20: Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-03.....	81
Tabla 21: Valores de armónicos de corriente Tablero TD-03.....	83
Tabla 22: Valores de armónicos totales TDD tablero TD-03.....	84
Tabla 23: Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-01.....	88
Tabla 24: Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-01.....	89
Tabla 25: Valores de armónicos individuales de corriente Tablero TD-01.....	91
Tabla 26: Valores de armónicos totales de corriente TDD tablero TD-01.....	92
Tabla 27: Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-07.....	96
Tabla 28: Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-07.....	97
Tabla 29: Valores de armónicos individuales de corriente tablero TD-07.....	99
Tabla 30: Valores de armónicos totales TDD Tablero TD-07.....	100
Tabla 31: Comparativa de armónicos de tensión de tableros.....	102

Tabla 32: Comparativa armónicos totales THDv Tableros	89
Tabla 33: Comparativa armónicos individuales de corriente de tableros	90
Tabla 34: Comparativa de armónicos totales TDD Tableros.....	91
Tabla 35: Alternativas para mitigación de armónicos	92

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mapa de Ubicación	2
Ilustración 2: Organigrama Funcional (Fuente Gerencia Powenergy)	4
Ilustración 3: Sala Eléctrica Cliente (Fuente Sala Eléctrica de Clientes)	6
Ilustración 4: Oficinas POWENERGY (Fuente Oficinas Powenergy)	6
Ilustración 5: Onda sinusoidal distorsionada con 3er, 5to y 7mo armónico (Fuente Grafico en Excel).....	13
Ilustración 6: Tensión y corriente de una carga lineal (Fuente Grafico en Excel)	19
Ilustración 7: Distorsión de la corriente por una carga no lineal (Fuente Catalogo Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos 2007 Merlin Gerin)	20
Ilustración 8: Espectro de armónicos de corrientes durante la inserción de transformador 60Hz (Fuente Libro Electrical Power System Quality 2Ed, Roger C. Dugan)	21
Ilustración 9: Influencia de corrientes armónicas en las impedancias del sistema (Fuente Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider).	22
Ilustración 10: Efecto de la impedancia con las corrientes armónicas (Fuente Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider).	22
Ilustración 11: Alimentación aguas arriba de la carga no lineal (Fuente Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider).	27
Ilustración 12: Agrupación de cargas no lineales, alimentación de aguas arriba (Fuente Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider).	28
Ilustración 13: Transformadores para reducción de armónicos (Fuente Libro Electrical Power System Quality 2Ed, Roger C. Dugan)	29
Ilustración 14: Rector de línea para reducir armónicos (Fuente Power Quality In Electrical System Alexander Kusko)	29
Ilustración 15: filtro L-C sintonizado a la frecuencia de resonancia (Fuente 5-Armónicos CYDESA)	30
Ilustración 16: Aplicación de filtro activo y carga no lineal (Fuente Power Quality In Electrical System Alexander Kusko)	32
Ilustración 17: Etapas para el análisis de armónicos	44
Ilustración 18: Transformador de distribución 1MVA	46
Ilustración 19: Esquema Eléctrico Planta Graphics (Fuente Laboratorios Portugal)	47
Ilustración 20: Vista general planta Graphics	48
Ilustración 21: Pantalla de configuración Analizador Redes	54
Ilustración 22: Diagrama Fasorial	55

Ilustración 23: Perfil de Tensión RMS TP-I (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	56
Ilustración 24: Corriente de Carga RMS (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	57
Ilustración 25: Espectro Armónicos Individuales de Tensión TP-I (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	58
Ilustración 26: Espectro Armónicos Individuales de Corriente Tablero TP-I (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	61
Ilustración 27: Vista de monitoreo del tablero TP-I (Fuente Laboratorios Portugal)	63
Ilustración 28: Tensiones RMS tablero TD-03 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	64
Ilustración 29: Corrientes RMS tablero TD-03 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	65
Ilustración 30: Espectro armónicos individuales de tensión Tablero TD-03 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	66
Ilustración 31: Espectro de armónicos individuales de corriente Tablero TD-03 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	69
Ilustración 32: Vista del monitoreo de tablero TD-03 (Fuente Laboratorios Portugal)	71
Ilustración 33: Tensiones RMS tablero TD-01 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	72
Ilustración 34: Corrientes RMS tablero TD-01 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	73
Ilustración 35: Espectro de armónicos de tensión Tablero TD-01 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	74
Ilustración 36: Espectro armónicos individuales de corriente Tablero TD-01 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	76
Ilustración 37: Vista de monitoreo tablero TD-01 (Fuente Laboratorios Portugal)	78
Ilustración 38: Tensiones RMS Tablero TD-07 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	79
Ilustración 39: Corrientes RMS Tablero TD-07 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	80
Ilustración 40: Espectro Armónicos de Tensión Tablero TD-07 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	81
Ilustración 41: Espectro de armónicos de corriente Tablero TD-07 (Fuente Datos Capturados por Analizador de Redes)	84

Ilustración 42: Vista de tablero TD-07 (Fuente Laboratorios Portugal)	86
Ilustración 43: Modelo sin transformadores (Fuente Propia Etap 12.6)	95
Ilustración 44: Espectro de armónicos sin transformadores (Fuente Propia Etap 12.6)	96
Ilustración 45: Modelo con transformadores (Fuente Propia Etap 12.6)	97
Ilustración 46: Espectro de armónicos con transformadores (Fuente Propia Etap 12.6)	98

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA

1.1. Datos generales

Tabla 1

Datos Empresa POWENERGY SRL (Fuente Powenergy SRL)

RAZÓN SOCIAL:	POWENERGY S.R.L.
NOMBRE COMERCIAL:	POWENERGY
RUC:	20601501172
TIPO DE CONTRIBUYENTE:	S.R.L.
DOMICILIO FISCAL:	MANZANA "B", LOTE 09, Z-I, PARQUE INDUSTRIAL RIO SECO
DISTRITO:	CERRO COLORADO
PROVINCIA/DEPARTAMENTO:	AREQUIPA/AREQUIPA
REPRESENTANTE LEGAL:	MARY MARLENE ZUÑIGA GUTIERREZ
PÁGINA WEB:	www.powenergyperu.com
CORREOS:	powenergy.srl@gmail.com ventas@powenergyperu.com
TELÉFONOS:	054333627/ 969614077



Ilustración 1: Mapa de Ubicación
(Fuente Google Map)

1.2. Actividades principales

POWENERGY S.R.L. es una Empresa dedicada a brindar servicios de Ingeniería, Desarrollo de Proyectos, para la Industria y Comercio.

Diseño y desarrollo de proyectos de sistemas eléctricos:

- Electrificación de Plantas Industriales, Líneas de distribución de energía en media y baja tensión.
- Subestaciones de distribución, centro de control de motores en media y baja tensión.
- Sistemas con energías renovables, energía solar y eólico, almacenes, iluminación, sistemas de bombeo, sistemas de iluminación con LED.

Estudios y optimización de energía eléctrica:

- Optimizamos el Uso de la Energía. Eficiencia de la energía en instalaciones eléctricas, compensación de energía reactiva, Implementación de sistemas de energías renovables, fotovoltaicos y eólicos.
- Calidad de energía, armónicos, fluctuaciones de tensión, transitorios y desequilibrios, en instalaciones eléctricas, mitigación y filtrado de armónicos.
- Estudios eléctricos, cortocircuito, flujo y potencia, arranque de motores, transitorios electromagnéticos, influencia de campo electromagnético, protección de sistemas eléctricos, resistividad de terreno para sistemas de puestas a tierra.

Control y automatización industrial:

- Diseño de Sistemas de Control de Motores Eléctricos: Accionamiento de Motores Eléctricos con Arrancadores de Voltaje Reducido, Arrancadores Suave, Variadores de Velocidad.
- Automatización de Procesos Industriales, Controladores de Lógica Programable (PLC), Redes de Comunicación, Ethernet, Profibus, Modbus, Sensores y Actuadores.

1.3. Reseña histórica

POWENERGY S.R.L. es una sociedad de responsabilidad limitada, constituida con tres socios, se constituye el 03 de agosto del 2016, como una empresa de servicios de Ingeniería y desarrollo de proyectos en las áreas: ingeniería mecánica electrónica, eléctrica y energética, prestación de servicios de mantenimiento, reparación, fabricación de equipos, componentes, electromecánicos, tercerización y dotación de personal, alquiler de equipos y vehículos, importación y exportación de equipos y maquinarias, auditoria de instalaciones y seguridad industria, entrenamiento y capacitación de personal, representación, comercialización de equipos para la industria y minería, cuyo gerente general es la Señora Mary Marlene Zúñiga Gutiérrez.

1.4. Organigrama

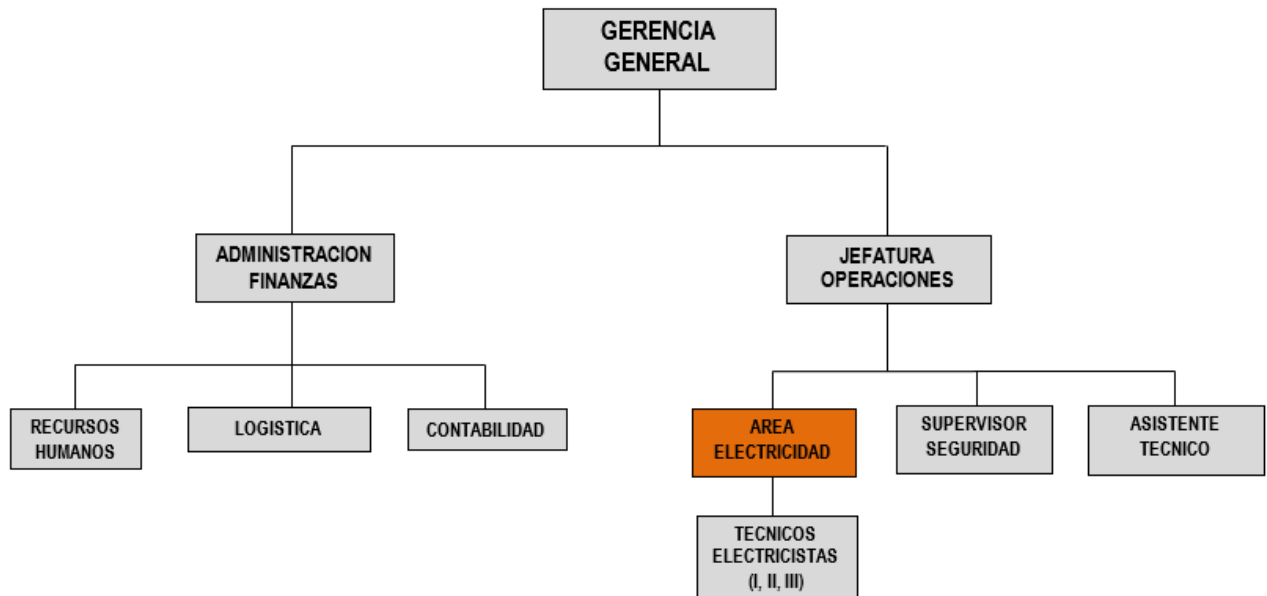


Ilustración 2: Organigrama Funcional

Fuente: Gerencia Powenergy

1.5. Visión y misión

VISIÓN:

Ser una empresa consolidada y de reconocido prestigio a nivel nacional con un equipo humano competente, capacitado, motivado y comprometido, utilizando procesos modernos y sistemas de calidad (SRL P. , 2018).

MISIÓN:

Cumplir de forma eficiente y eficaz, las necesidades de nuestros clientes, orientadas a garantizar la seguridad del personal y medio ambiente, con responsabilidad y costos competitivos.

Enfocados en la generación de valor y comprometidos con el desarrollo de nuestra organización (SRL P. , 2018).

1.6. Bases legales

- Testimonio de Constitución de Empresa POWENERGY Sociedad de Responsabilidad Limitada, Notaria Fernando Denis Begazo Delgado, serie T Nro. 01898358 a serie T Nro. 01898360, del 23-08-2016. (Fuente Gerencia)
- Registro de Personas Jurídicas SUNARP oficina registral Arequipa, Partida Numero 11352348, 23-08-2016, POWENERGY S.R.L. (Fuente Gerencia)
- Registro Único del contribuyente, 20601501172, fecha de inscripción 14-09-2016, inicio de actividades 19-09-2016. (Fuente SUNAT).

1.7. Descripción del área donde realiza sus actividades profesionales

POWENERGY S.R.L. es una empresa dedicada a dar servicios de Ingeniería y Desarrollo de Proyectos, el área de trabajo está definida como la oficina de POWENERGY S.R.L para realizar los trabajos administrativos y la otra parte está en algún o área de un cliente donde requiere el soporte técnico, como podrían ser instalaciones nuevas, reparaciones, pruebas, mediciones, etc. Generalmente el área de trabajo, en este caso, puede ser una sala eléctrica, subestación eléctrica, área de máquinas eléctricas, donde se prestará en servicio técnico a los clientes.



Ilustración 3: Sala Eléctrica Cliente

Fuente: Sala Eléctrica de Clientes

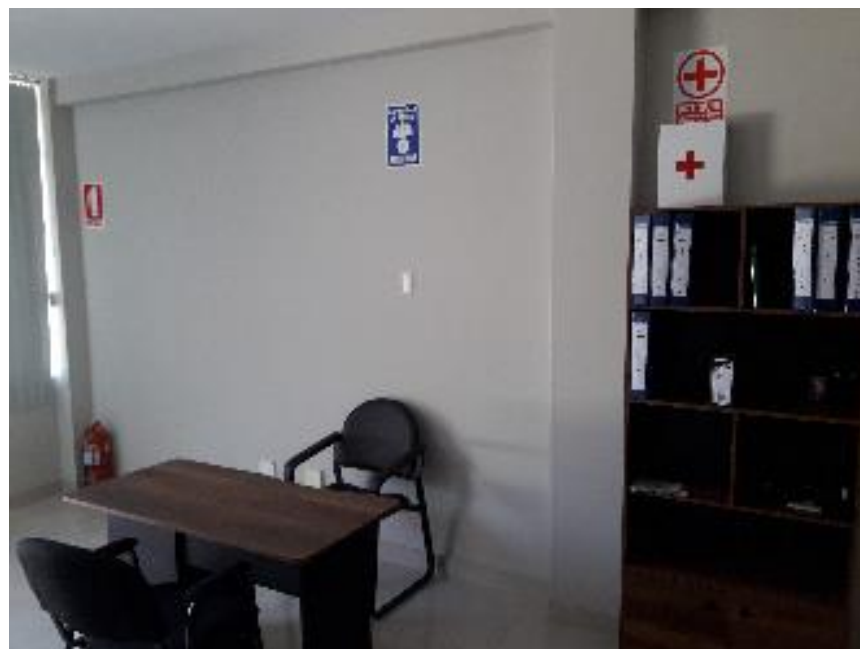


Ilustración 4: Oficinas POWENERGY

Fuente: Oficinas Powenergy

1.8. Descripción del cargo y de las responsabilidades

MISIÓN DEL PUESTO:

Realiza la supervisión, controla el correcto montaje, revisión y mantenimiento de los equipos eléctricos, instalaciones, máquinas eléctricas, garantizando un trabajo seguro, en función a los plazos establecidos y planificados, maximizando la calidad y minimizando los costos.

FUNCIONES PRINCIPALES:

- Programa, distribuir y controlar la carga de trabajo del personal del área, cumpliendo el programa de trabajos, coordinados con el jefe inmediato.
- Preparar y aplicar las herramientas administrativas necesarias para los procesos eléctricos.
- Controlar que el personal cumpla las disposiciones y normas de seguridad industrial descritas en el plan de la empresa POWENERGY SRL.
- Preparar presupuestos y cotizaciones para los clientes de POWENERGY SRL.
- Mantener los equipos y herramientas del área en buenas condiciones.
- Cumplir con todos los procedimientos e instructivos aplicables al área.
- Solicitar la ejecución de cursos de especialización y evaluar la aplicación a su personal a cargo.
- Establece o ajusta procedimientos de trabajo para encontrar programas de producción.
- Realiza e introduce medidas para mejorar métodos de producción, funcionamiento de equipo, y calidad del Servicio.
- Analiza y resuelve problemas de trabajo, asistiendo a estos en la solución de inconvenientes en las labores operativas.
- Participar activamente en la aplicación del SIG (Sistema Integrado de Gestión).

CAPÍTULO II. ASPECTOS GENERALES DE LAS ACTIVIDADES PROFESIONALES

2.1. Antecedentes o diagnostico situacional

La Empresa PORTUGAL S.R.L., cliente de la Empresa POWENERGY S.R.L., mediante su departamento de logística, solicita un análisis de sus instalaciones eléctricas, debido a que se presentaron en varias oportunidades disparos intempestivos de los interruptores automáticos, y daños en equipos sensibles a las variaciones de tensión.

El equipo compresor GA30 Atlas Copco, presento eventos de paradas intempestivas sin presentar alarmas en el panel de operador, la acción inmediata fue monitorear la tensión de la red, con un instrumento analizador Fluke similar, fecha y hora del monitoreo 26/08/2020 14:08:20.

Eventos registrados:

- Caída de tensión: 90 %
- Aumento de tensión: 110 %
- Interrupción: 5 %
- Corriente de entrada: No Registrado
- Cambios rápidos de tensión: No Registrado

2.2. Identificación de oportunidad o necesidad

En estas condiciones de operación de la planta industrial, surge la necesidad de identificar los tipos de carga conectada en los circuitos y los efectos o fallas típicas presentados, tales efectos pueden ser debido a la presencia de armónicos correspondientes en los circuitos, para la identificación es necesario monitorear y realizar mediciones con un analizador de redes, hacer un seguimiento de la presencia de los armónicos aguas abajo e identificar la causa raíz de generación de armónicos, plantear alternativas de solución como el aislamiento de la cargas no lineales, mitigación o eliminación de ciertos armónicos que tienen mayor impacto en el sistema eléctrico.

2.3. Objetivos de la actividad profesional

El objetivo de este trabajo es realizar las mediciones de los armónicos en los diferentes tableros de distribución de energía eléctrica de planta, realizar el análisis de los datos registrados y plantear una alternativa de mitigar los armónicos presentes.

Para lo cual se utilizará un analizador de redes eléctricas normalizado y con certificado de calibración vigente.

2.4. Justificación de la actividad profesional

Se justifica el análisis de los armónicos de la planta industrial de empresa Portugal, debido a los eventos recurrentes de falla de equipos y maquinas sensibles, que producen pérdidas en la operación y producción.

Las plantas industriales requieren un suministro eléctrico fiable y de buena calidad de la energía eléctrica, pero con el avance de la tecnología, el desarrollo de la electrónica de potencia y el crecimiento de aplicaciones de estos equipos en las plantas industriales, las redes eléctricas presentan mayor contenido de armónicos y se ve la necesidad de mitigar o filtrar los armónicos generados por los convertidores electrónicos.

2.5. Resultados esperados

Como resultado del análisis, se espera identificar las cargas no lineales presentes en la red y los armónicos individuales y tasas de distorsión armónica en los tableros de baja tensión, y proporcionar las recomendaciones y alternativas para la mitigación de los armónicos encontrados, existen una variedad de soluciones, desde la reubicación de cargas no lineales según los diagramas unifilares, instalar equipos modernos con mínima emisión de armónicos, o instalación de equipamiento eléctrico para la reducción de los armónicos en los puntos críticos de sistema, el alcance para este estudio es el planteamiento para la mitigación de armónicos presentes.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Introducción

La electrónica de potencia es muy importante en nuestra vida diaria, empezó los años 1948 con la invención del transistor, considerado como la primera revolución electrónica, en 1958 se presentó otra revolución con el desarrollo del tiristor, este fue el principio de una nueva era, porque permite optimizar la operación y consumo de la energía eléctrica de forma controlada (Rashid, 1995). El suministro de energía eléctrica en tensión y frecuencia siempre se espera que sea constante, en esta condición el consumo de energía por las cargas también es constante, pudiendo regularse este consumo de forma discreta en algunas aplicaciones. Como ejemplo básico, para el control de potencia de un horno eléctrico se conectan o desconectan las resistencias parciales, obteniendo el control de potencia de forma discreta.

Con la aparición y aplicación de los dispositivos de electrónica de potencia, como el rectificador controlado de silicio (SCR), se logra el control continuo de potencia desde 0 % al 100 %, control basado en el ángulo de disparo del tiristor. Los dispositivos electrónicos o semiconductores de potencia desarrollados se resumen en, diodo de potencia, rectificador controlado de silicio (SCR), transistor bipolar de potencia (BJT), MOSFET de potencia, transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT), transistor de inducción estática (SIT), etc. Las aplicaciones de la electrónica de potencia, es creciente, abarca desde el control de potencia muy bajas en mili vatios hasta potencias muy elevadas como megavatios (Hart, 2001).

Las industrias, para su operación, utilizan varios equipos basados con la electrónica de potencia, uno con mayor aplicación es el variador de frecuencia (VFD) para controlar la velocidad de motores eléctricos, otro elemento es la fuente de alimentación ininterrumpida (UPS), también las fuentes de corriente continua

rectificadas y conmutadas, comúnmente se les denomina convertidores, ellos se pueden resumir en, convertidores de corriente alterna a continua CA-CC (Rectificadores), conversión de corriente continua a corriente alterna CC-CA (Inversor), convertidores de corriente continua a corriente continua CC-CC (Fuentes conmutadas), convertidores de corriente alterna a corriente alterna CA-CA (Ciclo Convertidores), y otros convertidores de aplicaciones especiales (Hart, 2001).

El tratamiento de la corriente alterna original, para conseguir que la tensión y frecuencia sean controlables o cambiar la forma de la tensión alterna a tensión continua, exige un proceso de conversión, mediante los convertidores basados en la electrónica de potencia, estos elementos al realizar la conmutación de la tensión sinusoidal suministrada, generan deformaciones de la forma de ondas sinusoidal de tensión y corriente, esta desviación de las formas de onda de voltajes y corrientes sinusoidales se describe en términos de distorsión de la forma de onda, que generalmente se expresada como distorsión armónica, los cuales son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema.

Los primeros equipos que generaban distorsión armónica eran principalmente los transformadores es condición de saturación, los hornos de arco industriales y otros dispositivos de arco como grandes soldadores eléctricos, hoy con el desarrollo de la electrónica y las aplicaciones crecientes en la industria incrementan el índice de las distorsiones armónicas. Para controlar el nivel de armónicos en cualquier sistema, es importante conocer tanto la fuente de armónicos como los dispositivos que son sensibles a dichos armónicos para limitar su efecto en cualquier red eléctrica. Los armónicos en la red eléctrica son una causa frecuente de problemas de calidad de la energía, lo que resulta en un aumento del calentamiento en los equipos y conductores, fallas en el equipamiento eléctrico y pulsaciones de torque en los motores.

3.2. Fundamentos básicos

Un armónico en un sistema de suministro de corriente alterna, se define como una componente sinusoidal de forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos

en las formas de onda de voltaje o corriente se pueden tomar como componentes perfectamente sinusoidales de frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental.

La Ilustración 5 muestra una forma de onda fundamental de 60Hz, la distorsión de la onda con armónicos, si consideramos un valor pico alrededor de 100 Amperios, se puede tomar como uno por unidad. Asimismo, también representa formas de onda de amplitudes $(1/7)$, $(1/5)$ y $(1/3)$ por unidad y frecuencias múltiplo de 7, 5 y 3 veces de la frecuencia fundamental 60Hz, respectivamente. Este comportamiento que muestra los componentes armónicos de amplitud decreciente a menudo siguiendo una ley inversa con orden armónico, es típico en los sistemas eléctricos (Rosa, 2006).

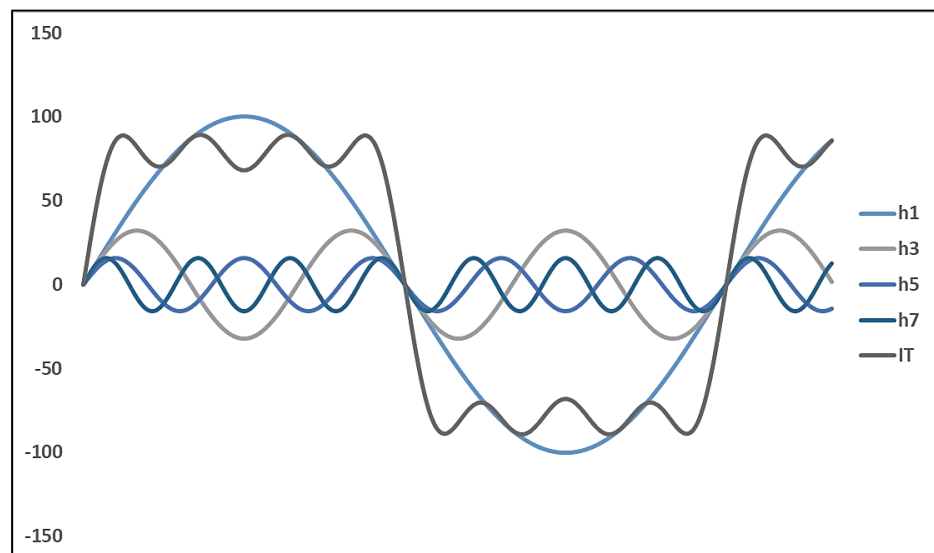


Ilustración 5: Onda sinusoidal distorsionada con 3er, 5to y 7mo armónico

Fuente: Gráfico en Excel

La distorsión es causada por dispositivos no lineales en el sistema eléctrico, el dispositivo no lineal, es uno en el que, la corriente no es proporcional al voltaje aplicado, si bien el voltaje aplicado es cercanamente a la sinusoidal, la corriente resultante está distorsionada, este puede distorsionar también la tensión, al aumentar la tensión en un pequeño porcentaje puede hacer que las corrientes se incrementen y generar daños en los equipos.

Cuando una forma de onda es idéntica de un ciclo al siguiente, se puede representar como una suma de ondas sinusoidales puras en las que la frecuencia

de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. La suma de las sinusoides se conoce como una serie de Fourier, que lleva el nombre del gran matemático que descubrió el concepto (Francisco, 2006).

3.3. Distorsión Armónica y Series Fourier

En el análisis de circuitos con el estudio de las funciones periódicas tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia, de manera específica, se consideran funciones forzadas periódicas con naturalezas funcionales que satisfacen ciertas restricciones matemáticas, estas funciones pueden representarse como la suma de un número infinito de funciones seno y coseno, que se relacionan de manera armónica. Por lo tanto, debido a que la respuesta forzada de cada componente sinusoidal se determina con facilidad mediante el análisis sinusoidal de estado permanente, la respuesta de la red lineal a la función forzada periódica general se obtiene mediante la superposición de las respuestas parciales (Hayt, 2007).

El tema de la serie de Fourier tiene vital importancia, Fourier demostró que una función periódica $f(t)$ puede expresarse como la suma de funciones sinusoidales. Por tanto, si una función periódica se expresa como una suma de funciones linealmente independientes, cada función en la suma debe ser periódica con el mismo periodo, y la función $f(t)$ puede expresarse en la forma:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_1 \sen \omega_0 t + b_2 \sen 2\omega_0 t + \dots$$

O, de modo conciso, la serie de Fourier se escribe de la forma

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sen n\omega_0 t)$$

La pulsación ω_0 o frecuencia fundamental se relaciona con el periodo T mediante

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Donde a_0 , a_n y b_n ($n = 1, 2, \dots$) se llaman coeficientes de la serie trigonométrica y dependen de n y de $f(t)$. La ecuación es una forma trigonométrica de la Serie de Fourier para $f(t)$, el proceso de determinar los valores de las constantes a_0 , a_n y b_n se llama análisis de Fourier.

3.3.1. Coeficientes de Fourier

Para encontrar los coeficientes a_0 , a_n y b_n , se realiza el proceso de integración a cada lado de la ecuación de la función periódica a lo largo de su período fundamental, y se determinan los coeficientes de Fourier:

$$\int_0^T f(t) dt = \int_0^T a_0 dt + \int_0^T \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_0 t dt$$

En las Ecuaciones, el sufijo k indica el k -ésimo coeficiente dentro de la secuencia entera 1, 2, 3, . . . se observa que a_0 es el valor medio de $f(t)$, a_n , es

igual a dos veces el valor medio de $f(t) \cos k\omega_0 t$ y b_n , es igual a dos veces el valor medio de $f(t) \sin k\omega_0 t$.

El análisis armónico es un proceso mediante el cual se calculan las magnitudes y fases de la componente fundamental, las componentes armónicas de una onda periódica.

Cada uno de los términos en la serie armónica de Fourier se refiere a un “armónico” de la frecuencia fundamental. El término que tiene la misma frecuencia que la fundamental es considerada como el primer armónico.

Cuando los semiperiodos, positivo y negativo tienen igual forma y la función es simétrica la serie de Fourier contiene únicamente armónicos impares.

Las señales periódicas en las que el semiperiodo positivo no tiene igual forma que la del semiperiodo negativo la serie de Fourier contiene tanto armónicos pares como impares.

Las ondas también pueden tener un off-set respecto al eje horizontal, esto es conocido como off-set DC debido a que esta muestra un aumento para el término 0 a de la serie de Fourier, lo cual es conocido en la ingeniería eléctrica como la corriente directa (DC). En muchos dispositivos del sistema de potencia, se observa el mismo comportamiento para ambas polaridades y no tienen off-set en estado estable, esto básicamente significa que la corriente fluyendo a través de estos dispositivos tiene las mismas características en la dirección positiva y negativa (Irwin, 1997).

3.3.2. Transformada de Fourier

La representación de la serie de Fourier de una señal periódica es la descripción de dicha señal en términos del contenido de frecuencia dado por las componentes sinusoidales, las señales no periódicas, también conocidas como señales sin periodo, pueden describirse en términos de contenidos de frecuencia, y la herramienta para la construcción analítica para hacerlo es la Transformada de Fourier.

Es un caso especial de la transformada de Laplace, se puede representar de manera similar a la transformada bilateral de Laplace, descompone funciones

generales de dos lados, aquellas definidas en todo el eje de tiempo $-\infty < t < \infty$; la transformada de Fourier no es una nueva transformada, sino un caso especial de la transformada bilateral de Laplace, en el que la parte real de la frecuencia compleja se hace igual a cero. Sin embargo, por lo que se refiere a la interpretación física, la transformada de Fourier puede comprenderse mejor considerándola como un caso límite de serie de Fourier (Nilsson, 2005).

Considerando una función $f(t)$ definida sobre un intervalo infinito, pero que no es periódica y por consiguiente no puede ser representada por series de Fourier, sin embargo, puede ser posible considerar la función como periódica con un periodo infinito y extender el resultado anterior para incluir este caso.

Es una transformación matemática empleada para transformar señales del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia, el cual tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Para transformar funciones del dominio de tiempo $f(t)$ a dominio de frecuencia $F(j\omega)$, la transformada de Fourier está definida como la transformada integral.

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Donde ω es la variable continua de frecuencia, $|F(j\omega)|$ corresponde a la intensidad de la componente sinusoidal en la frecuencia ω .

Para transformar funciones del dominio de frecuencia $F(j\omega)$ al dominio del tiempo $f(t)$, se denomina transformada inversa de Fourier y está definida como la transformada integral (Johnson, 1996).

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

3.3.3. Transformada rápida de Fourier (FFT)

Es un algoritmo para transformar datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, que utilizan los analizadores de redes eléctricas, se involucran muchos cálculos en la transformación de dominios, esta transformación se realiza en instrumentos basados en microprocesador para que los resultados sean lo suficientemente precisos, una representación muestreada puede ser tan cercana a la ideal de cualquier señal medida.

3.4. Fuente de armónicos

Cargas lineales, son aquellas cargas o dispositivos que consumen energía eléctrica, cuya característica de respuesta al ser suministrado con una tensión sinusoidal, es generar una corriente también sinusoidal, esta corriente, puede estar en fase, retrasado o adelantado con respecto a la tensión, dependiendo del tipo de elemento.

En otras palabras, a los bornes del dispositivo consumidor, se aplica directamente la tensión sin modificación alguna, dentro de estas cargas se encuentran las cargas resistivas, condensadores o las cargas inductivas no saturadas, con núcleo magnético.

En la ilustración 6, se aprecia la tensión y corriente sinusoidal, para el elemento inductor.

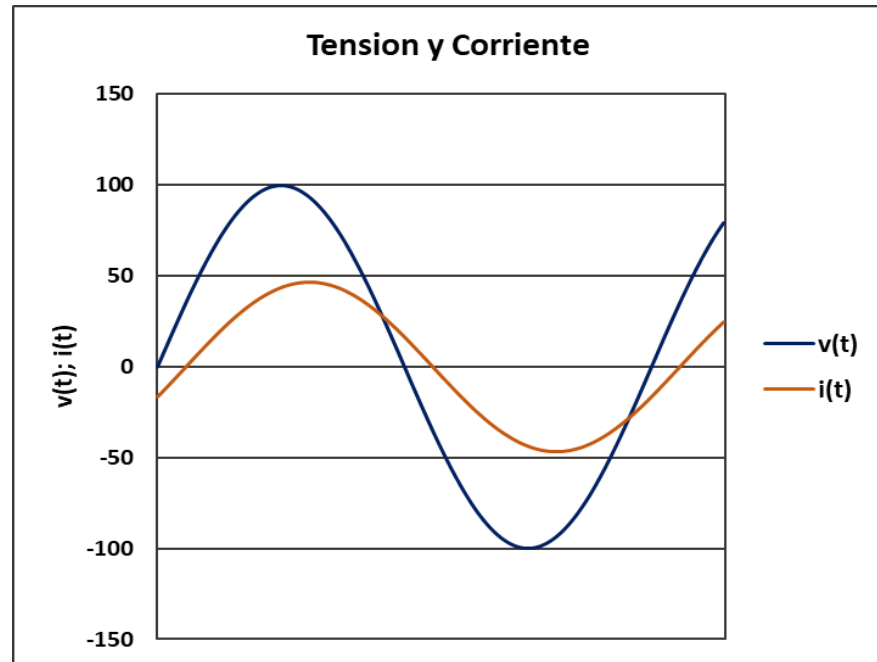


Ilustración 6: Tensión y corriente de una carga lineal

Fuente: Gráfico en Excel

Las cargas no lineales son cargas en las que la forma de onda de la corriente que producen, no se parece a la forma de onda del voltaje sinusoidal aplicado, debido a la intervención de dispositivos electrónicos entre la fuente y la carga, para controlar o regular la potencia hacia la carga, por ejemplo, el uso de interruptores electrónicos que conducen la corriente de carga durante una fracción del período de frecuencia del voltaje.

Entre las cargas no lineales más comunes en los sistemas de energía se encuentran todos los tipos de dispositivos rectificadores como los que se encuentran en los convertidores de energía, fuentes de energía, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), dispositivos de arco como hornos eléctricos y lámparas fluorescentes.

Las cargas no lineales causan una serie de perturbaciones como distorsión de la forma de onda de voltaje, sobrecalentamiento en transformadores y otros dispositivos de potencia, sobre corriente en los cables de conexión neutro del equipo, interferencia telefónica y problemas de control del microprocesador, entre otros.

Una de las cargas no lineales de mayor utilización en las industrias, son los controladores de velocidad de los motores eléctricos, estos equipos realizan la conmutación de la corriente, mediante los dispositivos de potencia como transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), rectificador de silicio controlado (SRC), transistor controlado por compuerta Integrada (IGCT), tiristor simétrico conmutado por compuerta (SGCT), estos controlan el flujo de potencia hacia la carga, cerrando y abriendo como un interruptor de alta frecuencia, como resultado de las conmutaciones, la corriente no sigue la forma de onda del voltaje de la fuente sinusoidal, generándose la distorsión de la corriente y luego también distorsionan la forma sinusoidal de la tensión al interactuar con la impedancia del sistema.

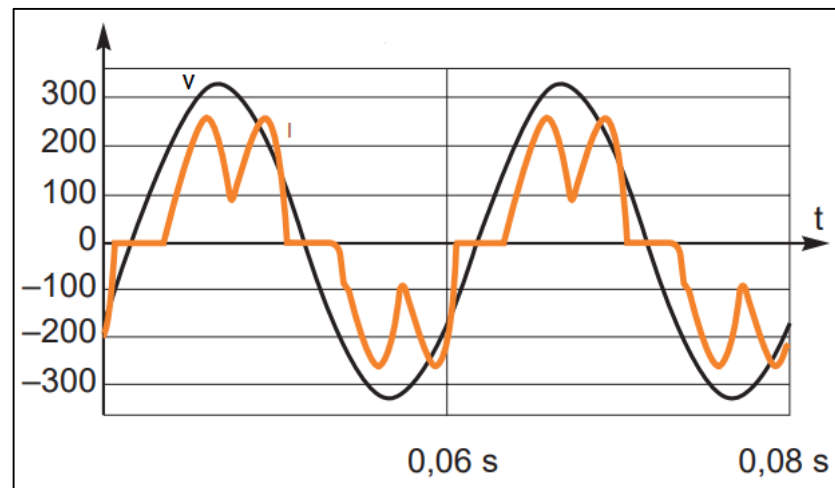


Ilustración 7: Distorsión de la corriente por una carga no lineal

Fuente: Catálogo Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos 2007 Merlín Gerin

Los valores típicos de la corriente armónica generada por estas cargas no lineales pueden ser la quinta armónica de corriente por un variador de seis pulsos con modulación de ancho de pulso (PWM) puede ser mucho mayor que el valor teórico del 20 %, debido a la variación en los puntos de conmutación. Los variadores PWM no solo generan corrientes armónicas excesivas, sino que también pueden inyectar corrientes armónicas triples al sistema.

En algunas condiciones de operación, también los transformadores de potencia pueden actuar de forma no lineal, en situación de saturación del núcleo magnético, que significa que, en ciertos casos, la densidad de flujo magnético (B) en el transformador deja de aumentar o aumenta muy poco a medida que la intensidad de flujo magnético (H) sigue creciendo.

Esto ocurre más allá del llamado codo de saturación, de la curva de magnetización del transformador, se observa el espectro de armónicos generados durante la inserción de un transformador, en la ilustración 8 (Dugan, 2004).

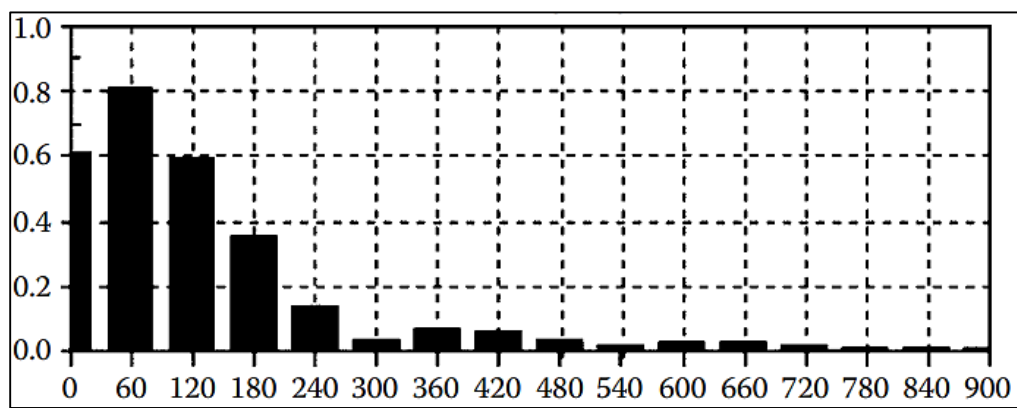


Ilustración 8: Espectro de armónicos de corrientes durante la inserción de transformador 60Hz

Fuente: Libro Electrical Power System Quality 2Ed, Roger C. Dugan

Los armónicos de tensión tienen mucha importancia en un sistema eléctrico, las normas técnicas se basan generalmente en los índices de armónicos de tensión para recomendar los límites aceptables de las distorsiones por armónicos, estos son provocados por el flujo de las corrientes armónicas a través de las impedancias de los circuitos de alimentación, por ejemplo, en la ilustración 9, se muestra un transformador

y sistema de distribución en su conjunto, la impedancia de un conductor aumenta en función de la frecuencia de la corriente que circula por él, para cada armónico de rango h existe, por tanto, una impedancia Z_h del circuito de alimentación.

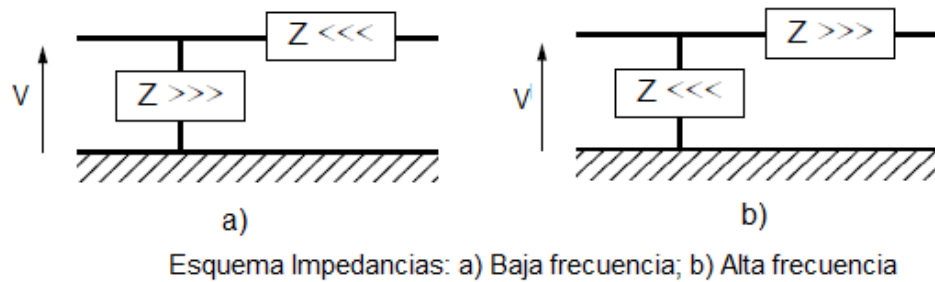


Ilustración 9: Influencia de corrientes armónicas en las impedancias del sistema
(Fuente Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider).

El armónico de rango h en intensidad genera vía la impedancia Z_h una tensión armónica V_h , donde $V_h = Z_h \times I_h$, por aplicación directa de la ley de Ohm.

La tensión en el punto B, por tanto, queda deformada y todos los equipos alimentados aguas abajo del punto B reciben esta tensión deformada. La deformación aumenta en función del nivel de impedancias en el sistema de distribución, para una intensidad armónica dada, esto se observa en la ilustración 10 (Electric).

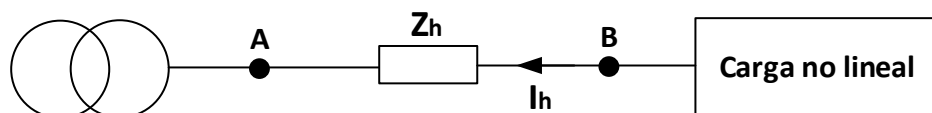


Ilustración 10: Efecto de la impedancia con las corrientes armónicas
Fuente: Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider

Como principales fuentes de armónicos, es posible distinguir según las aplicaciones industriales o domésticos:

3.4.1. Cargas industriales

Equipamientos de electrónica de potencia: variadores de velocidad, rectificadores, inversores.

Cargas que utilizan arco eléctrico: hornos de arco, máquinas de soldar, iluminación (lámparas fluorescentes).

Los arranques de motores con arrancadores electrónicos y la inserción de transformadores de potencia son también generadores de armónicos temporales.

3.4.2. Cargas domésticas

televisores, hornos microondas, placas de inducción, ordenadores, impresoras, lámparas fluorescentes.

La tabla 2, muestra distintos receptores o cargas, que generan los armónicos en diferentes órdenes.

Tabla 2

Armónicos generados por diferentes cargas (Guía de compensación y filtrado de armónicos Schneider)

Tipo de Carga	Armónicos Generados	Comentarios
Transformador	Orden par e Impar	Componente de CC
Motor Asíncrono	Orden impar	Inter y Subarmónicos
Lámpara de Descarga	3º + Impares	Puede llegar a 30 % de I1
Soldadura de Arco	3º	
Hornos de arco CA	Espectro variable inestable	No lineal-Asimétrico
Rectificador con filtro inductivo	$h = k \times p \pm 1$ $I_h = I_1/h$	UPS, Variadores de velocidad
Rectificador con filtro capacitivo	$h = k \times p \pm 1$ $I_h = I_1/h$	Alimentación equipos electrónicos
Ciclo convertidores	Variables	Variadores de velocidad
Reguladores PWM	Variables	UPS-convertidor CC-CA

3.5. Efectos de los armónicos

El desarrollo de la electrónica de potencia y la aplicación de cargas no lineales es creciente alcanza aproximadamente más del 50 % de la demanda eléctrica y gran parte de ese crecimiento, está involucrado el sector industrial, comercial y residencial, es una clara indicación del incremento de generadores de corrientes armónicas en el sistema eléctrico.

Como resultado, un número considerable de consumidores adyacentes, pueden quedar expuestos a los efectos de la distorsión armónica de las cargas industriales, comerciales y residenciales.

El trabajo del análisis de armónicos y su tratamiento, tienen gran importancia, debido a que producen diferentes eventos y daños a los equipos dentro de una instalación eléctrica, según como se observa en la tabla 3.

Tabla 3

Efectos y daños por presencia de armónicos (Cuaderno técnico análisis de armónicos Circutor)

COMPONENTE	PROBLEMA	EFEECTO
Conductor	▪ Aumento de la corriente ▪ Aumento de la resistencia ▪ Aumento de pérdidas térmicas (Efecto Joule) ▪ Efecto "Skin"	▪ Calentamiento de cables ▪ Disparo de protecciones
Conductor de neutro	▪ Circulación de armónicos múltiplos de 3 ▪ Retorno por el conductor de neutro	▪ Sobre intensidad de la corriente circulando por el neutro ▪ Calentamiento en el neutro ▪ Degradación prematura del conductor de neutro ▪ Tensión neutro-tierra ▪ Disparo de protecciones
Condensadores	▪ Resonancia paralela con el sistema ▪ Amplificación de los armónicos	▪ Calentamiento ▪ Envejecimiento prematuro de condensadores ▪ Destrucción de condensadores
Transformadores	▪ Circulación de corrientes armónicas por los devanados	▪ Sobrecalentamiento de los devanados. ▪ Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. ▪ Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) ▪ Disminución del rendimiento. ▪ Sobredimensionado del transformador. ▪ Saturación del transformador (crea mayor distorsión)
Motores	▪ Circulación de corrientes armónicas por los devanados	▪ Sobrecalentamiento de los devanados ▪ Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento

		▪ Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) ▪ Disminución del rendimiento ▪ Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad ▪ Reducción del par
Grupo electrógeno	▪ Sistema blando, con mayor impedancia que la red ▪ Tensión distorsionada	▪ Dificultad de sincronización automática y posterior conmutación
Equipos de medida y control	▪ Medidas no validas ▪ Errores en procesos de control	▪ Error en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda ▪ Saturación de transformadores de medida y/o protección ▪ Valores de magnitudes incorrectas

3.6. Reducción y filtrado de los armónicos

Los impactos de los armónicos en las industrias generan gastos de mantenimiento, aumento del precio de facturación, pérdida de la vida útil de equipos, pérdidas de producción, entre otros, siendo fundamental reducir o atenuar la distorsión armónica.

Por lo tanto, estas soluciones consisten en desde soluciones en cambiar el esquema de la instalación de las cargas no lineales, utilizar transformadores de aislamiento, instalación de inductancias, filtros pasivos y filtros activos, los cuales dependen de un estudio técnico económico.

El modelamiento y simulación del sistema eléctrico, también ayuda a implementar el método óptimo de mitigación de distorsión armónica, es de gran importancia para los usuarios industriales ya que garantizan un sistema eléctrico más confiable, reducen costos de operación, evitan fallas en los equipos y disminuyen la probabilidad de tiempos de parada en el proceso.

Para limitar la propagación de los armónicos en la red, se pueden tomar una serie de medidas, se mencionan de forma resumida:

Reubicar las cargas no lineales hacia aguas arriba en la red, la distorsión armónica total aumenta a medida que la potencia de cortocircuito disminuye, existen

consideraciones económicas, pero es preferible conectar las cargas no lineales lo más posibles aguas arriba de la red eléctrica.

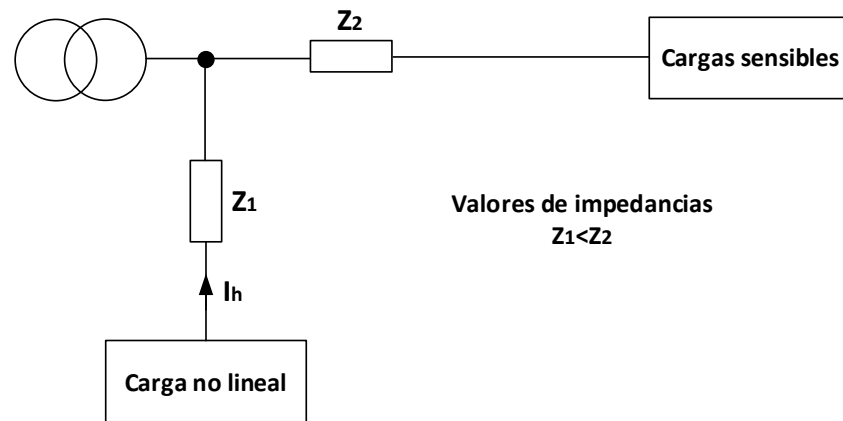


Ilustración 11: Alimentación aguas arriba de la carga no lineal

Fuente: Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider

Agrupando las cargas no lineales, cuando se realiza el diagrama unifilar, se debe separar, en la medida de lo posible, las cargas no lineales de las otras cargas lineales que pueden ser sensibles, en la práctica, se deberían alimentar las cargas no lineales y las cargas lineales, desde diferentes puntos o barras.

Asimismo, agrupando las cargas no lineales, aumenta la posibilidad de recomposición angular, esto debido a que la suma vectorial de las corrientes armónicas es menor que su suma algebraica. También se debe evitar la circulación de corrientes armónicas en los cables, limitando las caídas de tensión y el aumento de temperatura en los cables.

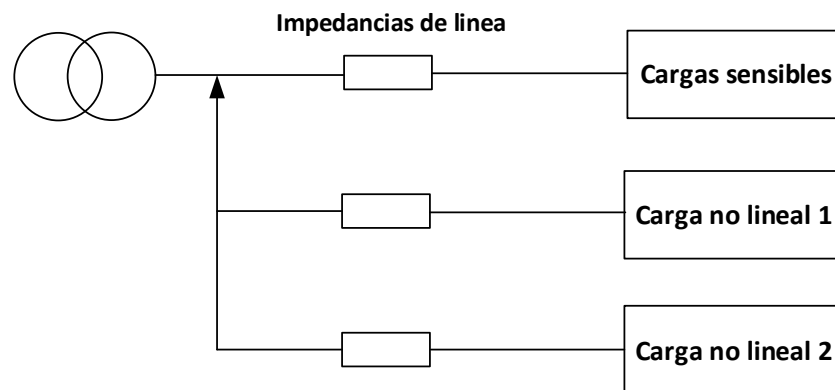


Ilustración 12: Agrupación de cargas no lineales, alimentación de aguas arriba

Fuente: Folleto Detección y Filtrado de Armónicos Schneider

Separar las fuentes de alimentación con transformadores independientes a cargas no lineales, en lidiar contra los armónicos, se obtiene una mejora suplementaria alimentando, el inconveniente de esta solución es el incremento del costo de la instalación.

La utilización de transformadores en conexiones particulares, para eliminar ciertos órdenes de armónicos, se utilizan algunos tipos de conexiones especiales en los transformadores. Los órdenes de armónicos eliminados dependen del tipo de conexión implementada.

- Una conexión delta-estrella-delta elimina los armónicos de orden 5 y 7.
- Una conexión delta-estrella elimina los armónicos de orden 3, los armónicos circulan por cada una de las fases, y retornan por el neutro del transformador.
- Una conexión delta-zigzag elimina los armónicos de orden 5, por retorno en el circuito magnético

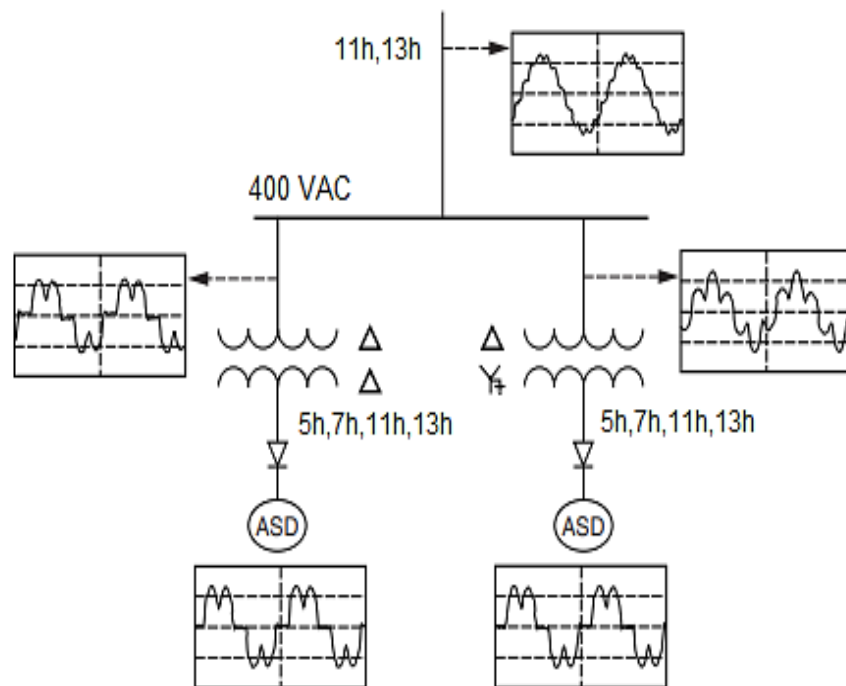


Ilustración 13: Transformadores para reducción de armónicos

Fuente: Libro Electrical Power System Quality 2Ed, Roger C. Dugan

La Instalación de reactor de línea, para alimentación de variadores de velocidad, se atenúan las corrientes con la utilización de reactor de línea, aumentando la impedancia del circuito de alimentación se limita la corriente armónica. La utilización de inductancias antiarmónicos en las baterías de condensadores permite aumentar la impedancia del conjunto bobina y condensador, para los armónicos de frecuencias elevadas (Kusko, 2007).

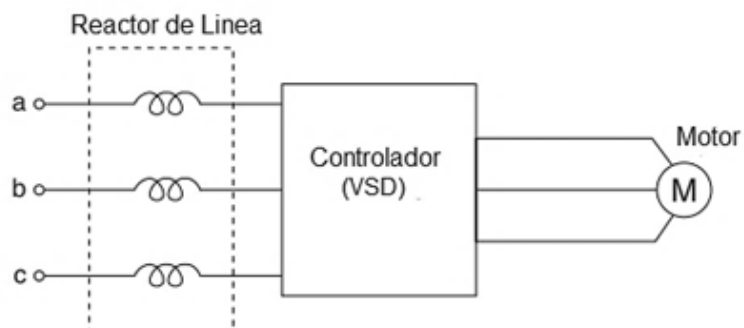


Ilustración 14: Reactor de línea para reducir armónicos

Fuente: Power Quality In Electrical System Alexander Kusko

Filtro pasivo son elementos conocidos como el inductor, capacitor y resistor, al configurarlos adecuadamente, y sintonizarlos para una o banda de frecuencias, reducen los armónicos. Se utilizan comúnmente en las instalaciones eléctricas y son relativamente económicos en comparación con otras formas de eliminar la distorsión armónica.

Sin embargo, tienen una desventaja de influir potencialmente de manera negativa en los sistemas de eléctrico, y es muy importante verificar todas las posibles interacciones con el sistema cuando estos se diseñan.

Desvían las corrientes armónicas de la línea o bloquean su flujo entre partes del sistema, ajustando el elemento para crear una resonancia a una frecuencia sintonizada.

Principio de funcionamiento, un circuito LC sintonizado a cada una de las frecuencias de armónicos a filtrar, en paralelo con el dispositivo generador de armónicos, este circuito de derivación absorbe los armónicos y evita que circulen por la fuente de alimentación.

Los condensadores del filtro, a frecuencia fundamental 60 Hertz inyecta potencia reactiva al sistema para la corrección de factor de potencia, y para la frecuencia sintonizada elimina el armónico correspondiente. El filtro generalmente se puede componer de una o más secciones, los filtros RLC para un solo ajuste de frecuencia armónica es el más utilizado.

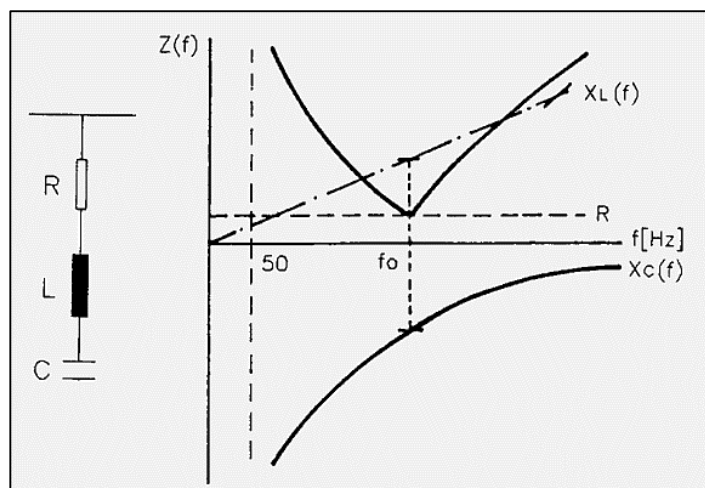


Ilustración 15: filtro L-C sintonizado a la frecuencia de resonancia

Fuente: 5-Armónicos CYDESA

Filtro activo es del tipo de dispositivos relativamente nuevos para eliminar armónicos, están basan en una electrónica de potencia avanzada y tienen un costo más elevado que los filtros pasivos. Sin embargo, tienen la ventaja de no influir con la impedancia del sistema, funcionar independientemente de las características del sistema.

Se utilizan en situaciones difíciles en las que los filtros pasivos no pueden funcionar bien por problemas de resonancia, también los filtros activos tienen otras funcionalidades adicionales, como por ejemplo problemas de calidad de la energía, minimizar los parpadeos, pueden ser útiles para cargas de gran potencia distorsionantes alimentadas desde puntos relativamente débiles del sistema eléctrico.

El funcionamiento se basa en suprimir las ondas sinusoidales múltiplos de la fundamental generados por cargas no lineales, mediante otras ondas similares en magnitud, pero en oposición a la onda distorsionante, la electrónica de potencia de alta precisión mide la corriente o voltaje de carga, controla y fuerza a que la onda de corriente sea sinusoidal, inyectando una corriente en sentido opuesto.

Hay dos enfoques, uno que se utiliza un inductor para almacenar la corriente y que sirve para inyectar en el sistema en el instante apropiado y otro que usa un capacitor para la tensión.

Por lo tanto, mientras que la corriente de carga se distorsiona de acuerdo con lo requerido por la carga no lineal, la corriente en el sistema aguas arriba, es mucho más sinusoidal, los filtros activos también pueden el factor de potencia y los armónicos a la vez.

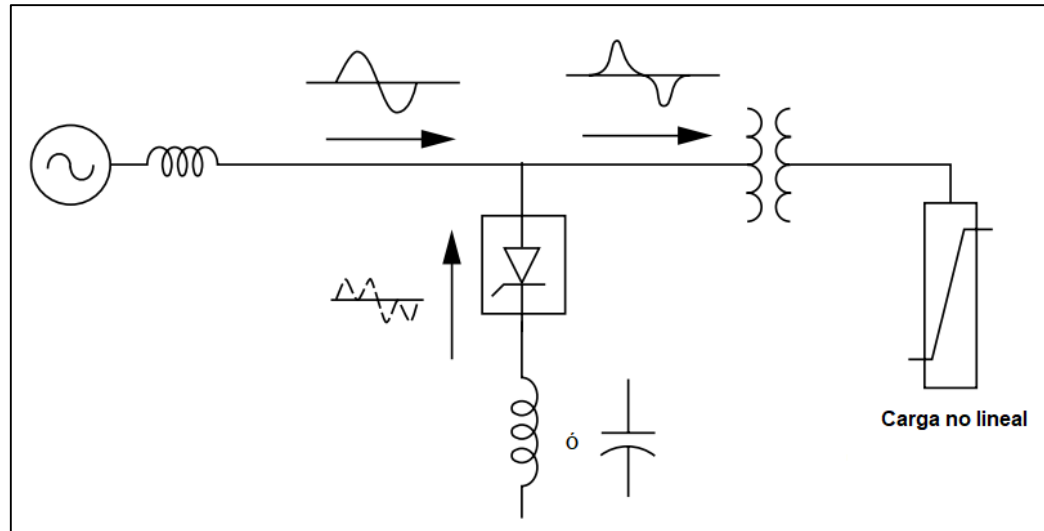


Ilustración 16: Aplicación de filtro activo y carga no lineal

Fuente: Power Quality In Electrical System Alexander Kusko

3.7. Índices generales para distorsión armónica:

Para la identificación la presencia de armónicos en las instalaciones, existen varios indicadores, desde lo muy básico que puede ser el factor de cresta FC midiendo el valor pico y dividiendo con el valor eficaz, V_{pico}/V_{eficaz} , como referencia el FC de una onda pura sinusoidal es 1.41, valores mayores de factor de cresta $FC \geq 1.8$ indican alta distorsión.

Otros indicadores que representan la distorsión son, los armónicos individuales de tensión V_h y corriente I_h , el índice de distorsión total de tensión denominado THDv proporciona información sobre la distorsión total, un valor de THDv inferior al 5 % se considera normal, sin riesgo de mal funcionamiento de los equipos, si el THDv está entre los valores de 5 % y 8 %, indica una distorsión armónica de tensión significativa, que puede reflejar en operaciones anormales de los equipos, un valor de THDv superior al 8 % revela una distorsión alto por armónicos, es probable que puedan operar de forma anormal los equipos, es necesario un análisis minucioso del sistema eléctrico y reducir los armónicos presentes.

El índice de distorsión total de demanda TDD, indica la distorsión de la onda de corriente, para identificar la carga no lineal que genera esta distorsión, se debe realizar mediciones en la entrada y en la salida de los diferentes circuitos, un valor de TDD inferior al 20 % se considera normal, un valor de TDD comprendido entre el

valor de 20 % y el 50 % indica una distorsión armónica alta, existe el riesgo de que aumente la temperatura de algunos componentes, implica el sobredimensionado de los cables y las fuentes, si el TDD tiene un valor superior al 50 % revela una distorsión muy alta y riesgoso, es probable el mal funcionamiento de equipos, es necesario realizar el monitoreo y análisis profundo del sistema y atenuar los armónicos.

La siguiente tabla 4, muestra los índices aplicables para el análisis de armónicos.

Tabla 4

Resumen índice general de armónicos

Resumen de índices generales para armónicos	
Armónico individual de tensión, $h=2,3,4,5,\dots,n$	V_h
Armónico individual de corriente, $h=2,3,4,5,\dots,n$	I_h
La distorsión armónica individual de tensión en porcentaje está definido como el nivel de distorsión individual de orden V_h con respecto a la fundamental V_1 , donde h es el orden de armónico.	$V_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100$
La distorsión armónica individual de corriente en porcentaje está definido como el nivel de distorsión individual de orden I_h con respecto a la fundamental I_1 , donde h es el orden de armónico.	$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100$
El valor eficaz de todo los armónicos de tensión está expresado como la raíz de la suma cuadrática de los componentes individuales mayor que $h>1$ hasta el armónico enésimo $h=n$	$V_h = \sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}$
El valor eficaz de todo los armónicos de corriente está expresado como la raíz de la suma cuadrática de los componentes individuales mayor que $h>1$ hasta el armónico enésimo $h=n$	$I_h = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}$
El valor eficaz de la tensión distorsionada se puede calcular como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de cada armónico.	$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$

El valor eficaz del corriente distorsionado se puede calcular como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de cada armónico.	$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$
La Distorsión Armónica Total de tensión (THD _v), es el valor eficaz de todo los armónicos V _h dividido entre el valor eficaz de la fundamental V ₁ .	$THD_v = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \%$
La Distorsión Armónica Total de corriente (THD _i), es el valor eficaz de todo los armónicos I _h dividido entre el valor eficaz de la fundamental I ₁ .	$THD_i = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \%$
La Distorsión Armónica Total de Demanda (TDD), es el valor eficaz de todo los armónicos I _h dividido entre el valor eficaz de la corriente de carga I _L .	$TDD = \frac{I_h}{I_L} \cdot 100 \%$
La potencia en régimen distorsionado, tanto en tensión y corriente, tiene lugar a una ampliación de la definición de potencias en régimen sinusoidal, donde el término D, define la potencia deformada.	$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

Fuente: Elaboración propia

3.8. Normas de regulación

Existen varias organizaciones internacionales, que trabajan en conjunto con fabricantes de equipos y organizaciones de investigación para elaborar normas que proporcionen las pautas, las prácticas recomendadas y los límites de armónicos.

El objetivo principal de las normas es proporcionar las pautas en común para que todas las partes involucradas trabajen juntas para asegurar que se aplique la compatibilidad entre el equipo de uso final y el sistema. Los estándares más extendidos para el control de armónicos en todo el mundo son la IEEE (Instituto de Ingenieros Electricista y Electrónicos) EE.UU. y IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) de la Unión Europea.

- La IEEE emitió el Estándar 519 que tiene como objetivo proporcionar la práctica recomendada y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica, también implica el compromiso por parte de las empresas eléctricas de verificar que cualquier medida correctiva tomada por los clientes para reducir los armónicos. Para el cumplimiento de esta norma requiere la verificación de

los límites de armónicos en la frontera o punto de acoplamiento, entre las empresas de servicios eléctricos y el cliente, más comúnmente conocida como PCC (2014, 2014).

Tabla 5

Límites de distorsión de Voltaje según IEEE-519

Voltaje de bus V en PCC	Armónicos individuales (%)	Distorsión Armónica Total THD (%)
$V \leq 1.0\text{kV}$	5.0	8.0
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3.0	5.5
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$161\text{kV} < V$	1.0	1.5 ^a
^a Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta 2.0 % de THD, cuando la causa es un terminal HVDC cuyos efectos se habrán atenuado en puntos de la red donde futuros usuarios puedan estar conectados.		

Fuente: Norma técnica: IEEE-519

Tabla 6

Límites de distorsión de corriente para sistemas clasificados de 120 V a 69kV según IEEE-519

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de IL						
Orden armónico individual (armónicos impares) ^{a,b}						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	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
^a Los armónicos pares están limitados al 25 % encima de los límites de armónicos impares. ^b No se permiten distorsiones de corriente que den como resultado un desplazamiento de CC, por ejemplo, convertidores de media onda. ^c Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del Isc/IL real. Dónde: Isc = corriente máxima de cortocircuito en PCC IL = corriente de carga de demanda máxima (componente de frecuencia fundamental) en el PCC en condiciones normales de funcionamiento de carga.						

Fuente: Norma técnica: IEEE-519

- **La Comisión Electrotécnica Internacional, tiene una serie de normas de compatibilidad electromagnética IEC 61000 (IEC-61000, 2002).**

IEC 61000 se publica en partes separadas, de acuerdo con la siguiente estructura:

- Parte 1: General; Consideraciones generales (introducción, principios fundamentales). Definiciones, terminología.
- Parte 2: Medio ambiente; Descripción del entorno Clasificación del entorno Niveles de compatibilidad

- Parte 3: Límites; Límites de emisión Límites de inmunidad (en la medida en que no sean responsabilidad de los comités de producto).
- Parte 4: Técnicas de prueba y medición; Técnicas de medición Técnicas de prueba
- Parte 5: Pautas de instalación y mitigación; Directrices de instalación Métodos y dispositivos de mitigación
- Parte 6: Estándares genéricos
- Parte 9: Varios

Cada parte se subdivide en varias partes, publicadas como Normas Internacionales o como especificaciones o informes técnicos, algunas de las cuales ya se han publicado como secciones. Otro se publicará con el número de pieza seguido de un guion y un segundo número que identifica la subdivisión (ejemplo: 61000-6-1).

Estas publicaciones se publicarán en orden cronológico y numeradas en consecuencia. Para el caso de armónicos, especialmente los estándares aplicables son:

- **IEC-61000-2-2**

Esta norma define los límites de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y las señales en sistemas de alimentación públicos de baja tensión. Los fenómenos de perturbación incluyen los armónicos, los interarmónicos, las fluctuaciones de tensión, las caídas de tensión y las interrupciones breves, los desequilibrios de tensión, etc. Básicamente, esta norma define los criterios de diseño para el fabricante del equipo, y establece los requisitos mínimos de inmunidad del equipo. IEC1000-2-2, se uniformiza a los límites definidos en la norma EN50160 para la calidad de tensión que el propietario de la utilidad debe proporcionar en los terminales de alimentación del cliente.

- **IEC-61000-2-4**

Niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia IEC1000-2-4 es similar a IEC1000-2-2, pero proporciona niveles de compatibilidad para redes industriales y de tipo no público. Cubre las redes de baja tensión, así como las alimentaciones de tensión media,

excluyendo las redes para barcos, aviones, plataformas marinas y vías de ferrocarril.

- **IEC-61000-3-2**

Límites para las emisiones de intensidad de armónicos (intensidad del equipo ≤ 16 A por fase). Esta norma se centra en los límites de emisión de intensidad de armónicos del equipo individual conectado a las redes públicas.

- **IEC-61000-3-4**

Límites de emisión de corrientes armónicas en redes de baja tensión para unidades con corrientes nominales superiores a 16A.

- **IEC-61000-3-12**

Límites de corrientes armónicas producidas por unidades conectadas a redes públicas de baja tensión con corriente de entrada > 16 A y ≤ 75 A por fase.

Por otra parte, la norma **EN 50160** se refiere a las características de la tensión entregada por las redes públicas de distribución.

- **IEC-61000-4-30**

La norma IEC 61000-4 define los métodos para medir e interpretar los resultados, para parámetros de calidad de energía en corriente alterna, sistemas de suministro de energía de 50 Hz o 60 Hz.

Los métodos de medición se describen para cada parámetro y dan confiabilidad a los resultados repetibles, independientemente de la implementación del método.

La medición de los parámetros cubiertos por esta norma está limitada a fenómenos conducidos en sistemas eléctricos. Los parámetros de calidad de potencia considerados en esta norma son frecuencia, magnitud del voltaje de suministro, parpadeo, caídas y aumentos de voltaje de suministro, interrupciones de voltaje, voltajes transitorios, desequilibrio de voltaje de suministro, armónicos e interarmónicos de voltaje, señalización de la red en el voltaje de suministro, cambios rápidos de voltaje y mediciones de corriente.

- **Clases de entorno electromagnético**

Se pueden definir varias clases de entorno electromagnético, por simplicidad solo se consideran y definen tres en esta norma, como sigue.

- a) **Clase 1** Esta clase se aplica a suministros protegidos y tiene niveles de compatibilidad inferiores a los de las redes públicas. Se relaciona con el uso de equipos muy sensibles a perturbaciones en el suministro de energía, por ejemplo, instrumentación eléctrica en laboratorios, algunos equipos de automatización y protección, algunos ordenadores, etc.
- b) **Clase 2** Esta clase se aplica generalmente a los PCC (Punto Común de Conexión) y a los IPC (Punto de Conexión en Planta) en los entornos de fuentes de alimentación industriales y otras fuentes de alimentación no públicas. Los niveles de compatibilidad de esta clase son generalmente idénticos a los de las redes públicas. Por lo tanto, los componentes diseñados para el suministro de redes públicas se pueden utilizar en esta clase de entorno industrial.
- c) **Clase 3** Esta clase se aplica solo a los IPC en entornos industriales. Tiene niveles de compatibilidad superiores a los de la clase 2 para algunos fenómenos perturbadores. Por ejemplo, esta clase debe considerarse cuando se cumple alguna de las siguientes condiciones:
 - ✓ La mayor parte de la carga se alimenta a través de convertidores.
 - ✓ Hay máquinas de soldar.
 - ✓ Los motores grandes se ponen en marcha con frecuencia.
 - ✓ Las cargas varían rápidamente.

La clase aplicable a plantas nuevas y ampliaciones de plantas existentes no puede determinarse a priori y debe relacionarse con el tipo de equipo y proceso en consideración.

Tabla 7

Componentes de tensión armónica Armónicos impares no múltiplos de tres IEC-61000-2-4

Orden h	Clase 1 V_h (%)	Clase 2 V_h (%)	Clase 3 V_h (%)
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3.5	5
13	3	3	4.5
17	2	2	4
$17 < h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$0.27 \times (17/h) - 0.27$	$4.5 \times (17/h) - 0.5$
NOTA En algunos casos en los que parte de una red industrial está dedicada a grandes cargas no lineales, los niveles de compatibilidad de clase 3 para esa parte de la red pueden ser 1,2 veces los valores anteriores. En tales casos, se deben tomar precauciones con respecto a la inmunidad del equipo conectado. Sin embargo, en el PCC (red pública) tienen prioridad los niveles de compatibilidad de IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12.			

Fuente: Norma técnica IEC-61000-2-4

Tabla 8

Componentes de armónico de voltaje impares múltiplo de tres IEC-61000-2-4

Orden h	Clase 1 V_h (%)	Clase 2 V_h (%)	Clase 3 V_h (%)
3	3	5	6
9	1.5	1.5	2.5
15	0.3	0.4	2
21	0.2	0.3	1.75
$21 < h \leq 45$	0.2	0.2	1
NOTA 1 Estos niveles se aplican a los armónicos de secuencia cero. NOTA 2 En algunos casos en los que parte de una red industrial está dedicada a grandes cargas no lineales, los niveles de compatibilidad de clase 3 para esa parte de la red pueden ser 1,2 veces los valores anteriores. En tales casos, se deben tomar precauciones con respecto a la inmunidad del equipo conectado. Sin embargo, en el PCC (red pública) tienen prioridad los niveles de compatibilidad de IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12.			

Fuente: Norma técnica IEC-61000-2-4

Tabla 9

Componentes de armónico de voltaje pares IEC-61000-2-4

Orden h	Clase 1 V_h (%)	Clase 2 V_h (%)	Clase 3 V_h (%)
2	2	2	3
4	1	1	1.5
6	0.5	0.5	1
8	0.5	0.5	1
10	0.5	0.5	1
$10 < h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$	1
NOTA En algunos casos en los que parte de una red industrial está dedicada a grandes cargas no lineales, los niveles de compatibilidad de clase 3 para esa parte de la red pueden ser 1,2 veces los valores anteriores. En tales casos, se deben tomar precauciones con respecto a la inmunidad del equipo conectado. Sin embargo, en el PCC (red pública) tienen prioridad los niveles de compatibilidad de IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12.			

Fuente: Norma técnica IEC-61000-2-4)

Tabla 10

Niveles de compatibilidad para distorsión armónica total IEC-61000-2-4

	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Distorsión Armónica Total (THD)	5 %	8 %	10 %
NOTA En algunos casos en los que parte de una red industrial está dedicada a grandes cargas no lineales, los niveles de compatibilidad de clase 3 para esa parte de la red pueden ser 1,2 veces los valores anteriores. En tales casos, se deben tomar precauciones con respecto a la inmunidad del equipo conectado. Sin embargo, en el PCC (red pública) tienen prioridad los niveles de compatibilidad de IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12.			

Fuente: Norma técnica IEC-61000-2-4

- La NORMA TÉCNICA PERUANA DE CALIDAD Y SERVICIO ELÉCTRICO (NTCSE) (Peru, 2010)

Tabla 11

Norma técnica peruana de calidad y servicio eléctrico

Orden(n) Armónico y THD	TOLERANCIA Vi THDv (% con respecto a la tensión nominal del punto de medición)	
	Alta y muy alta tensión	Media y baja tensión
(Armónicos impares no múltiplos de 3)		
3)	2.0	6.0
5	2.0	5.0
7	1.5	3.5
11	1.5	3.0
13	1.0	2.0
17	1.0	1.5
19	0.7	1.5
23	0.7	1.5
25	0.1+2.5/n	0.1+12.5/n
Mayores de 25		
(Armónicos 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 25	0.2	0.2
(Armónicos 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
Distorsión Armónica Total (THD)	3	8

Fuente: Norma técnica de calidad y servicio eléctrico NTCSE

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD PROFESIONAL

4.1. Metodología para el análisis de armónicos

Un sistema eléctrico con altos niveles de distorsión armónica de corriente, causan la distorsión de la onda sinusoidal de la tensión, esta distorsión afecta a la operación normal de los equipos adyacentes conectados a la misma red eléctrica, las falla comunes que pueden presentar son, disparo de las protecciones, calentamiento de cables de energía, calentamiento de máquinas rotativas, reducción de vida útil de máquinas, resonancia en el sistema, perdidas de energía en general, fallas en equipos electrónicos, etc.

Desde un punto de vista de confiabilidad, un sistema eléctrico debe suministrar siempre la potencia que se requiere, con niveles de tensión y frecuencia nominal estable con márgenes de variación aceptable, sin interrupciones que afecten la producción, es por ello el interés en analizar periódicamente la calidad de la energía dentro de las instalaciones eléctricas.

Este capítulo está enfocado en desarrollar el análisis y monitoreo de distorsión armónica de las señales de tensión y corriente en una planta industrial de baja potencia, está basada en mediciones puntuales de los armónicos, procesamiento de los datos capturados, hallar los índices generales de los armónicos, realizar un cuadro comparativo con las recomendaciones de las normas técnicas y finalmente emitir las recomendaciones y alternativas de solución para mitigar los armónicos en los puntos o tableros de baja tensión con mayor distorsión.

En la Ilustración 17, presenta cada una de las etapas para realizar el diagnóstico de distorsión armónica y posteriormente se presentará una descripción de cada etapa de esta metodología.

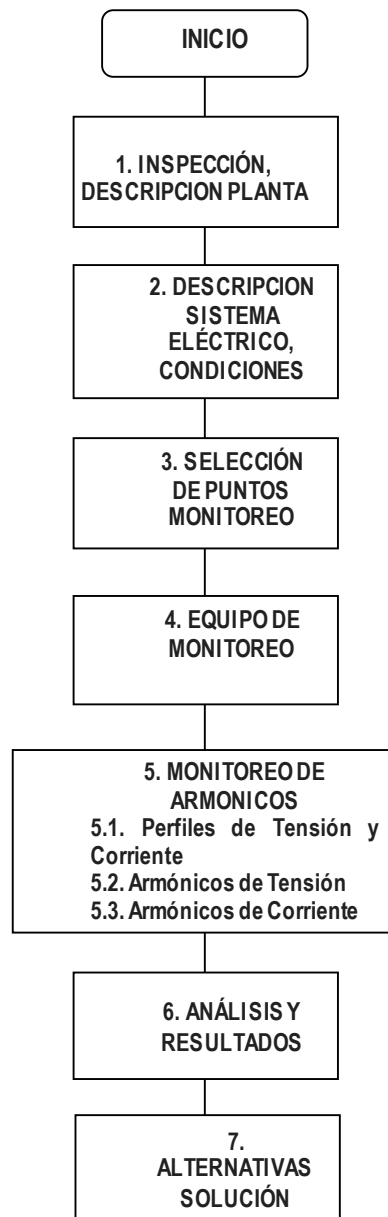


Ilustración 17: Etapas para el análisis de armónicos

4.1.1. Inspección de planta

Para el análisis de armónicos, se realizó una inspección a la planta Graphics de la empresa Laboratorios Portugal SRL, ubicado en el Parque Industrial Rio Seco, 1° Etapa, Manzana A, Lote 2, Distrito de Cerro Colorado, Provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, es una industria enfocada a la fabricación de envolturas, cajas, para los productos químicos de diferentes líneas de producción.

Como cargas no lineales, la Planta de Portugal Graphics para la producción de envolturas, cuenta con máquinas impresoras offset, cortadoras, los cuales están basados en electrónica de potencia y control, como variadores de velocidad para motores de corriente alterna y continua, sistemas de control automático, este análisis se realiza por requerimiento del cliente, para identificar los armónicos que generan sus cargas no lineales instalados en la planta, mediante el monitoreo y análisis de los armónicos.

En un sistema eléctrico de una planta industrial, más del 80 % de los armónicos son generados por los equipos no lineales instalados, los cuales al propagarse dentro de la red eléctrica, pueden causar daños a los equipos sensibles y conectados a la misma red, existen varios métodos de mitigar los armónicos, desde la reubicación y aislamiento de las cargas no lineales, instalando transformadores de aislamiento, mediante la cancelación por tipos de conexión de transformadores, utilizando filtros pasivos sintonizados y filtros activos.

4.1.2. Descripción sistema eléctrico

El sistema eléctrico de la planta, cuenta con subestación principal, en el cual está instalado un transformador de distribución de 1.0 MVA, grupo de conexión Dyn5-Yyn6, relación de transformación de 10-22kV/0.4-0.231kV, el lado de media tensión está conectado mediante un seccionador fusible, el sistema de distribución o esquema utilizado es TT, la distribución de la energía a la planta y oficinas es en baja tensión 400-230 VAC, se realiza mediante el tablero de distribución TP-I ubicado en la subestación principal y en el interior de planta están

ubicados los subtableros de distribución de alimentación hacia las cargas, el diagrama unifilar se muestra en la Ilustración 18.



Ilustración 18: Transformador de distribución 1MVA

Fuente: Laboratorios Portugal

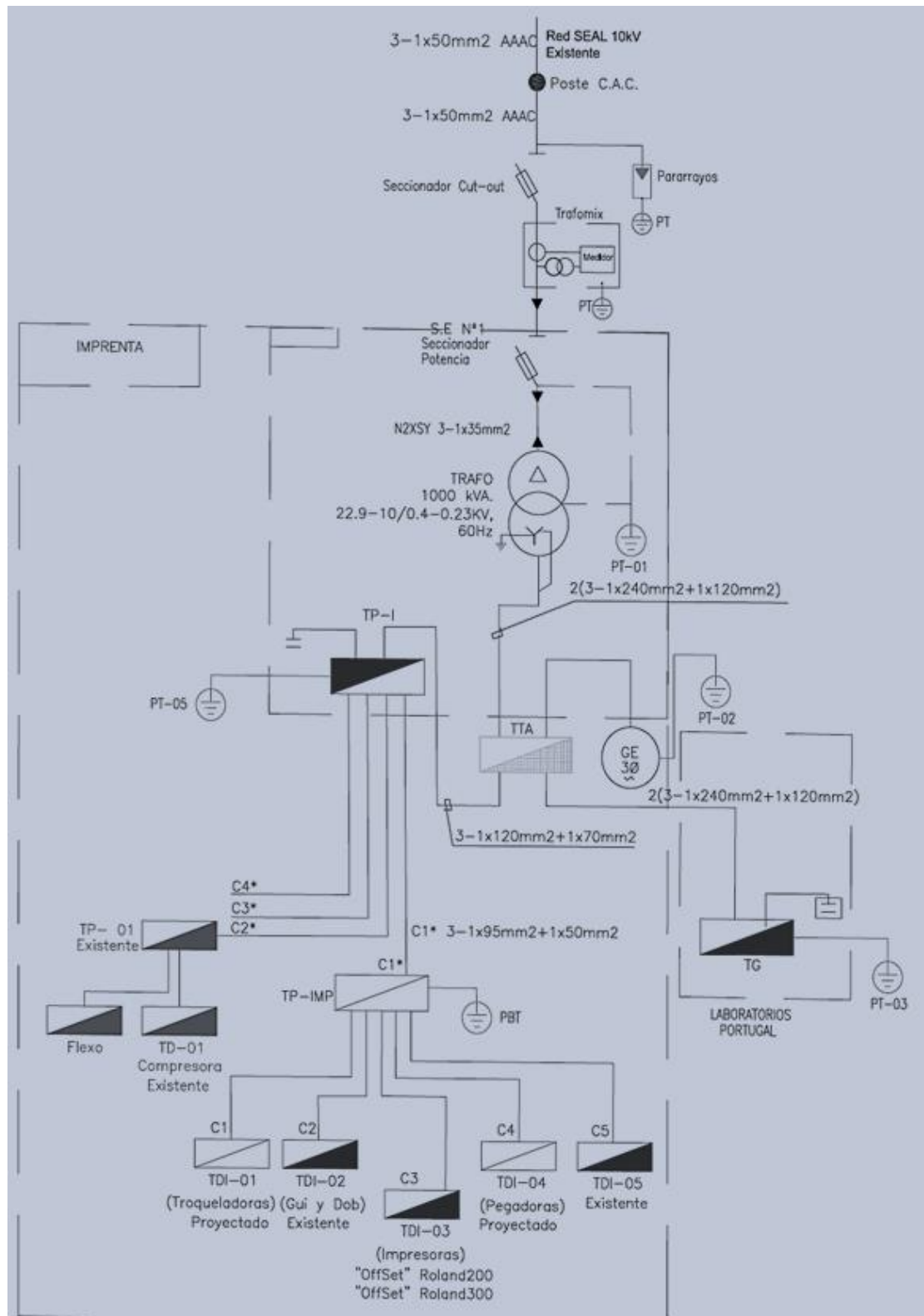


Ilustración 19: Esquema Eléctrico Planta Graphics

Fuente: Laboratorios Portugal

- Condición de operación

La operación de esta planta Graphics de Laboratorios Portugal, es básicamente constante los 7 días de la semana, el equipamiento que cuenta son impresoras de mediana dimensión, basados en electrónica de potencia, sistemas de control electrónico, variadores de velocidad, motores eléctricos AC y DC, otros equipos electrónicos de pequeña potencia. En la siguiente Ilustración 20 se observa una visión general de los equipos que cuenta instalado esta planta.



Ilustración 20: Vista general planta Graphics

Fuente: Laboratorios Portugal

4.1.3. Selección de puntos de monitoreo

La selección de los puntos de medición se basó en la información suministrada por el cliente empresa Laboratorios Portugal SRL (diagrama unifilar, cargas y mediciones previas), los criterios de selección presentados se basaron en la influencia de los armónicos a fallas de equipos, y la presencia de cargas no lineales en los puntos de monitoreo de planta.

Las mediciones en cada punto se realizaron aproximadamente en 2 horas con intervalos de grabación de 1 segundo, teniendo como referencia la hora de operación de las cargas no lineales, esto en coordinación con el personal técnico

del cliente. En la Tabla 12, presenta los puntos de monitoreo y ubicación, se trabajó de forma secuencial como se aprecia.

Tabla 12

Puntos de Monitoreo

ITEM	UBICACIÓN	TAG	TENSION (V)
1	Tablero Principal SE-01	TP-I (SE-01 10kV- 0.4kV)	400
2	Tablero Distribución Planta Graphics	TP-IPM TD-03	400
3	Tablero Distribución Patio	TD-01	400
4	Tablero Distribución Planta Graphics	TD-07	400

Fuente: Elaboración propia basada en los tableros del Laboratorio Portugal

▪ **Cronograma:**

Tabla 13

Cronograma para la medición de armónicos

DESCRIPCION	FECHA: 12/07/2021		FECHA: 13/07/2021		ARCHIVOS NATIVOS
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
Inspección Recopilación de Información Planta	8:15hrs	9:30hrs			
Monitoreo Tablero TP-I (S.E.)	10:10hrs	13:53hrs			Archivo: MEAS 136
Monitoreo Tablero TP-IPM (TD-03)			9:21hrs	11:23hrs	Archivo: MEAS 144
Monitoreo Tablero TD-01			12:22hrs	14:31hrs	Archivo: MEAS 154
Monitoreo Tablero TD-07			15:19hrs	16:52hrs	Archivo: MEAS 156

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Equipo de monitoreo (Procedimiento de Instalación y Configuración)

Para la medición de los armónicos, se utiliza el analizador de energía y calidad de potencia trifásica, marca Fluke de la serie 435 II, herramienta ideal para

el registro de armónicos, conforme con la clase A, el modelo 435 II es compatibles con la nueva norma IEC 61000-4-30 edición 2 de clase A.

El analizador tiene las siguientes características:

- Calculadora de pérdida de energía, medición de energía activa y reactiva, desequilibrio y potencia de armónicos son cuantificar, localizar perdidas de energía en el sistema.
- Eficiencia del inversor de potencia, mide simultáneamente la potencia de salida CA y la potencia de entrada CC para sistemas electrónicos de potencia usando las pinzas de corriente continua.
- Captura de datos PowerWave, captura rápidamente datos RMS, muestran medios ciclos y formas de onda para caracterizar las dinámicas de los sistemas eléctricos.
- Captura de forma de onda, captura 100/120 ciclos (50/60 Hz) de cada evento que se detecta en todos los modos.
- Modo automático de transitorios, captura datos de formas de onda de 200 kHz en todas las fases simultáneamente hasta 6kV.
- Señalización de la red eléctrica, mide interferencias causadas por señales de control de cargas a frecuencias específicas.
- La clasificación de seguridad más alta de la industria, 600V CATIV/1000V CAT III.
- Mide las tres fases y el neutro, con cuatro puntas de prueba de corriente flexibles incluidas con un diseño mejorado, delgado para adaptarse a los lugares más estrechos.
- Tendencia automática, cada medición se registra siempre automáticamente, sin necesidad de configuración alguna.
- Monitor del sistema, mide parámetros de calidad de potencia en una sola pantalla, de acuerdo con la norma de calidad de potencia eléctrica EN50160.
- Función de registrador, configuración adaptable para pruebas con memoria hasta 600 parámetros a intervalos definidos por el usuario.
- Visualización de gráficos y generación de informes, con el software de análisis incluido Power Log.

- Desequilibrio, mide desequilibrios, relaciones de fase entre tensiones y corrientes. Los resultados de medida se basan en el componente de frecuencia fundamental (60 Hz, 50 Hz) utilizando el método de componentes simétricos.
- Armónicos, mide y registra armónicos e interarmónicos hasta el orden 50. Se miden los datos relacionados, como componentes de CC, THD (distorsión total por armónicos) y factor K. Los armónicos son distorsiones periódicas de las ondas sinusoidales de potencia, corriente o tensión. Los resultados se visualizan en una pantalla de gráfico de barras, una pantalla de multímetro o una pantalla de tendencias.

Tabla 14

Características analizador de Redes

ANALIZADOR DE CALIDAD DE POTENCIA ELECTRICA FLUKE 430 SERIE-II BASADO EN NORMA IEC-61000-4-30 CLASE-A	
MODO DE OPERACIÓN	DESCRIPCION
Osciloscopio y Vectores (Osciloscopio)	Muestrea tensiones y corrientes del sistema, mediante formas de onda o un diagrama de vectores. Sirve para verificar la correcta conexión del analizador.
Voltios, Amperios, Hz	Muestrea como un multímetro valores RMS numéricos, parámetros relevantes, tendencias, frecuencia, factor de cresta $FC=1.41$ normal y $FC>1.8$ alta distorsión.
Fluctuaciones (Caídas y subidas)	El modo fluctuaciones (Caídas y Subidas), se utiliza para registrar cambios de tensión repentinos incluso de medio ciclo. El analizador permite seleccionar la tensión nominal o variación gradual de referencia.
Armónicos	Modo Armónicos sirve para comprobar la existencia de armónicos de tensión y corriente, registra tendencias de armónicos en intervalos de tiempo, hasta h50 e interarmónicos.
Potencia y Energía	Modo para registrar los parámetros de potencia y energía, tendencias, muestra los cambios y eventos durante un periodo de tiempo, calcula potencia fundamental y total a valores RMS.
Calculadora de Pérdida de Energía	Permite determinar dónde se producen pérdidas de energía y visualizar su influencia en la facturación de electricidad.
Eficiencia de Inversor de Potencia	Mide la eficiencia y la cantidad de energía que proporcionan inversores que convierten CC monofásica en CA monofásica o trifásica.
Desequilibrio	Utilice el modo osciloscopio o desequilibrio para investigar los desbalances de la tensión de cada fase no debe diferir más de 1 % de la media de las tres, de corriente no debe superar a 10 %.
Corrientes de arranque	Capturas corrientes transitorias (Inserción), que se producen con cargas grandes o de baja impedancia, como motores y otros.
Monitor (Calidad de Energía Eléctrica)	Este modo, supervisa la calidad de energía eléctrica muestra una pantalla de gráfico de barras, permite comprobar si los parámetros básicos de calidad eléctrica se ajustan a los requisitos de las normas técnicas.
Parpadeo	El modo Parpadeo, sirve para comprobar parpadeos de tensión a corto y largo plazo y los datos relacionados por fase, registra tendencia de valores en un intervalo de tiempo, se basa en un modelo perceptivo del sistema sensorial del cerebro y el ojo humano.
Transitorios	Captura formas de onda a alta resolución durante diversas perturbaciones, el analizador ofrece una instantánea de las formas de onda de tensión y corriente en el instante preciso de la perturbación. Esto le permitirá ver las formas de onda durante las bajadas, subidas, interrupciones, transitorios y bajadas de corriente. La velocidad de muestreo es de 200 kS/s.
Onda de Potencia	El analizador funciona como una grabadora tipo osciloscopio de 8 canales de alta resolución. En general, la manera más eficiente de solucionar problemas en sistemas eléctricos consiste en comenzar a analizar en la carga y avanzar hacia aguas arriba.
Transmisión de señales	En el modo Transmisión de señales, puede capturar las señales de control con 2 frecuencias diferentes, frecuencias de 70 a 3000

	Hz para sistemas de 60 Hz y de 60 a 2500 Hz para sistemas de 50 Hz.
Registrador (Logger)	Permite almacenar varias lecturas de alta resolución en la memoria, seleccionar las lecturas y registrarlas en un máximo de 150 parámetros, se define el ajuste o la lectura de parámetros de forma personalizada.

Fuente: Manual del analizador

▪ Procedimiento y configuración para monitoreo

El equipo analizador de calidad de energía Fluke 435-II, cuenta con muchas funciones de medición como se indica en la ilustración 22, para este caso específico se utilizó el menú de armónicos, una configuración adecuada permitirá registrar los datos correctos y obtener un buen análisis de los armónicos.

Se inicia en la pantalla de configuración, Ingresando la fecha y hora, frecuencia y tensión nominal, luego la topología de la red eléctrica es muy importante ya que en base a esta información se instalaran las sondas de corriente y tensión, también las relaciones de transformación si la medición es directa o por medio de transformador de corriente o tensión, hay que tener presente que para la topología 3Fases WYE estrella se configura teniendo en cuenta la tensión de fase y para una configuración DELTA se configura teniendo en cuenta la tensión línea, para este caso específico, como las mediciones son directas, la sonda de corriente utilizado es el i430TF de 600 amperios y las tensiones también directas a 400 VAC, la configuración de limites esta predefinido en el instrumento con la norma europea EN50160 de calidad de energía eléctrica (Corporation, 2012).

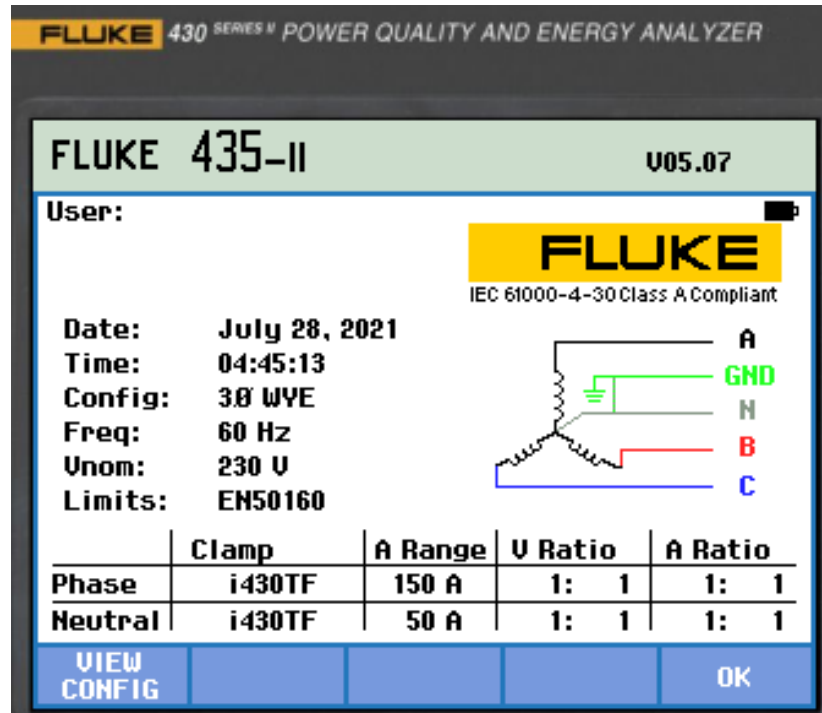


Ilustración 21: Pantalla de configuración Analizador Redes

Fuente: Manual del analizador de Redes

Antes de iniciar las mediciones, verificar si las conexiones las sondas de corriente y las conexiones de las puntas de prueba de tensión están conectados correctamente, para ello se verifica en la pantalla de osciloscopio y vectores, las tensiones deben estar desfasadas en 120 grados y seguidamente las corrientes, los vectores de tensión de fase y las de corriente A(L1), B(L2) y C(L3) deben aparecer en secuencia al observarlas en el sentido de las agujas del reloj como se muestra en la ilustración 23 a continuación.

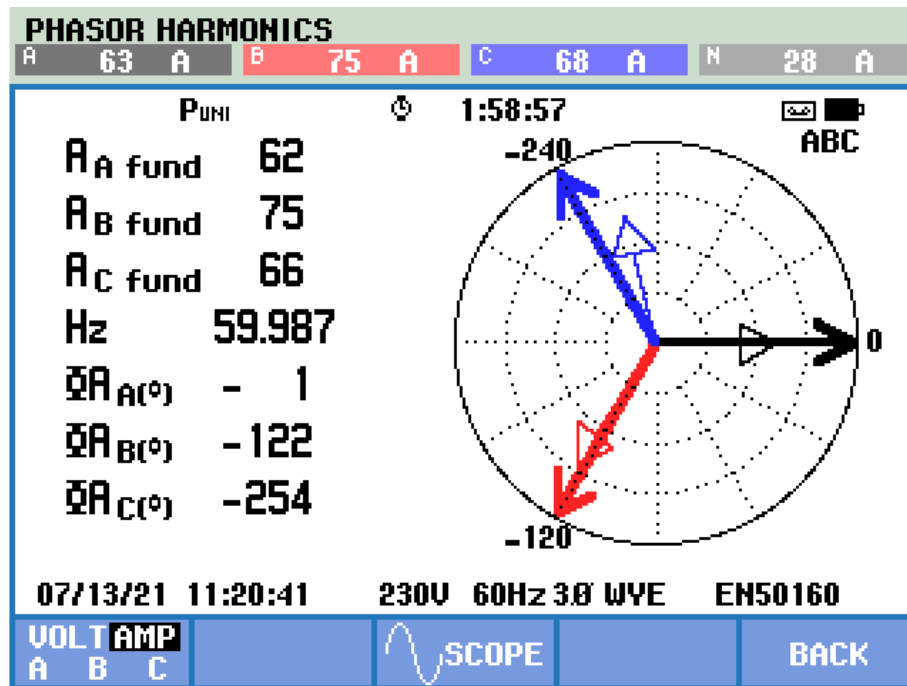


Ilustración 22: Diagrama Fasorial

Fuente: Manual del analizador de Redes

4.1.5. Descripción de puntos de monitoreo de tableros de planta

El monitoreo que se realizó los días 12-07-2021 y 13-07-2021, utilizando el analizador en modo armónicos Fluke 425-II, con certificado vigente de calibración, el monitoreo se basó en la medición de los espectros de los armónicos de tensión y corriente.

Para el análisis de datos se toma en cuenta los límites de armónicos recomendados de tensión norma técnica peruana NTCSE y para los armónicos recomendados de corriente se toma en cuenta la norma Americana IEEE-519, esto debido a que la norma NTCSE no da mayor detalle sobre los armónicos de corriente, por lo cual se toma como referencia la norma internacional IEEE-519.

4.1.6. Monitoreo tablero de distribución TP-I subestación principal

Perfiles de tensión y corriente se consideran también constantes, teniendo en cuenta que el turno en la planta es de 24 horas por los 7 días de la semana, se

asume que la planta tiene una potencia activa promedio de 120kW, el transformador de distribución tiene una carga del 12 % de la potencia nominal.

Los perfiles de tensión y corriente se pueden apreciar en las ilustraciones 24 y 25, respectivamente.

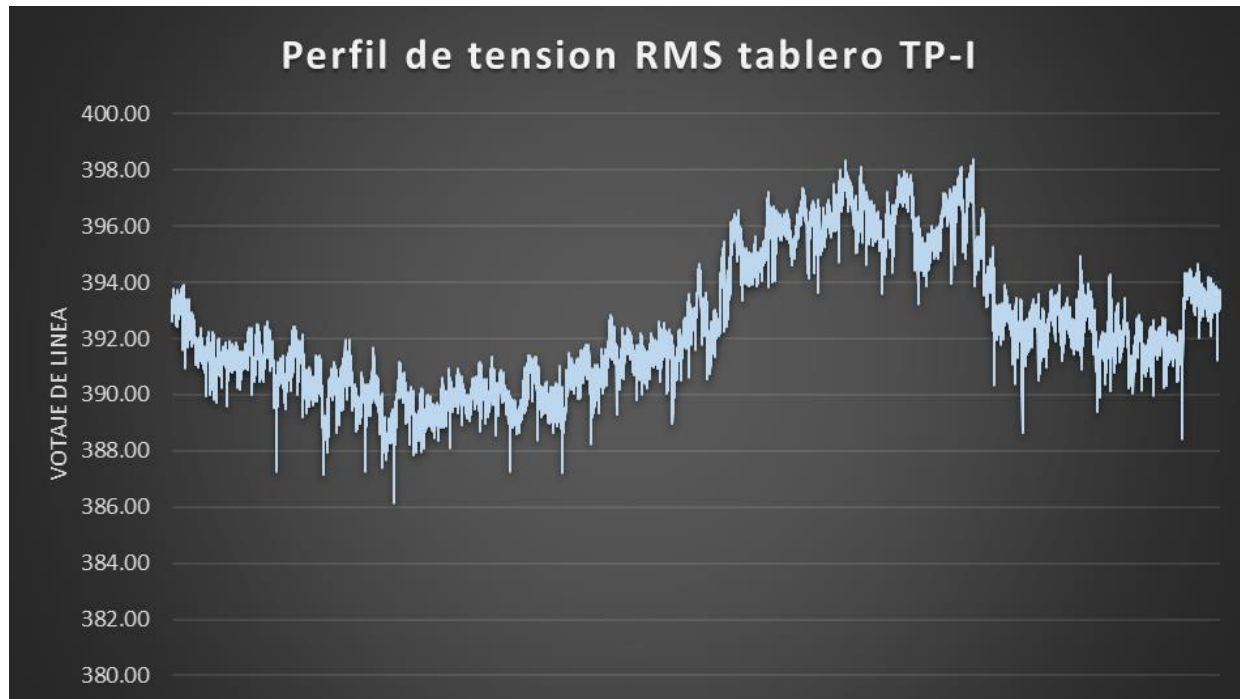


Ilustración 23: Perfil de Tensión RMS TP-I

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

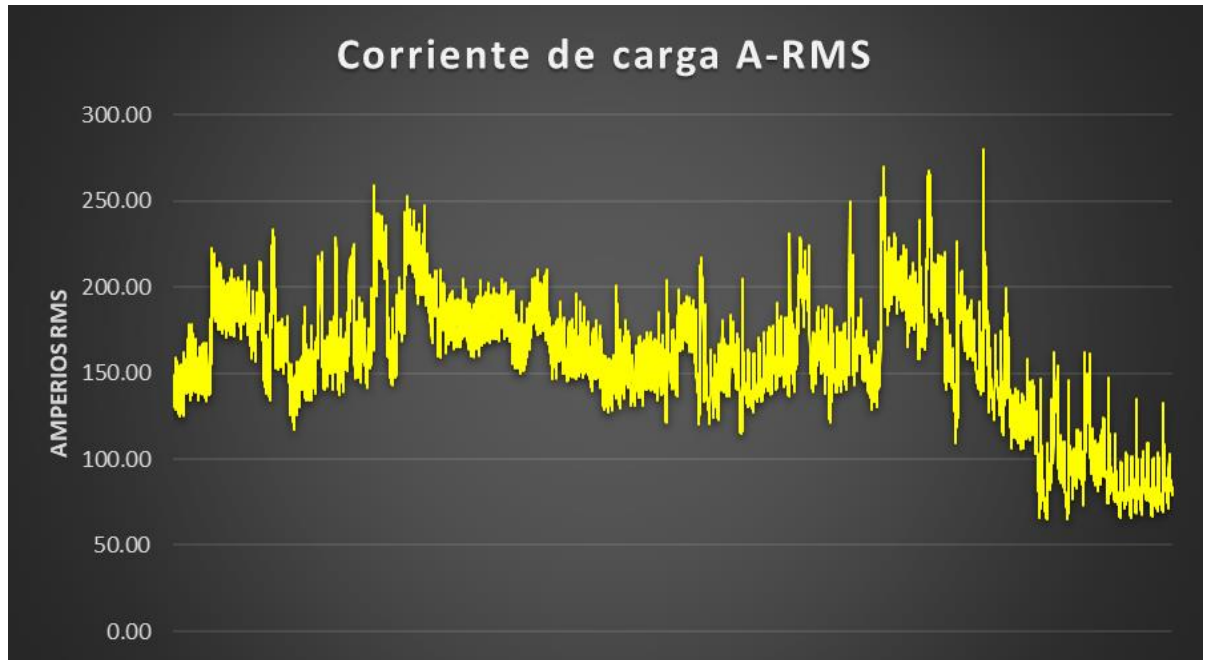


Ilustración 24: Corriente de Carga RMS

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

▪ Monitoreo armónicos de tensión

Los armónicos de tensión, son uno de los principales índices a tener en cuenta en el análisis de armónicos, al aplicar una tensión sinusoidal a una carga no lineal, la corriente resultante no es perfectamente sinusoidal, en presencia de la impedancia del sistema, esta corriente causa una caída de tensión no sinusoidal, produciendo una distorsión de la onda de tensión en los bornes de la carga, es decir tiene contenido de armónicos, este efecto puede ser nocivo, causar daños en las instalaciones eléctricas, para este caso de análisis, se muestran el registro de datos del tablero general de distribución TP-I, ubicado en la subestación principal.

Los armónicos de tensión Individuales (V_h), en tablero de distribución TP-I, para los armónicos se muestran desde el orden 2 al 31, donde la corriente de la carga promedio es 180 Amperios.

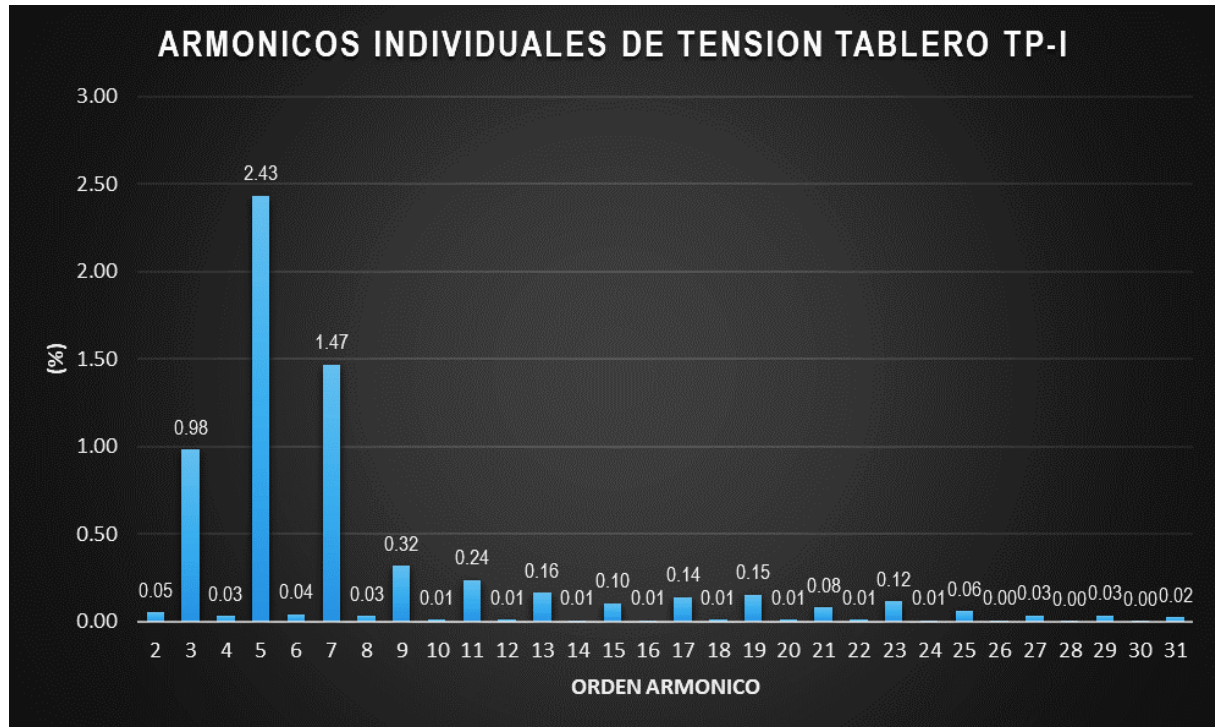


Ilustración 25: Espectro Armónicos Individuales de Tensión TP-I

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Según los registros obtenidos, la ilustración 26 muestra en grafico de barras el porcentaje de contribución de cada uno de los componentes representativos, relacionados con la señal V_h . Una señal sin distorsión debe mostrar el armónico fundamental al 100 % mientras los otros deberán estar en cero, en la práctica, esto no ocurre, puesto que siempre hay una determinada cantidad de armónicos que provoca la distorsión.

Los armónicos individuales de tensión representativos, se observa en la tabla 15, con el límite correspondiente de acuerdo con la norma técnica peruana NTCSE, donde se evidencia que los valores de los armónicos individuales, no sobrepasa el valor recomendado por la norma, siendo inferior a los valores indicados por la norma.

Tabla 15

Valores de armónicos individuales de tensión tablero TP-I

Secuencia	Orden Armonico	V _h Medido (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
(-)	2	0.05	2.00
(0)	3	0.98	5.00
(+)	4	0.03	1.00
(-)	5	2.43	6.00
(0)	6	0.04	0.50
(+)	7	1.47	5.00
(-)	8	0.03	0.50
(0)	9	0.32	1.50
(+)	10	0.01	0.50
(-)	11	0.24	3.50
(0)	12	0.01	0.20
(+)	13	0.16	3.00
(-)	14	0.01	0.20
(0)	15	0.10	0.30
(+)	16	0.01	0.20
(-)	17	0.14	2.00
(0)	18	0.01	0.20
(+)	19	0.15	1.50
(-)	20	0.01	0.20
(0)	21	0.08	0.20
(+)	22	0.01	0.20
(-)	23	0.12	1.50
(0)	24	0.01	0.20
(+)	25	0.06	1.50
(-)	26	0.00	0.20
(0)	27	0.03	0.20
(+)	28	0.00	0.20
(-)	29	0.03	0.63
(0)	30	0.00	0.20
(+)	31	0.02	0.60

Fuente: norma técnica de calidad y servicio eléctrico

Para los armónicos totales THDv, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 16 muestra un resumen promedio por fase de los armónicos THDv medido, asimismo el THDv promedio total es de 3.1 %, el cual no supera el límite recomendado por la norma técnica NTCSE, que es de 8 %.

Tabla 16

Valores distorsión Armónica Total THDv Tablero TP-I

THDv-A Medido (%)	THDv-B Medido (%)	THDv-C Medido (%)	THDv Calculado (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
3.32	3.15	2.85	3.10	8

Fuente: Analizador de calidad de energía Fluke 435-II

▪ **Monitoreo armónicos de corriente**

En lo que refiere a los armónicos individuales de corriente (I_h), según los datos registrados por el analizador de redes en el tablero de distribución TP-I, el orden de armónicos es de 2h al 31h, se puede observar que el quinto armónico llega hasta el 12.12 %, sobrepasando la recomendación de la norma IEEE-519, que es de 12 %, seguidamente se tiene al triple armónico llegando a un valor 7.96 % y el séptimo armónico con un valor de 4.72 %, los demás ordenes de armónicos se disipan con valores reducidos.

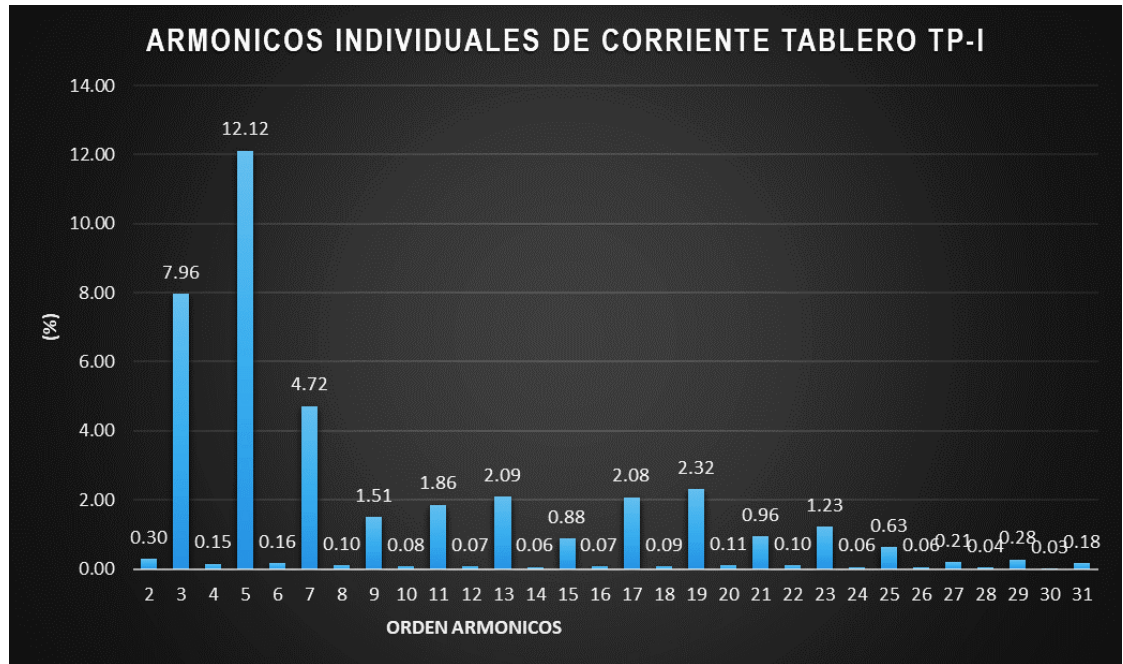


Ilustración 26: Espectro Armónicos Individuales de Corriente Tablero TP-I

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Este comportamiento es característico de la generación de armónicos de convertidores de seis pulsos, se aprecia en la tabla comparativa de corrientes individuales, tabla 17.

Tabla 17

Valores de armónicos individuales de corriente Tablero TP-I

Secuencia	Orden Armonico	I _n Medido (%)	Limites IEEE-519 100<1000 (%)
(-)	2	0.30	15.0
(0)	3	7.96	12.0
(+)	4	0.15	15.0
(-)	5	12.12	12.0
(0)	6	0.16	15.0
(+)	7	4.72	12.0
(-)	8	0.10	15.0
(0)	9	1.51	12.0
(+)	10	0.08	15.0
(-)	11	1.86	5.5
(0)	12	0.07	6.9
(+)	13	2.09	5.5
(-)	14	0.06	6.9
(0)	15	0.88	5.5
(+)	16	0.07	6.9
(-)	17	2.08	5.0
(0)	18	0.09	6.3
(+)	19	2.32	5.0
(-)	20	0.11	6.3
(0)	21	0.96	5.0
(+)	22	0.10	6.3
(-)	23	1.23	2.0
(0)	24	0.06	2.5
(+)	25	0.63	2.0
(-)	26	0.06	2.5
(0)	27	0.21	2.0
(+)	28	0.04	2.5
(-)	29	0.28	2.0
(0)	30	0.03	2.5
(+)	31	0.18	2.0

Fuente: Analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos de distorsión de demanda TDD, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 18, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos TDD medido, asimismo el TDD promedio total es de 15 %, el cual no supera el límite recomendado por la norma técnica IEEE-519, que es de 20 %.

Tabla 18

Distorsión Armónica de Demanda TDD Tablero TP-I

TDD-A Medido (%)	TDD-B Medido (%)	TDD-C Medido (%)	TDD Calculado (%)	TDD IEEE-519 (%)
14.60	16.38	14.15	15	20

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II



Ilustración 27: Vista de monitoreo del tablero TP-I

Fuente: Laboratorios Portugal

4.1.7. Monitoreo tablero de distribución TP-IPM (TD-03)

Durante la medición la tensión presentó un comportamiento estable, cumplen con los límites establecidos por las normas técnicas, los valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente ilustración 29,

asimismo en los registros de datos la frecuencia se mantuvo estable con un valor promedio de 59.995 Hz, desbalance de tensiones dentro de rangos permitidos.

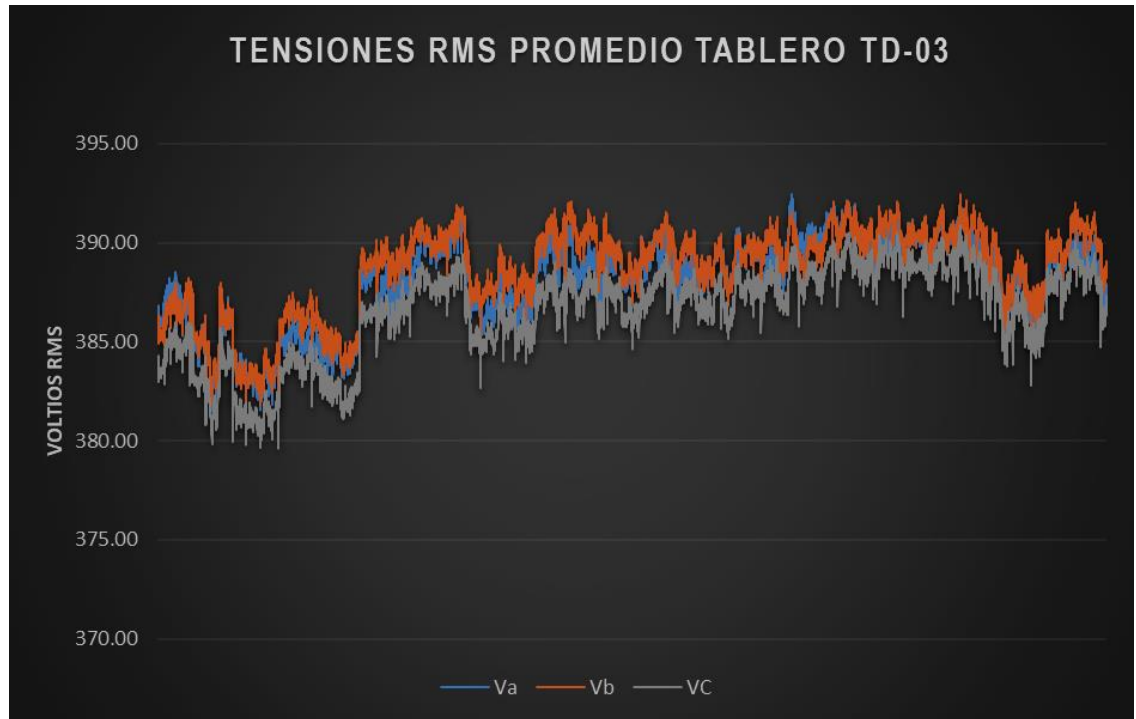


Ilustración 28: Tensiones RMS tablero TD-03

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Las corrientes de carga en valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente ilustración 30, estos varían de acuerdo con la demanda de las máquinas y cargas, los cuales tienen un promedio de 85 Amperios por fase.

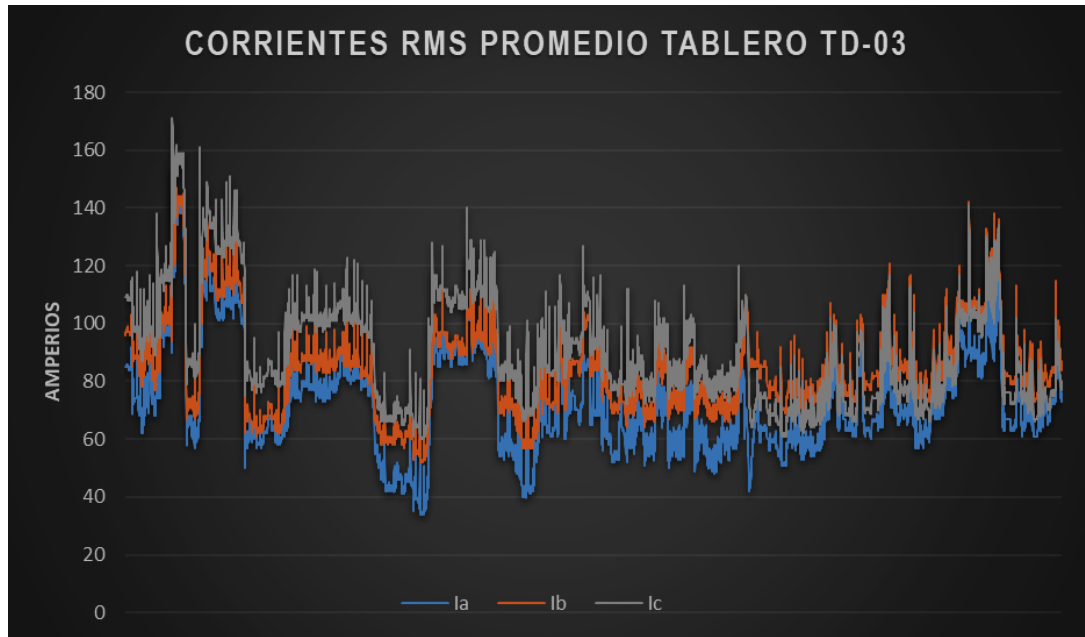


Ilustración 29: Corrientes RMS tablero TD-03

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

▪ Monitoreo armónicos de tensión

El comportamiento de los armónicos de tensión Individuales en este tablero de distribución TP-IPM TD-03, donde la carga no lineal importante es la maquina imprenta Roland-200, según los datos, no se evidencia la existencia de distorsión de la onda sinusoidal de la tensión, estos se encuentran dentro de los límites recomendados por la norma técnica Peruana NTCSE, los armónicos con mayor valor porcentual son primero el quinto, séptimo y tercer armónico, los siguientes armónicos superiores tienen menor influencia en la distorsión de la tensión, también estos se encuentran dentro del rango permitido por la norma.

El espectro de comportamiento de los armónicos de tensión se muestra en la ilustración 31, con el respectivo valor porcentual referido al fundamental de cada componente armónico individual de la tensión.

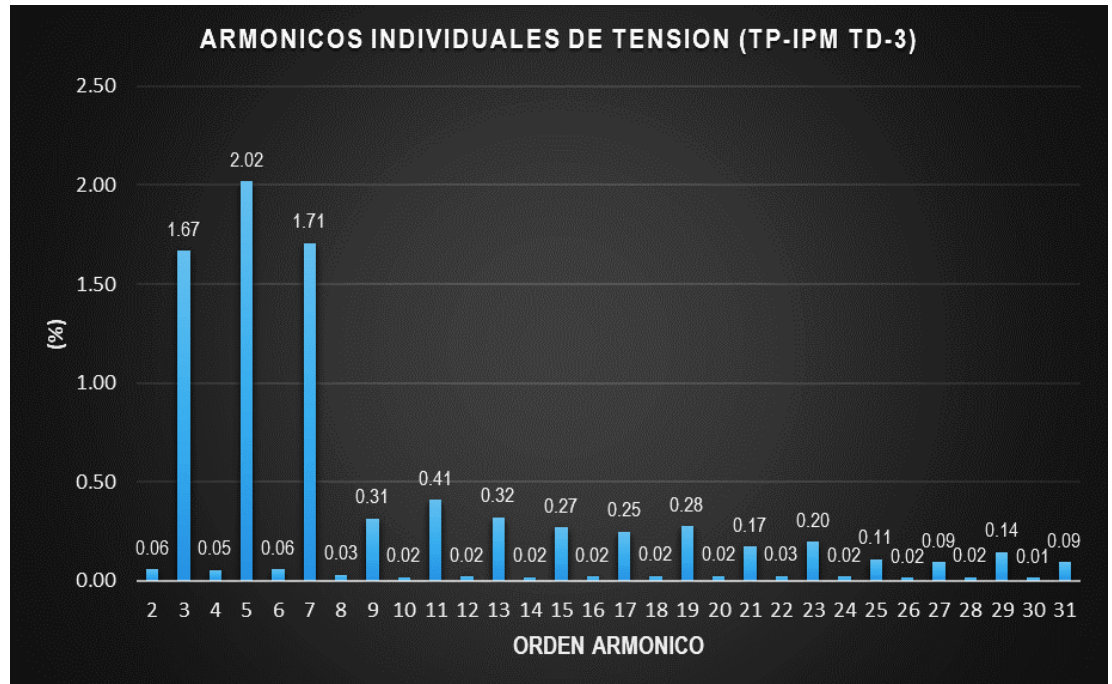


Ilustración 30: Espectro armónicos individuales de tensión Tablero TD-03

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

La siguiente tabla 19, muestra los armónicos individuales de tensión, los cuales no superan las recomendaciones de la norma NTCSE con el respectivo valor porcentual de cada componente armónico individual de la tensión, en general se puede mencionar que este comportamiento, afirma la presencia de convertidores electrónicos de baja distorsión.

Tabla 19

Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-03

Secuencia	Orden Armonico	Vh Medido (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
(-)	2	0.06	2.00
(0)	3	1.67	5.00
(+)	4	0.05	1.00
(-)	5	2.02	6.00
(0)	6	0.06	0.50
(+)	7	1.71	5.00
(-)	8	0.03	0.50
(0)	9	0.31	1.50
(+)	10	0.02	0.50
(-)	11	0.41	3.50
(0)	12	0.02	0.20
(+)	13	0.32	3.00
(-)	14	0.02	0.20
(0)	15	0.27	0.30
(+)	16	0.02	0.20
(-)	17	0.25	2.00
(0)	18	0.02	0.20
(+)	19	0.28	1.50
(-)	20	0.02	0.20
(0)	21	0.17	0.20
(+)	22	0.03	0.20
(-)	23	0.20	1.50
(0)	24	0.02	0.20
(+)	25	0.11	1.50
(-)	26	0.02	0.20
(0)	27	0.09	0.20
(+)	28	0.02	0.20
(-)	29	0.14	0.63
(0)	30	0.01	0.20
(+)	31	0.09	0.60

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales THDv, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 20 muestra un resumen promedio por fase de los armónicos THDv medido, asimismo el THDv promedio total calculado, el cual es 3.38 %, este valor no supera el límite recomendado por la norma técnica NTCSE, no supera el límite es de 8 %, cumple con la norma.

Tabla 20

Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-03

THDv-A Medido (%)	THDv-B Medido (%)	THDv-C Medido (%)	THDv Calculado (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
3.60	3.18	3.35	3.38	8

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II)

▪ **Monitoreo armónicos de corriente**

Los armónicos individuales de corriente (Ih), según los datos registrados por el analizador de redes, en el tablero de distribución TP-IPM (TD-03), se observan los valores porcentuales referido al armónico fundamental de cada orden de armónico individual de corriente, es evidente la existencia de un elevado contenido de armónicos en el tablero de distribución, resaltando los órdenes de armónicos quinto, tercero y séptimo, los armónicos de orden superior tienen menor influencia en la distorsión de la corriente, se observa claramente los armónicos de orden tercero y quinto sobrepasan las recomendaciones de la norma IEEE-519, este comportamiento se puede observar en el espectro de armónicos de corrientes, ilustración 32, con el respectivo valor porcentual de cada componente.

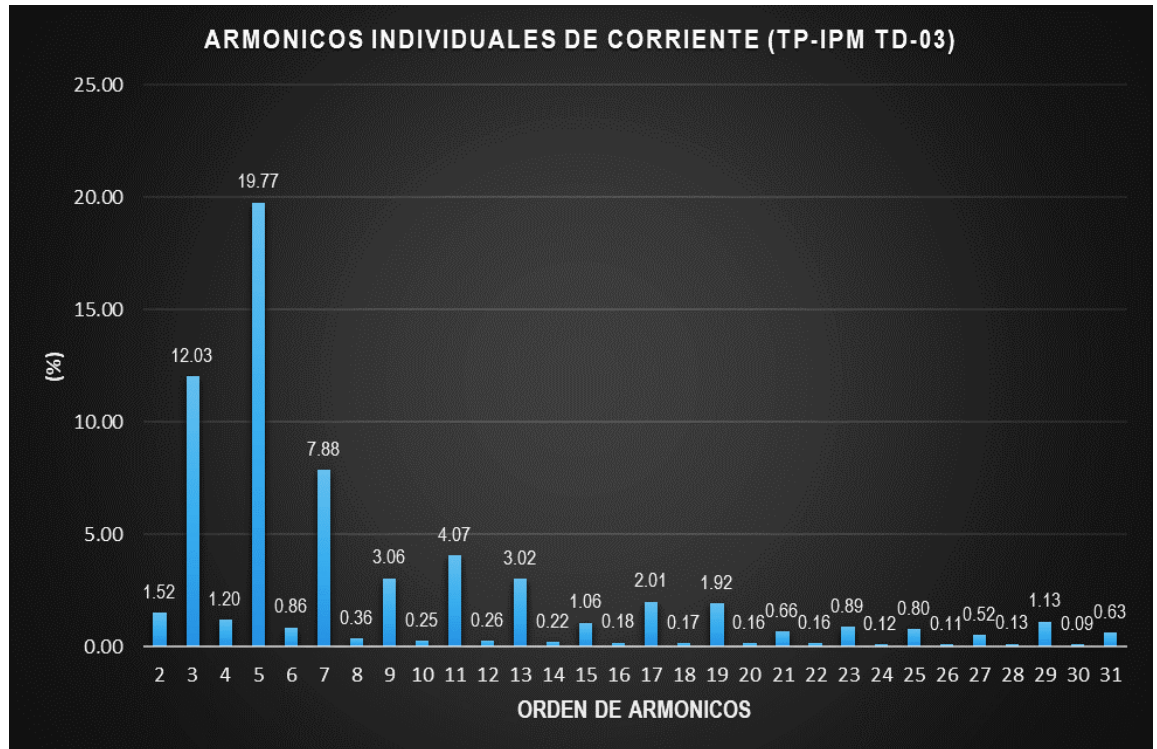


Ilustración 31: Espectro de armónicos individuales de corriente Tablero TD-03

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

La siguiente tabla 21, muestra los armónicos individuales que superan las recomendaciones de la norma IEEE-519, el quinto armónico con un valor de 19.77 %, siendo el límite 12 %; el tercer armónico con un valor de 12.03 %, siendo el valor límite recomendado 12 %.

En esta condición de operación, considerando las componentes simétricas, el quinto armónico de secuencia negativa puede ser el más perjudicial, debido a que genera torques negativos, calentamiento en los motores eléctricos y otros componentes, el tercer armónico básicamente sobrecarga el neutro de los transformadores.

Tabla 21

Valores de armónicos de corriente Tablero TD-03

Secuencia	Orden Armonico	I _n Medido (%)	Limites IEEE-519 100<1000 (%)
(-)	2	1.52	15.0
(0)	3	12.03	12.0
(+)	4	1.20	15.0
(-)	5	19.77	12.0
(0)	6	0.86	15.0
(+)	7	7.88	12.0
(-)	8	0.36	15.0
(0)	9	3.06	12.0
(+)	10	0.25	15.0
(-)	11	4.07	5.5
(0)	12	0.26	6.9
(+)	13	3.02	5.5
(-)	14	0.22	6.9
(0)	15	1.06	5.5
(+)	16	0.18	6.9
(-)	17	2.01	5.0
(0)	18	0.17	6.3
(+)	19	1.92	5.0
(-)	20	0.16	6.3
(0)	21	0.66	5.0
(+)	22	0.16	6.3
(-)	23	0.89	2.0
(0)	24	0.12	2.5
(+)	25	0.80	2.0
(-)	26	0.11	2.5
(0)	27	0.52	2.0
(+)	28	0.13	2.5
(-)	29	1.13	2.0
(0)	30	0.09	2.5
(+)	31	0.63	2.0

Fuente: Analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales de demanda TDD, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 22, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos TDD medido, asimismo el TDD promedio total calculado, el cual es 23.29 %, este valor supera el límite recomendado por la norma técnica IEEE-519 que es de 20 %.

Tabla 22

Valores de armónicos totales TDD tablero TD-03

TDD-A Medido (%)	TDD-B Medido (%)	TDD-C Medido (%)	TDD Calculado (%)	TDD IEEE-519 (%)
20.68	23.50	25.70	23.29	20

Fuente: Analizador de calidad de energía Fluke 435-II



Ilustración 32: Vista del monitoreo de tablero TD-03

Fuente: Laboratorios Portugal

4.1.8. Monitoreo tablero de distribución TD-01

Durante la medición la tensión de las tres fases presentó un comportamiento estable, cumplen con los límites establecidos por la norma técnica NTCSE que es de $\pm 5\%$, los valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente ilustración 34, asimismo los registros de datos muestran la frecuencia estable con un valor promedio de 60 Hz cumple según la norma técnica, no existe desbalance de tensiones.

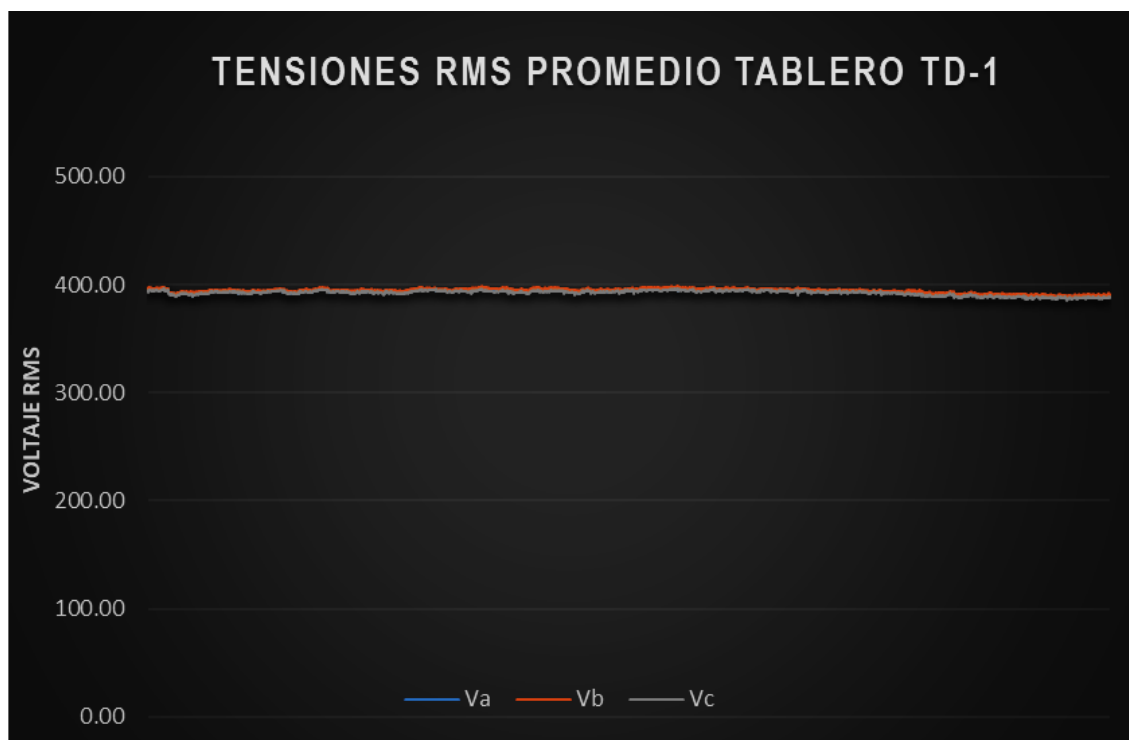


Ilustración 33: Tensiones RMS tablero TD-01

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Las corrientes de carga en valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente ilustración 35, estos son demanda de oficinas, almacenes y máquinas de pequeña potencia, estas corrientes tienen un promedio de 65 Amperios por fase.

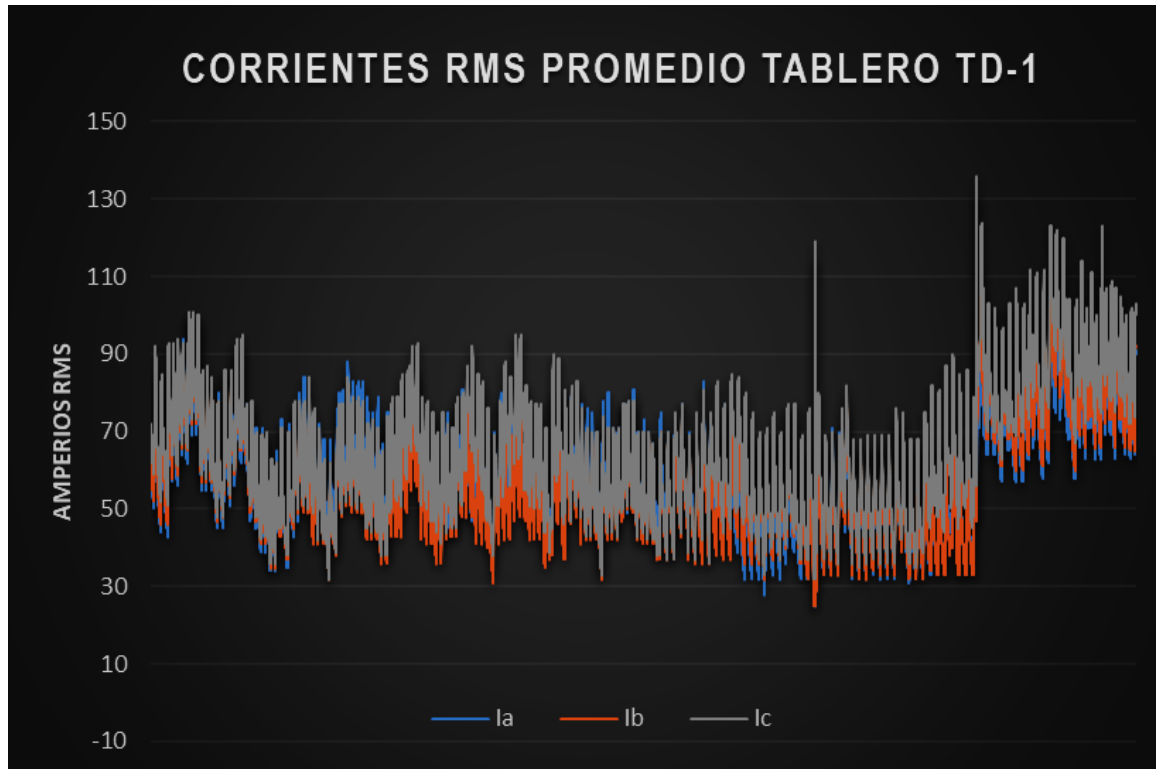


Ilustración 34: Corrientes RMS tablero TD-01

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

▪ Monitoreo armónicos de tensión

El comportamiento de los armónicos de tensión Individuales en este tablero de distribución TD-01, se observa que los componentes de los armónicos tienen valores mínimos, lo cual no tiene influencia en la distorsión de la onda sinusoidal de la tensión, además cumple las recomendaciones de la norma técnica peruana NTCSE.

El espectro de comportamiento de los armónicos de tensión se muestra en la ilustración 36, se muestra cada componente armónico individual de la tensión, con el respectivo valor porcentual referido al armónico fundamental.

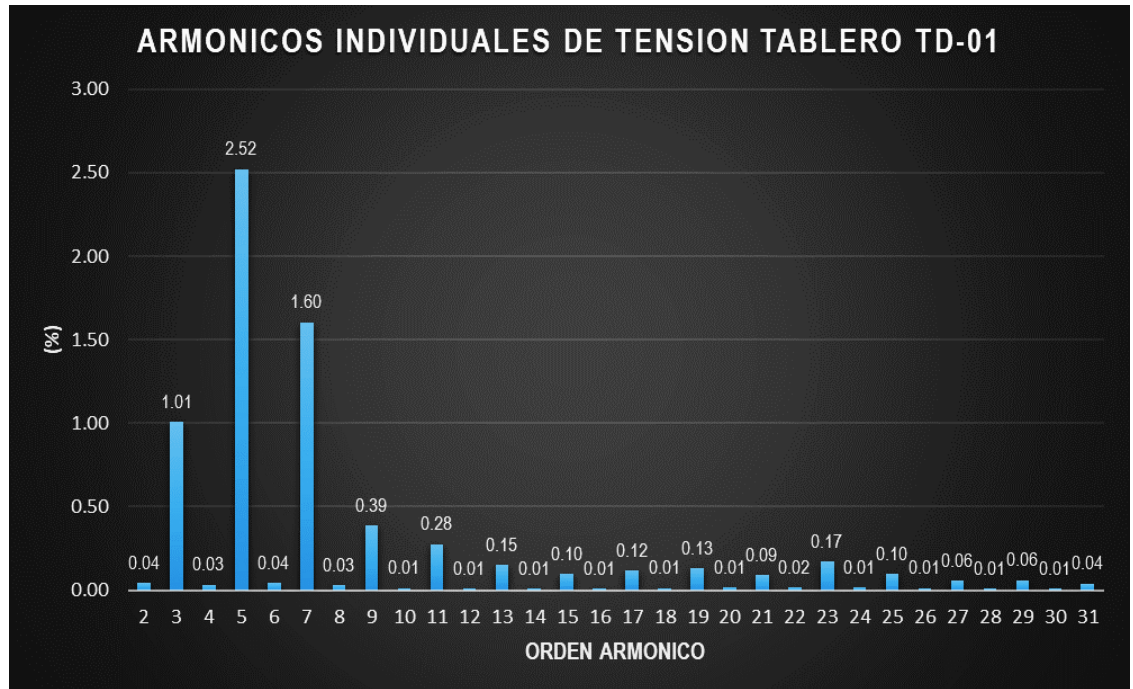


Ilustración 35: Espectro de armónicos de tensión Tablero TD-01

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

La siguiente tabla 23, muestra los armónicos individuales referidos a las recomendaciones de la norma NTCSE con el respectivo valor de cada componente armónico individual de la tensión, se puede definir este comportamiento, la no presencia de cargas no lineales que ocasionen la distorsión de la onda de tensión.

Tabla 23

Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-01

Secuencia	Orden Armonico	Vh Medido (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
(-)	2	0.04	2.00
(0)	3	1.01	5.00
(+)	4	0.03	1.00
(-)	5	2.52	6.00
(0)	6	0.04	0.50
(+)	7	1.60	5.00
(-)	8	0.03	0.50
(0)	9	0.39	1.50
(+)	10	0.01	0.50
(-)	11	0.28	3.50
(0)	12	0.01	0.20
(+)	13	0.15	3.00
(-)	14	0.01	0.20
(0)	15	0.10	0.30
(+)	16	0.01	0.20
(-)	17	0.12	2.00
(0)	18	0.01	0.20
(+)	19	0.13	1.50
(-)	20	0.01	0.20
(0)	21	0.09	0.20
(+)	22	0.02	0.20
(-)	23	0.17	1.50
(0)	24	0.01	0.20
(+)	25	0.10	1.50
(-)	26	0.01	0.20
(0)	27	0.06	0.20
(+)	28	0.01	0.20
(-)	29	0.06	0.63
(0)	30	0.01	0.20
(+)	31	0.04	0.60

Fuente: Analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales THDv, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 24, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos THDv medido, asimismo el THDv promedio total calculado, el cual es 3.25 %, este valor no supera el límite por la norma técnica NTCSE, siendo la recomendación de 8 %, cumpliendo de esta manera el requerimiento de la norma.

Tabla 24
Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-01

THDv-A Medido (%)	THDv-B Medido (%)	THDv-C Medido (%)	THDv Calculado (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
3.46	3.23	3.05	3.25	8

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

▪ **Monitoreo armónicos de corriente**

Los armónicos individuales de corriente (Ih), según los datos registrados por el analizador de redes en el tablero de distribución TD-01, se observan los valores porcentuales referido al armónico fundamental de cada orden de armónico individual de corriente, se evidencia un bajo contenido de armónicos en el tablero de distribución, no tienen mayor influencia en la distorsión de la onda fundamental de la tensión, cumple con las recomendaciones de la norma IEEE-519, este comportamiento se puede observar en el espectro de armónicos de corrientes, ilustración 37, con su respectivo valor porcentual de cada componente.

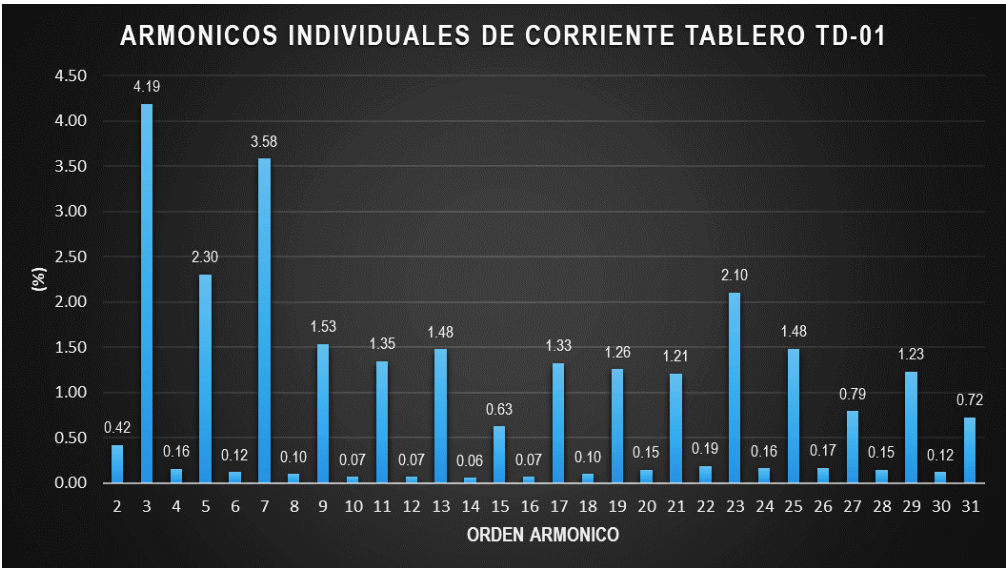


Ilustración 36: Espectro armónicos individuales de corriente Tablero TD-01
Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

La siguiente tabla 25, muestra los armónicos individuales de la corriente, los más representativos son el tercer armónico con 4.19 %, el séptimo con 3.58 %, el quinto con 2.30 %, el componente de mayor orden se atenúa progresivamente, sin alcanzar a los valores límites recomendados por la norma IEEE-519.

Tabla 25

Valores de armónicos individuales de corriente Tablero TD-01

Secuencia	Orden Armonico	I _h Medido (%)	Limites IEEE-519 100<1000 (%)
(-)	2	0.42	15.0
(0)	3	4.19	12.0
(+)	4	0.16	15.0
(-)	5	2.30	12.0
(0)	6	0.12	15.0
(+)	7	3.58	12.0
(-)	8	0.10	15.0
(0)	9	1.53	12.0
(+)	10	0.07	15.0
(-)	11	1.35	5.5
(0)	12	0.07	6.9
(+)	13	1.48	5.5
(-)	14	0.06	6.9
(0)	15	0.63	5.5
(+)	16	0.07	6.9
(-)	17	1.33	5.0
(0)	18	0.10	6.3
(+)	19	1.26	5.0
(-)	20	0.15	6.3
(0)	21	1.21	5.0
(+)	22	0.19	6.3
(-)	23	2.10	2.0
(0)	24	0.16	2.5
(+)	25	1.48	2.0
(-)	26	0.17	2.5
(0)	27	0.79	2.0
(+)	28	0.15	2.5
(-)	29	1.23	2.0
(0)	30	0.12	2.5
(+)	31	0.72	2.0

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales de demanda TDD, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 26, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos TDD medido, asimismo el TDD promedio total calculado, el cual es 6.81 %, este valor supera el límite recomendado por la norma técnica IEEE-519.

Es una clara evidencia de la poca presencia de cargas no lineales en este tablero, básicamente equipamiento de oficinas, almacenes y equipos menores que puedan generar distorsión armónica.

Tabla 26

Valores de armónicos totales de corriente TDD tablero TD-01

TDD-A Medido (%)	TDD-B Medido (%)	TDD-C Medido (%)	TDD Calculado (%)	TDD IEEE-519 (%)
8.81	3.97	7.66	6.81	20

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II



Ilustración 37: Vista de monitoreo tablero TD-01

Fuente: Laboratorios Portugal

4.1.9. Monitoreo tablero de distribución TD-07

Durante la medición la tensión de las tres fases presentó un comportamiento estable, cumplen con los límites establecidos por la norma técnica NTCSE que es de $\pm 5\%$, los valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente en la ilustración 49, asimismo los registros de datos muestran la frecuencia estable con un valor promedio de 60 Hz cumple según la norma técnica, existe desbalance mínimo de tensiones.

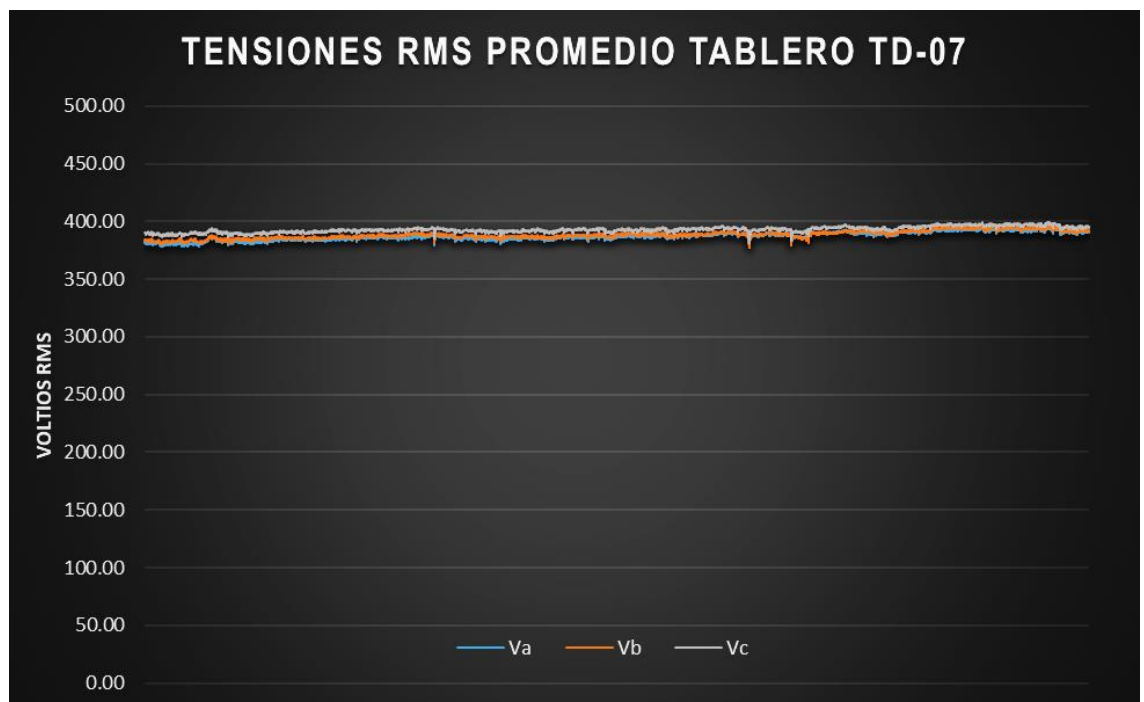


Ilustración 38: Tensiones RMS Tablero TD-07

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Las corrientes de carga en valores verdaderos RMS de las tres fases se muestran en la siguiente la ilustración 40, este tablero de fuerza suministra energía básicamente a una de las maquinas impresora, denominado Roland-300, la demanda aproximada es de 20 Amperios, se observa la intermitencia de la operación, propia del proceso de trabajo de la máquina.

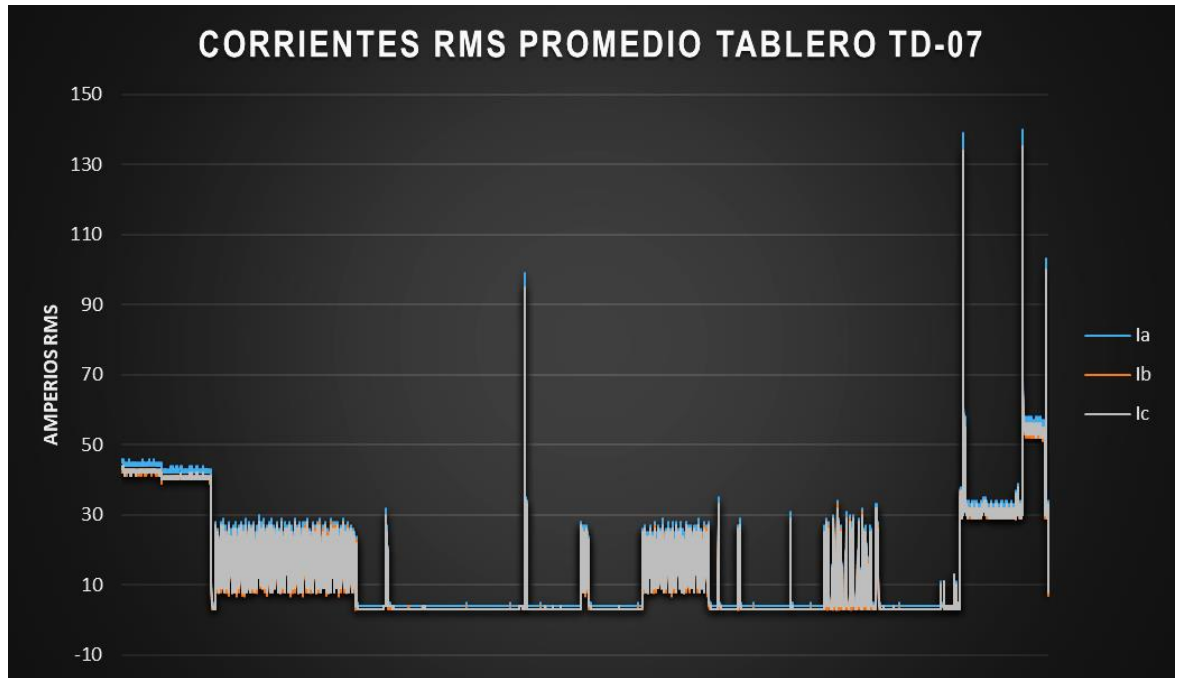


Ilustración 39: Corrientes RMS Tablero TD-07

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

▪ Monitoreo armónicos de tensión

El comportamiento de los armónicos de tensión Individuales en este tablero de distribución TD-07, se observa que los componentes de los armónicos tienen valores mínimos, lo cual no tiene influencia en la distorsión de la onda sinusoidal de la tensión, además cumple las recomendaciones de la norma técnica peruana NTCSE.

El espectro de comportamiento de los armónicos de tensión se muestra en la ilustración 41, se observa cada componente armónico individual de la tensión, con el respectivo valor porcentual referido al armónico fundamental.

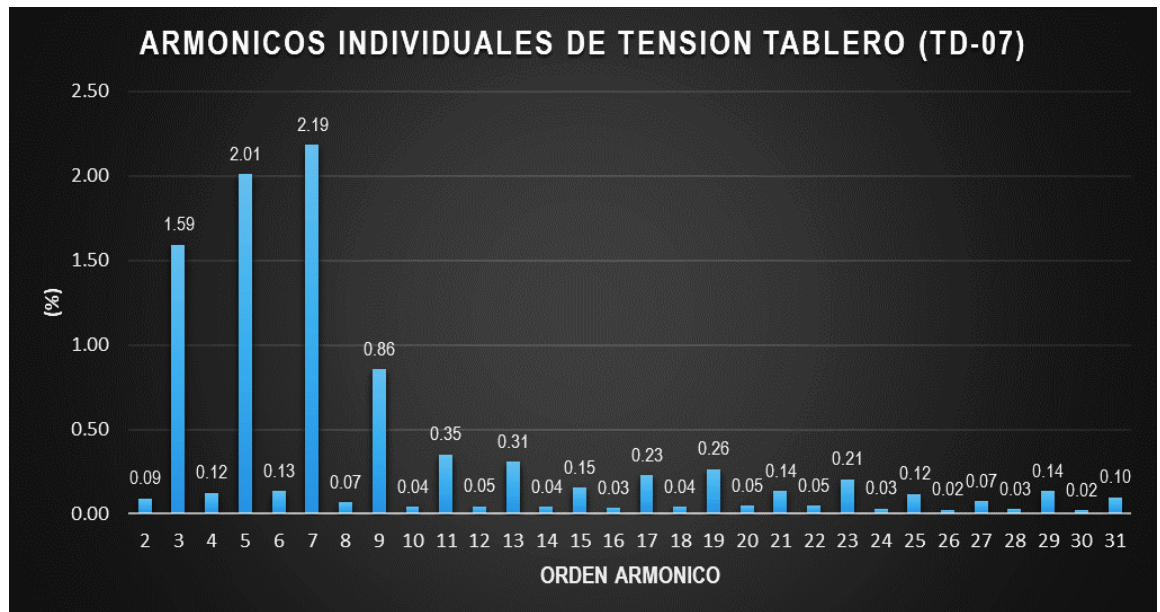


Ilustración 40: Espectro Armónicos de Tensión Tablero TD-07

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

Para ver los valores que registro los armónicos individuales de tensión se tiene la tabla 27, según las recomendaciones de la norma NTCSE con el respecto al valor de cada componente armónico individual de la tensión, se puede definir este comportamiento, que la distorsión de la onda de tensión no es significativa ya que no supera los límites recomendados por la norma.

Tabla 27

Valores de armónicos individuales de tensión Tablero TD-07

Secuencia	Orden Armonico	V _h Medido (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
(-)	2	0.09	2.00
(0)	3	1.59	5.00
(+)	4	0.12	1.00
(-)	5	2.01	6.00
(0)	6	0.13	0.50
(+)	7	2.19	5.00
(-)	8	0.07	0.50
(0)	9	0.86	1.50
(+)	10	0.04	0.50
(-)	11	0.35	3.50
(0)	12	0.05	0.20
(+)	13	0.31	3.00
(-)	14	0.04	0.20
(0)	15	0.15	0.30
(+)	16	0.03	0.20
(-)	17	0.23	2.00
(0)	18	0.04	0.20
(+)	19	0.26	1.50
(-)	20	0.05	0.20
(0)	21	0.14	0.20
(+)	22	0.05	0.20
(-)	23	0.21	1.50
(0)	24	0.03	0.20
(+)	25	0.12	1.50
(-)	26	0.02	0.20
(0)	27	0.07	0.20
(+)	28	0.03	0.20
(-)	29	0.14	0.63
(0)	30	0.02	0.20
(+)	31	0.10	0.60

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales THDv, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 28, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos THDv medido, asimismo el THDv promedio total calculado, el cual es 3.65 %, este valor no supera el límite por la norma técnica NTCSE,

siendo la recomendación de 8 %, cumpliendo de esta manera el requerimiento de la norma.

Tabla 28

Valores de armónicos totales THDv Tablero TD-07

THDv-A Medido (%)	THDv-B Medido (%)	THDv-C Medido (%)	THDv Calculado (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
3.85	3.73	3.38	3.65	8

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

▪ **Monitoreo armónicos de corriente**

Los armónicos individuales de corriente (Ih), según los datos registrados por el analizador de redes en el tablero de distribución TD-07, se observan los valores porcentuales referido al armónico fundamental de cada orden de armónico individual de corriente, se evidencia un alto contenido de armónicos en el tablero de distribución, del espectro de armónicos se puede observar el alto porcentaje de los armónicos individuales del 5to, 7mo, 11vo y 13avo orden de armónico, propias característica de comportamiento de una carga no lineal de 6 pulsos, los armónicos 5to y 7mo superan las recomendaciones de la norma IEEE-519, este comportamiento se puede observar en el espectro de armónicos de corrientes, ilustración 42, con su respectivo valor porcentual de cada componente.

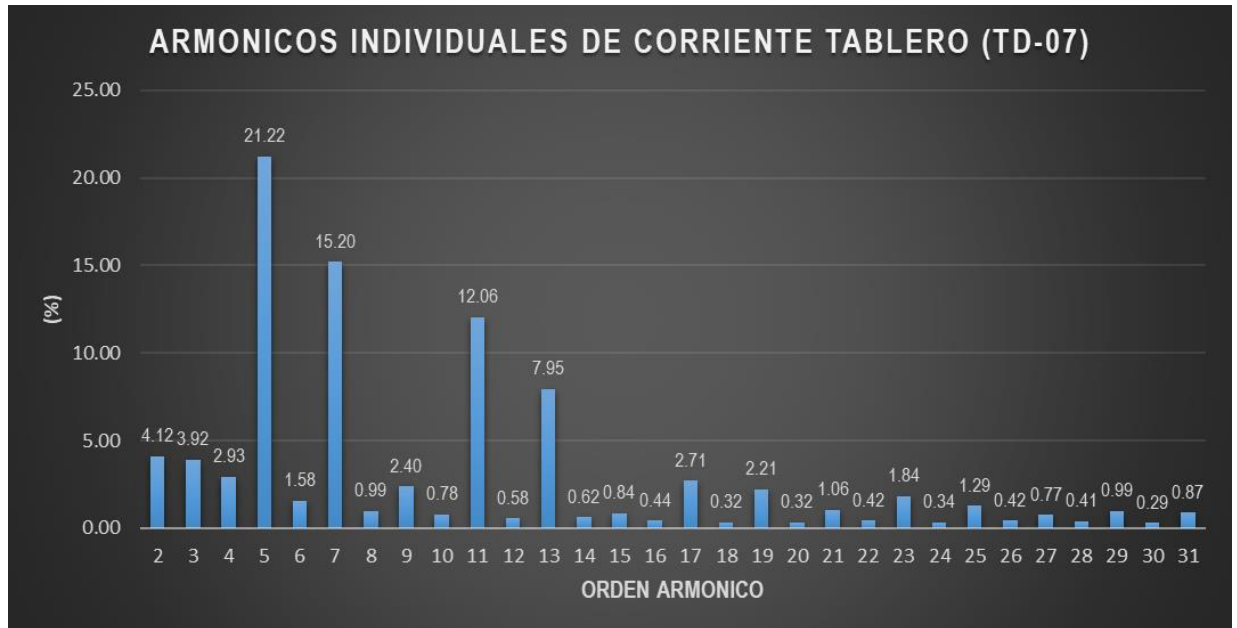


Ilustración 41: Espectro de armónicos de corriente Tablero TD-07

Fuente: Datos Capturados por Analizador de Redes

La siguiente tabla 29, evidencia el alto contenido de los armónicos individuales de la corriente, los más representativos son el 5to, 7mo, 11avo y 13avo armónico con valores 21.22 %, 15.20 %, 12.06 % y 7.95 %, respectivamente, superando los valores recomendados por la norma, los armónicos de mayor orden se atenúan progresivamente, sin alcanzar a los valores límites recomendados por la norma IEEE-519.

Tabla 29

Valores de armónicos individuales de corriente tablero TD-07

Secuencia	Orden Armonico	I _h Medido (%)	Limites IEEE-519 100<1000 (%)
(-)	2	4.12	15.0
(0)	3	3.92	12.0
(+)	4	2.93	15.0
(-)	5	21.22	12.0
(0)	6	1.58	15.0
(+)	7	15.20	12.0
(-)	8	0.99	15.0
(0)	9	2.40	12.0
(+)	10	0.78	15.0
(-)	11	12.06	5.5
(0)	12	0.58	6.9
(+)	13	7.95	5.5
(-)	14	0.62	6.9
(0)	15	0.84	5.5
(+)	16	0.44	6.9
(-)	17	2.71	5.0
(0)	18	0.32	6.3
(+)	19	2.21	5.0
(-)	20	0.32	6.3
(0)	21	1.06	5.0
(+)	22	0.42	6.3
(-)	23	1.84	2.0
(0)	24	0.34	2.5
(+)	25	1.29	2.0
(-)	26	0.42	2.5
(0)	27	0.77	2.0
(+)	28	0.41	2.5
(-)	29	0.99	2.0
(0)	30	0.29	2.5
(+)	31	0.87	2.0

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Para los armónicos totales de demanda TDD, según los datos obtenidos por el analizador de calidad de energía, la tabla 30, muestra un resumen promedio por fase de los armónicos TDD medido, asimismo el TDD promedio total

calculado, el cual es 24.15 %, este valor supera el límite recomendado por la norma técnica IEEE-519.

Es una evidencia la presencia de la carga no lineal en este tablero, básicamente en este punto de medición está instalado y operando variadores de velocidad de seis pulsos, que confirma la forma y niveles de distorsión que presenta.

Tabla 30

Valores de armónicos totales TDD Tablero TD-07

TDD-A Medido (%)	TDD-B Medido (%)	TDD-C Medido (%)	TDD Calculado (%)	TDD IEEE-519 (%)
24.58	23.76	24.10	24.15	20

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II



Ilustración 42: Vista de tablero TD-07

Fuente: Laboratorios Portugal

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. Resultados finales de las actividades realizadas

Como resultado final de análisis de armónicos de la planta Graphics de la Empresa Laboratorios Portugal, se ha observado un comportamiento diferente de los armónicos en cada punto de medición, tanto en tensión y corriente, esto es lógico debido al diferentes tipos de carga conectadas a cada tablero eléctrico.

5.1.1. Armónicos de tensión

Los armónicos individuales de tensión V_h , indicadores de la distorsión armónica individual de la onda sinusoidal de la tensión y es producto de la interacción de la entre la distorsión armónica de la corriente y la impedancia del sistema, en este caso los tableros de baja tensión, estos parámetros no exceden los límites recomendados por la norma técnica NTCSE. Se aprecia en la siguiente tabla 31.

Tabla 31

Comparativa de armónicos de tensión de tableros

Secuencia	Orden Armonico	V _h Tablero TP-I (%)	V _h Tablero TD-3 (%)	V _h Tablero TD-1 (%)	V _h Tablero TD-7 (%)	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
(-)	2	0.05	0.06	0.04	0.09	2.00
(0)	3	0.98	1.67	1.01	1.59	5.00
(+)	4	0.03	0.05	0.03	0.12	1.00
(-)	5	2.43	2.02	2.52	2.01	6.00
(0)	6	0.04	0.06	0.04	0.13	0.50
(+)	7	1.47	1.71	1.60	2.19	5.00
(-)	8	0.03	0.03	0.03	0.07	0.50
(0)	9	0.32	0.31	0.39	0.86	1.50
(+)	10	0.01	0.02	0.01	0.04	0.50
(-)	11	0.24	0.41	0.28	0.35	3.50
(0)	12	0.01	0.02	0.01	0.05	0.20
(+)	13	0.16	0.32	0.15	0.31	3.00
(-)	14	0.01	0.02	0.01	0.04	0.20
(0)	15	0.10	0.27	0.10	0.15	0.30
(+)	16	0.01	0.02	0.01	0.03	0.20
(-)	17	0.14	0.25	0.12	0.23	2.00
(0)	18	0.01	0.02	0.01	0.04	0.20
(+)	19	0.15	0.28	0.13	0.26	1.50
(-)	20	0.01	0.02	0.01	0.05	0.20
(0)	21	0.08	0.17	0.09	0.14	0.20
(+)	22	0.01	0.03	0.02	0.05	0.20
(-)	23	0.12	0.20	0.17	0.21	1.50
(0)	24	0.01	0.02	0.01	0.03	0.20
(+)	25	0.06	0.11	0.10	0.12	1.50
(-)	26	0.00	0.02	0.01	0.02	0.20
(0)	27	0.03	0.09	0.06	0.07	0.20
(+)	28	0.00	0.02	0.01	0.03	0.20
(-)	29	0.03	0.14	0.06	0.14	0.63
(0)	30	0.00	0.01	0.01	0.02	0.20
(+)	31	0.02	0.09	0.04	0.10	0.60

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Armónicos totales de tensión THDv confirma el comportamiento normal de los armónicos en cada punto de medición, los cuales están dentro del rango recomendado por una norma técnica peruana NTCSE. Se aprecia en la siguiente tabla 32.

Tabla 32

Comparativa armónicos totales THDv Tableros

THDv Tablero TP-I	THDv Tablero TD-3	THDv Tablero TD-1	THDv Tablero TD-7	Limites NTCSE Media y Baja Tension (%)
3.10	3.38	3.25	3.65	8

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

5.1.2. Armónicos de corriente

Los armónicos individuales de corriente I_h , son indicadores de la distorsión armónica individual de la corriente en los puntos de medición, es la respuesta a la intervención de los componentes electrónicos para el control de potencia de los equipos no lineales, se puede observar que en algunos tableros de baja tensión tienen mayor contenido de armónicos que superan los límites recomendados por la norma técnica IEEE-519.

Los tableros con mayor contenido armónico y a tomar en cuenta para reducir la distorsión son los siguientes:

Tablero TD-3:

- 3er orden de armónico 12.3 %, siendo el límite 12 %.
- 5to orden de armónico 19.77 %, siendo el límite 12 %.

Tablero TD-7:

- 5to orden de armónico 21.22 %, siendo el límite 12 %.
- 7mo orden de armónico 15.2 %, siendo el límite 12 %.
- 11ava orden de armónico 12.06 %, siendo el límite 5.5 %.
- 13ava orden de armónico 7.95 %, siendo el límite 5.5 %.

Este comportamiento se aprecia en la siguiente tabla 33.

Tabla 33

Comparativa armónicos individuales de corriente de tableros

Secuencia	Orden Armonico	Ih Tablero TP-I (%)	Ih Tablero TD-3 (%)	Ih Tablero TD-1 (%)	Ih Tablero TD-7 (%)	Limites IEEE-519 100<1000 (%)
(-)	2	0.30	1.52	0.42	4.12	15.0
(0)	3	7.96	12.03	4.19	3.92	12.0
(+)	4	0.15	1.20	0.16	2.93	15.0
(-)	5	12.12	19.77	2.30	21.22	12.0
(0)	6	0.16	0.86	0.12	1.58	15.0
(+)	7	4.72	7.88	3.58	15.20	12.0
(-)	8	0.10	0.36	0.10	0.99	15.0
(0)	9	1.51	3.06	1.53	2.40	12.0
(+)	10	0.08	0.25	0.07	0.78	15.0
(-)	11	1.86	4.07	1.35	12.06	5.5
(0)	12	0.07	0.26	0.07	0.58	6.9
(+)	13	2.09	3.02	1.48	7.95	5.5
(-)	14	0.06	0.22	0.06	0.62	6.9
(0)	15	0.88	1.06	0.63	0.84	5.5
(+)	16	0.07	0.18	0.07	0.44	6.9
(-)	17	2.08	2.01	1.33	2.71	5.0
(0)	18	0.09	0.17	0.10	0.32	6.3
(+)	19	2.32	1.92	1.26	2.21	5.0
(-)	20	0.11	0.16	0.15	0.32	6.3
(0)	21	0.96	0.66	1.21	1.06	5.0
(+)	22	0.10	0.16	0.19	0.42	6.3
(-)	23	1.23	0.89	2.10	1.84	2.0
(0)	24	0.06	0.12	0.16	0.34	2.5
(+)	25	0.63	0.80	1.48	1.29	2.0
(-)	26	0.06	0.11	0.17	0.42	2.5
(0)	27	0.21	0.52	0.79	0.77	2.0
(+)	28	0.04	0.13	0.15	0.41	2.5
(-)	29	0.28	1.13	1.23	0.99	2.0
(0)	30	0.03	0.09	0.12	0.29	2.5
(+)	31	0.18	0.63	0.72	0.87	2.0

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

Armónicos totales de corriente TDD, confirma el alto contenido armónico en el tablero TD-7, el cual excede el límite recomendado por la norma técnica IEEE-519. Se aprecia en la siguiente tabla 34.

Tabla 34

Comparativa de armónicos totales TDD Tableros

TDD Tablero TP-I (%)	TDD Tablero TD-3 (%)	TDD Tablero TD-1 (%)	TDD Tablero TD-7 (%)	TDD IEEE-519 (%)
15	23	6.81	24	20

Fuente: analizador de calidad de energía Fluke 435-II

5.2. Planteamiento de alternativa de mitigación de armónicos

Según el resumen de datos capturados y analizados, se ve con claridad que los armónicos de corriente que superan los límites recomendados por las normas están ubicados en los tableros TD-03 y TD-07, los cuales tienen un contenido de armónicos altos, esto debido a la existencia de cargas no lineales conectados a estos tableros.

En la planta Graphics, las cargas no lineales importantes conectados a estos tableros son las impresoras Roland-200 y Roland-300, los cuales cuentan con sistema de accionamiento para motores con variadores de velocidad (CA-CC-CA), utilizados para controlar la velocidad de las máquinas.

Se pudo comprobar, que las maquinas Roland, tienen una característica en su diseño, utilizan convertidores de seis pulsos, este tipo de convertidores se distingue de otros por la generación de armónicos característicos, como son los armónicos más significativos de orden 5^{to} y 7^{mo}, la generación de armónicos para diferentes tipos de carga no lineales se puede apreciar en la tabla 02.

Para el caso específicos de estos convertidores de seis pulsos, corresponde la siguiente fórmula: $h = mp \pm 1$

Donde:

- p : Numero de pulsos del convertidor
- m : Números consecutivos 1, 2, 3, ...
- $\pm$: Signo para los armónicos laterales de numero de pulsos

El objetivo principal de este trabajo es, analizar y verificar los niveles de armónicos existentes en los tableros de baja tensión, esto como primera fase se este proyecto, posteriormente se puede implementar el método de mitigación

recomendado, lo cual dependerá de la decisión del cliente, con el método planteado para la reducción de armónicos se evitara las operaciones defectuosas de los equipos sensibles conectados en la misma red, se evalúan los posibles medios de solución según la tabla 35, para la toma de decisión se considerar básicamente tres puntos a calificar:

- Facilidad para la instalación y espacio para el equipo.
- Efectos que pueda generar con el sistema al ser instalados.
- Costo de la implementación.

Tabla 35

Alternativas para mitigación de armónicos

Ítem	Método de mitigación	Instalación	Efecto	Costo
01	Reubicación de las cargas no lineales	Requiere cableado fuerza aguas arriba	Ninguno	Alto
02	Instalación de filtros pasivos	Requiere gabinete especial y espacio	Resonancia	Alto
03	Instalación de filtros activos	Requiere gabinete especial y espacio	Ninguno	Muy alto
04	Transformadores con conexiones especiales	Requiere tablero y espacio	Ninguno	Mediano

Fuente: Cuaderno técnico filtrado armónicos Schneider

Se considera que una instalación eléctrica no está libre de la distorsión armónica, se convive con cierto nivel o índice de distorsión armónica según los límites de las normas técnicas, se plantean inicialmente cuatro alternativas para la reducción de armónicos de corriente, los cuales son:

- El primer método es la reubicación de las maquinas Roland para reducir la influencia de los armónicos que generan estas máquinas, se descarta este método debido a que se tiene una instalación fija y económicamente no es viable para instalar las maquinas Roland en otro lugar.

- El segundo método es la instalación de filtros pasivos, este método funciona, pero se debe tener cuidado en el diseño de los componentes, ya que podría originar el fenómeno de resonancia, también se descarta este método debido a la complejidad y estudios previos a realizarse.
- El tercer método se tiene la implementación de filtros activos, estos componentes son muy modernos basados en electrónica de potencia, como inconveniente se tiene el costo muy elevado y el requerimiento de la especialización del personal.
- El cuarto método, es el método de cancelación de armónicos por conexión de transformadores, se elige este método debido a que no requiere estudios adicionales, la instalación es relativamente sencilla y el costo es mediano a bajo, asimismo ambas maquinas Roland-200 y Roland-300 son similares en su topología y convertidores.

El método planteado consiste en la conexión de los dos convertidores de seis pulsos como si fuera un convertidor de doce pulsos, mediante dos transformadores, un transformador conectado en Delta-Delta y el otro transformador conectado en Delta-Estrella, con esta topología se logra un convertidor aparente de doce pulsos, esto se basa en el principio de cambio de fase en el transformador, para lograr la cancelación de las corrientes armónicas 5^{to} y 7^{mo} armónicos, se utiliza para alimentar cargas generadoras de armónicos que operan en paralelo como los equipos Roland-200 y Roland-300 de la planta Gráficos Portugal, la ilustración 43 muestra la configuración de sistema eléctrico, los armónicos 5^{to} y 7^{mo} se cancelan en el punto de conexión común aguas arriba.

La cancelación de armónicos se debe al cambio de fase de 30° entre las dos conexiones del transformador.

Como resultado de esto, la fuente no ve una cantidad significativa de los armónicos 5^{to} y 7^{mo}. Si las cargas no lineales suministradas por los dos transformadores son idénticas, se produce la cancelación total de corriente armónica; de lo contrario, todavía estarían presentes algunas corrientes de armónicos 5^{to} y 7^{mo}.

Para el modo de cancelación de los armónicos, uno de los requisitos es que trabajen siempre con un par de convertidores, y las cargas no lineales sean similares en potencia y topología del convertidor deben ser similares, en este caso ambas Maquinas Roland son de 6 pulsos, cumplen el requisito.

Aquí las dos cargas separadas se alimentan desde dos convertidores, cada uno con su propio transformador de alimentación, un convertidor se alimenta a través de un transformador Delta/Estrella produce un conjunto de tensiones trifásicas secundarios fases desplazados en 30° con respecto al voltaje primario, el otro convertidor es alimentado por tensiones secundarias del transformador Delta/Delta, que no tienen desplazamiento de fase.

Estas dos combinaciones de los transformadores y la secuencia del armónico hacen la eliminación, el transformador Delta/Estrella posiciona la onda del armónico en sentido opuesto al armónico del transformador Delta/Delta, cancelándose el armónico en mención aguas arriba de los transformadores.

Para la validación del método de cancelación armónicos planteado, se ha realizado un modelo en el programa Etap 12.6, que es una herramienta de modelamiento de sistemas de eléctricos de potencia e industrial, la ilustración 43, muestra el modelo aproximado, con los dos variadores de velocidad de seis pulsos y sus componentes eléctricos adicionales, sin transformadores para la cancelación de armónicos, en la línea de suministro se observa un THD alto de corriente 29.95 % y el THD de tensión es 0.21 %, esto debido a las cargas no lineales que son los variadores de velocidad.

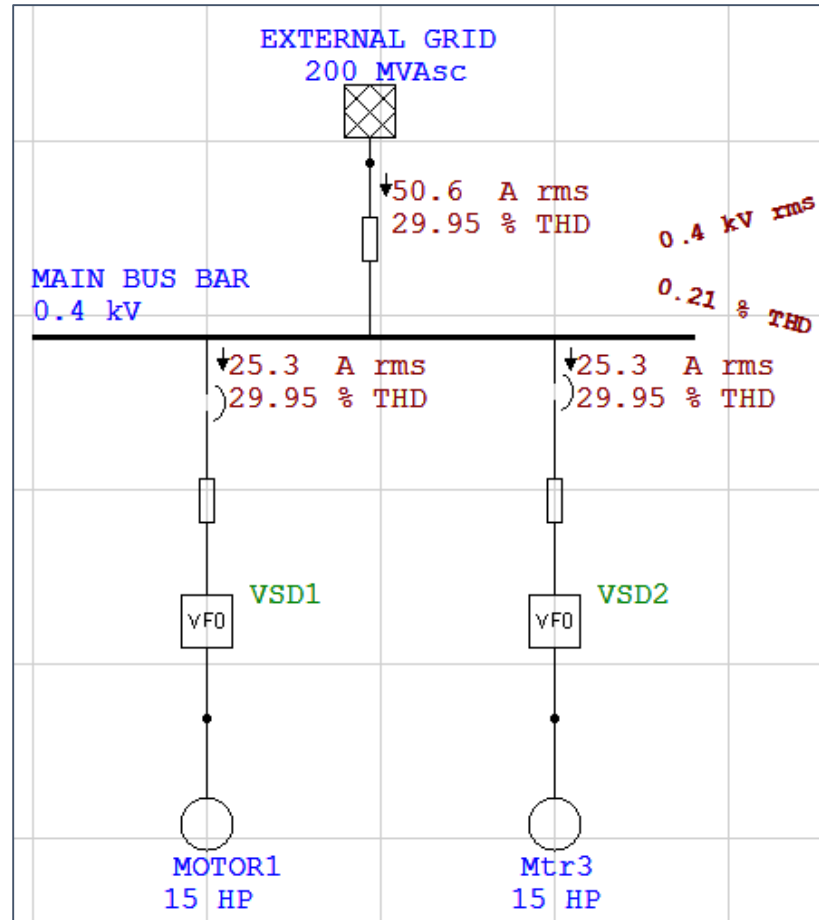


Ilustración 43: Modelo sin transformadores

Fuente: Elaboración propia Etap 12.6

En la ilustración 44, se observa el espectro de armónicos del modelo sin transformadores para la cancelación de armónicos, se aprecia claramente los armónicos 5^{to} y 7^{mo}, con mayor porcentaje de contenido armónico, luego los armónicos de mayor orden se disipan debido a la impedancia del sistema.

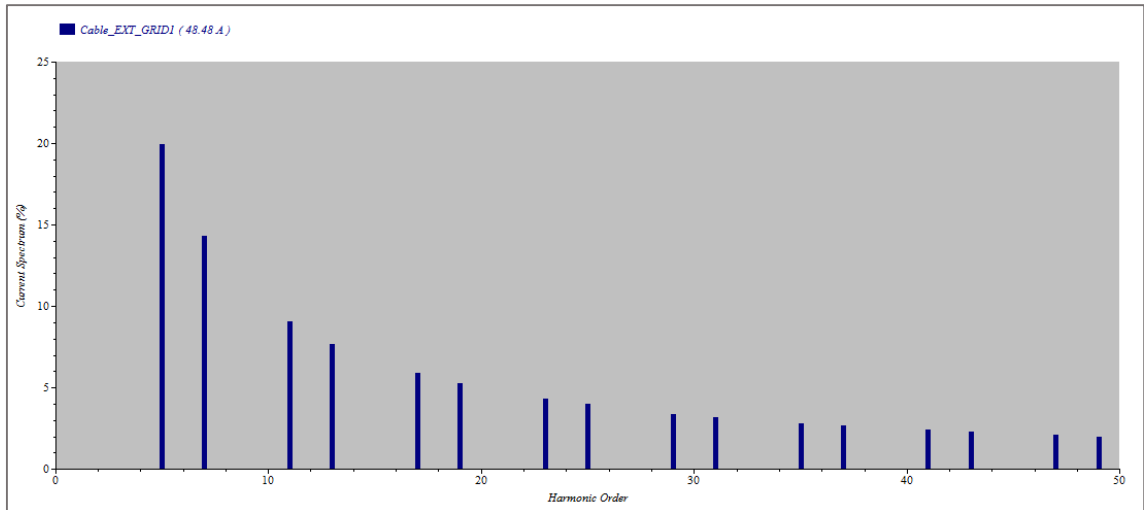


Ilustración 44: Espectro de armónicos sin transformadores

Fuente: Propia Etap 12.6

En el modelo, se han insertado dos transformadores, uno de ellos conectado en conexión Delta-Delta y el otro transformador conectado en Delta-Estrella, con esta configuración se logra la cancelación de armónicos, como se aprecia en la ilustración 45, en la línea aguas arriba de los variadores de velocidad THD de corriente se ha reducido de 29.95 % a 13.72 % y el THD de tensión de 0.21 % a 0.15 % en barra de distribución.

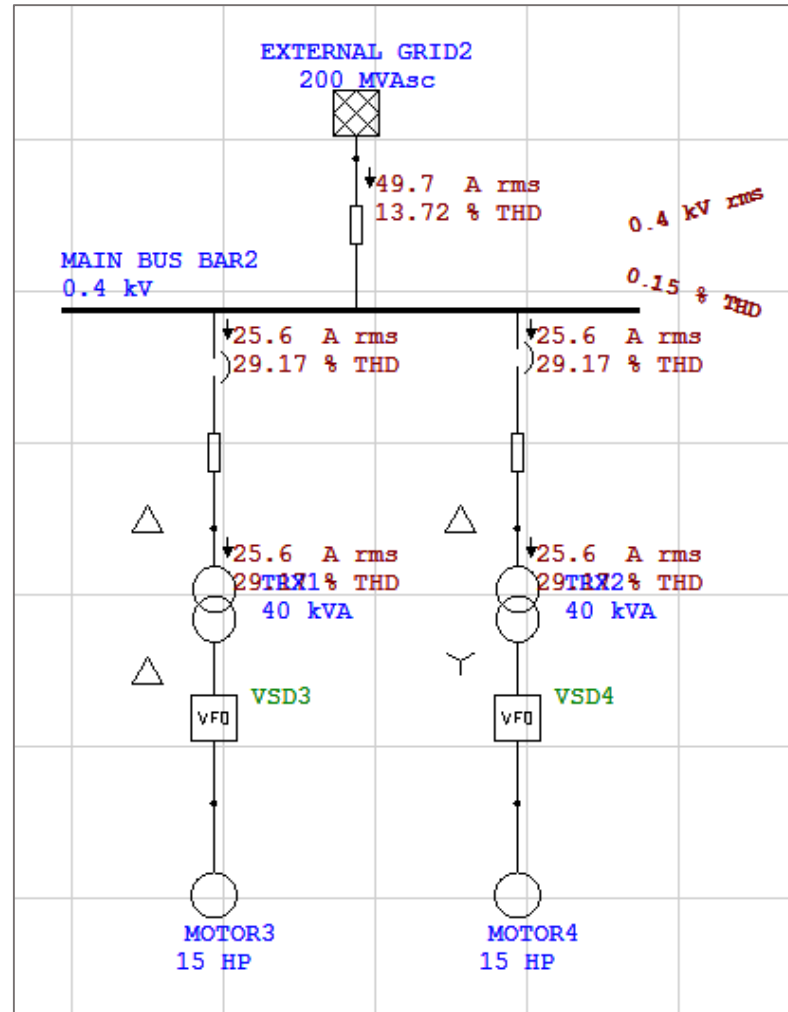


Ilustración 45: Modelo con transformadores

Fuente: Elaboración propia Etap 12.6

En la ilustración 46, se observa el espectro de armónicos del modelo con transformadores para la cancelación de armónicos, los armónicos 5^{to} y 7^{mo} que eran los más representativos, se eliminaron debido al cambio de fase que realizan los transformadores, con lo cual se valida la operación optima del método planteado.

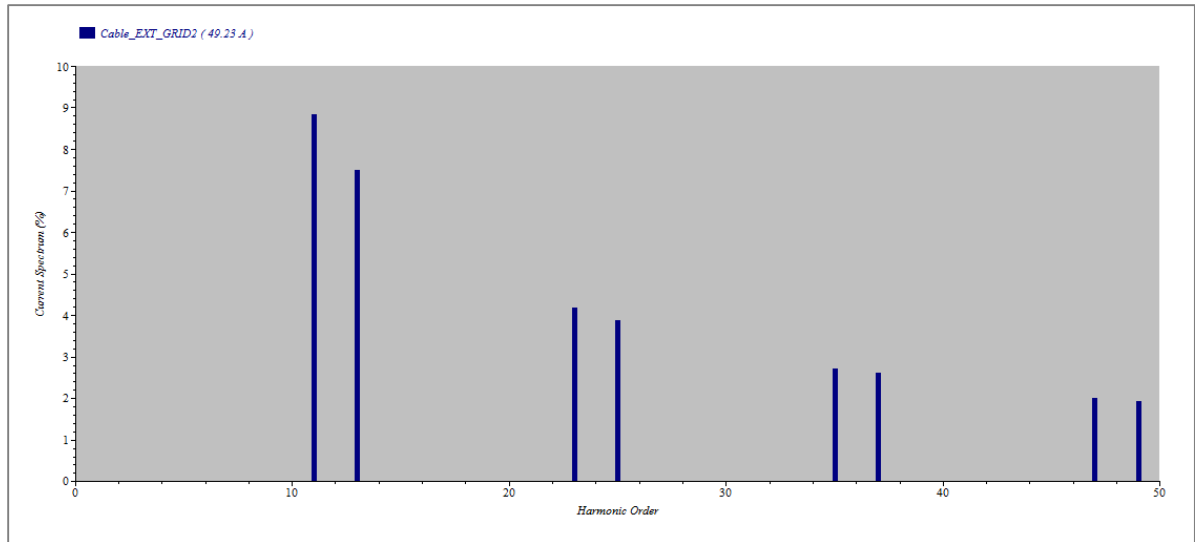


Ilustración 46: Espectro de armónicos con transformadores

Fuente: Elaboración propia Etap 12.6

CONCLUSIONES

- Como conclusión, después del análisis de datos y el modelo del método planteado e implementado para la mitigación de los armónicos, permitió validar la operación optima del método planteado, siendo este el recomendado por las características de las cargas no lineales, la topología de la instalación que se tiene, la operación en paralelo que presentan los equipos o variadores de velocidad, claramente se observa la reducción de los THD de corriente y tensión en el modelo implementado en el software Etap 12.6.
- El tema de armónicos en sistemas eléctricos es muy amplio, esto conlleva el conocimiento de análisis de la electrónica de potencia, los efectos que generan por las conmutaciones que realiza sobre la fuente sinusoidal aplicado y como herramienta para el desarrollo las matemáticas avanzadas, en este trabajo, la parte teórica presenta un desarrollo y fundamentos aplicables para el análisis de armónicos realizado.
- Del monitoreo de los armónicos en los diferentes puntos o tableros seleccionados, con el equipo analizador de redes certificado y con calibración vigente, se obtiene la recopilación de datos de manera segura y confiable, lo cual permite el análisis de datos de forma óptima.
- Se observó claramente, que no siempre una alta distorsión de corriente individual se refleja en un alto valor de distorsión de tensión, para ese caso hay que referirse a los límites recomendados de distorsión de corriente con la norma técnica IEEE-519.

RECOMENDACIONES

- El crecimiento de una planta industrial está de acuerdo con las necesidades de las operaciones y su optimización, en el área eléctrica es importante mantener actualizado los esquemas desarrollados, esquemas unifilares, datos, parámetros de los equipos, esto permitirá realizar trabajos de forma óptima, durante el monitoreo, inspección, instalación y mantenimiento de todo el equipamiento eléctrico de planta.
- Se debe realizar el monitoreo de armónicos y calidad de energía periódicamente, ya que, al insertar nuevos equipos al sistema eléctrico, cambian los parámetros de la red, los cuales pueden cambiar la respuesta del sistema, influyendo a los perfiles de tensión, y pueden afectar a los equipos sensibles a estas variaciones.
- Los sistemas de puesta a tierra tienen mucha importancia para la calidad de energía ya que es un sistema de drenaje de corrientes de modo común, corrientes parasitas, corrientes de falla, entre otros, se debe mantener los niveles de resistencia según las recomendaciones de las normas técnicas menor a 25 ohm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 2014, I.-5. (2014). Practica recomendaciones y requerimientos para el control de armonicos en sistemas electricos de potencia.
2. Corporation, F. (2012). Manual Analizador trifasico y calidad de energia .
3. Dugan, R. C. (2004). *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill.
4. Electric, S. (s.f.). Detecion y filtrado de armonicos.
5. Francisco, D. I. (2006). *Armonics and power system*. New York: CRC.
6. Hart, D. W. (2001). *Electronica de potencia*. Prentice Hall.
7. Hayt, W. H. (2007). *Analisis de circuitos en ingenieria*. Mexico: Mc Graw Hill.
8. IEC-61000. (2002). Compatividad electromagnetica.
9. Irwin, J. D. (1997). *Analisis basico de circuitos en ingenieria*. Mexico: Prentice-Hall.
10. Johnson, D. E. (1996). *Analisis basico de circuitos electricos*. Mexico: Prentice Hall.
11. Kusko, A. (2007). *Power quality in electrical systems*. New York: McGraw-Hill.
12. Nilsson, J. W. (2005). *Circuitos electricos*. España: Printice Hall.
13. Perú, M. d. (2010). Norma Tecnica de Calidad de Servicios Electricos. Lima.
14. Rashid, M. H. (1995). *Electronica de potencia*. Prentice Hall.
15. Rosa, F. C. (2006). *Harmonics and power system*. United States of America: CRC.
16. SRL, P. (2018). Folleto. Arequipa.
17. SRL, P. (s.f.). Enunciado.

ANEXOS

Anexo A: Orden de Servicio de Medición de Armónicos

		Logística AQP S. A. C. RUC - 20454702531 Sociedad Anónima Cerrada Mza. A Lote. 3 Z. I. Parque Industrial Río Seco 1 Etapa (Manzana Prima) Arequipa - Arequipa - Cerro Colorado (LA COMPAÑIA/THE COMPANY)		ORDEN DE COMPRA			
				NÚMERO	REV.		
				67599			
				FECHA DE EXPEDICIÓN 6/07/2021			
				Hoja No.: 01			
PROVEEDOR / VENDOR (96000645) RUC 20601501172 POWENERGY S.R.L. MZA. B LOTE 9 Z.I. PARQUE INDUSTRIAL RIO SECO CERRO COLORADO AREQUIPA ARE PER Tel: 957925352		VIA DE EMBARQUE / SHIP BY NO APLICA					
		CONDICIONES DE EMBARQUE / SHIP CONDITIONS					
CONDICIONES DE PAGO / TERMS		30 DIAS CREDITO		No. REQ. 47908	SOLICITANTE / REQUESTOR PEFCVBAC		
LIN	CÓDIGO ITEM	CANTIDAD QUANTITY	U/M	DESCRIPCIÓN / DESCRIPTION	FECHA ENTREGA SHIP DATE	PRECIO UNITARIO UNIT PRICE	IMPORTE IMPORT
1	MANTTOMAQU	1.000	EA	MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA MEDICION DE PUNTO DE TABLERO GENERAL DE S.E DE PORTUGAL GRAPHICS	06/07/2021	161.01700	161.02
2	MANTTOMAQU	1.000	EA	MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA MEDICION DE PUNTO DE TABLERO CALLE ALFRENT DE PORTUGAL GRAPHICS	06/07/2021	161.01700	161.02
3	MANTTOMAQU	2.000	EA	MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA MEDICION DE PUNTOS EN TABLEROS DE CARGAS NO LINEALES (38 CARGAS)	06/07/2021	161.01700	322.03
4	MANTTOMAQU	1.000	EA	MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA INFORME FINAL DE CALIDAD DE ENERGIA (PORTUGAL GRAPHICS)	06/07/2021	169.49160	169.49
5	GSEGURIHIG	1.000	EA	GASTOS DE SEGURIDAD E HIGIENE SCTR, PRUEBAS COVID	06/07/2021	169.49160	169.49
6	MANTTOMAQU	1.000	EA	MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA GASTOS GENERALES Y UTILIDAD	06/07/2021	147.45700	147.46

Anexo B: Calibración del analizador de redes

SERVICIO TÉCNICO, CALIBRACIÓN Y CERTIFICACIÓN E.I.R.L.

SERVITECC E.I.R.L.

ASEGURAMIENTO METROLÓGICO

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 459-2021

Página: 1 de 3

1. **SOLICITANTE** **POWENERGY SRL**

Dirección **Parque Industrial Río Seco Mz. B lte. 9
CERRO COLORADO - AREQUIPA**

2. **INSTRUMENTO DE MEDICIÓN** **ANALIZADOR DE REDES**

Marca **FLUKE**

Modelo **435-II**

N° de serie **28683102**

Procedencia **RUMANIA**

Alcance de indicación **1000 V(AC)
6000 A (AC)**

División de escala (e) **0.01 V
0.1 A**

Clase de exactitud **±(0.1% de la tensión nominal) (V)
±(0.5% de lectura ± 5 digit) (A)**

Código de identificación **NO INDICA**

3. **FECHA DE CALIBRACIÓN** **2021-04-06**

4. **LUGAR DE CALIBRACIÓN:** Instalaciones de la empresa

5. **MÉTODO DE CALIBRACIÓN:**
La calibración se efectuó por comparación directa con patrones que tienen trazabilidad a los patrones Nacionales de la DM-INACAL, tomando como referencia las recomendaciones de las Normas Internacionales IEC 61326-2-2: "Electrical equipment for measurement, control and laboratory use - EMC requirements - Part 2-2: Particular requirements - Test configurations, operational conditions and performance criteria for portable test, measuring and monitoring equipment used in low-voltage distribution systems".
IEC 61010-2-033: "Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - Part 2-033: Particular requirements for hand-held multimeters and other meters for domestic and professional use, capable of measuring mains voltage."

6. **TRAZABILIDAD:**
Los resultados declarados en este documento tienen trazabilidad a los patrones Nacionales de la Dirección de Metrología DM-INACAL

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
Patrones de Referencia de la DM-INACAL	Medidor / Simulador de señales	LE-102-2021
	Multímetro Digital	LE-149-2020
	BaroTermoHigrometro	LFP-024-2020 / LH-049-2020

7. **RESULTADOS**

- ✓ Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran en la página siguiente del presente documento
- ✓ La incertidumbre de la medición ha sido determinada según la GUÍA PARA LA EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE; con un factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza del 95%.
- ✓ Este Certificado de Calibración cumple con los requisitos técnicos de la Norma Técnica Peruana NTP ISO/IEC 17025 "Requisitos generales para la competencia de laboratorios de Ensayo y Calibración."
- ✓ Se ha colocado una etiqueta autoadhesiva color verde en señal de calibrado.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales de la DM-INACAL o Internacionales, los que realizan las unidades de acuerdo con el sistema Internacional de Unidades (SI).

Los resultados del presente documento son válidos solo para el equipo calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones.

El usuario está obligado recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados, según el uso, mantenimiento y conservación del instrumento.

La empresa no se responsabiliza por el uso inadecuado del instrumento, ni de la incorrecta interpretación de los resultados declarados en este documento.

N° 008399





TI. CARLOS BALDARRAGO BOHORQUEZ
GERENTE TÉCNICO
SERVITECC E.I.R.L.

Prohibida la reproducción total o parcial de este Documento, sin la Autorización de la Empresa.

Anexo C: Datos técnicos del analizador de redes

FLUKE®

Fluke 430 serie II

Analizadores de energía y calidad de potencia trifásica

Datos técnicos

Capacidad de análisis de la calidad eléctrica más detallada y una nueva función de monetización de la energía patentada por Fluke

Los nuevos analizadores de energía y calidad de potencia trifásica 430 Serie II ofrecen el mejor análisis de la calidad eléctrica y presentan, por primera vez, la habilidad de cuantificar las pérdidas de energía en términos monetarios.

Los nuevos modelos Fluke 434, 435 y 437 Serie II ayudan a localizar, predecir, prevenir e identificar problemas de calidad de la energía en sistemas de distribución trifásicos y monofásicos. Además, el algoritmo de pérdida de energía patentado por Fluke, UPM (Unified Power Measurement, medida de energía unificada) mide y cuantifica las pérdidas de energía causadas por armónicos y problemas de desequilibrio, permitiendo al usuario localizar con exactitud el origen de la pérdida de energía en un sistema.



- **Calculadora de pérdida de energía:** Mediciones de energía activa y reactiva clásica, desequilibrio y potencia de armónicos son cuantificados para localizar pérdidas reales de energía en el sistema en dólares (otras divisas locales disponibles).
- **Eficiencia del inversor de potencia:** Mide simultáneamente la potencia de salida CA y la potencia de entrada CC para sistemas electrónicos de potencia usando la pinza CC opcional.
- **Captura de datos PowerWave:** Los analizadores 435 y 437 de la Serie II capturan rápidamente datos RMS, muestran medios ciclos y formas de onda para caracterizar las dinámicas de los sistemas eléctricos (arranques de generadores, conmutación de UPS, etc.).
- **Captura de forma de onda:** Los modelos 435 y 437 de la Serie II capturan 100/120 ciclos (50/60 Hz) de cada evento que se detecta en todos los modos, sin configuración.
- **Modo automático de transitorios:** Los analizadores 435 y 437 de la Serie II capturan datos de formas de onda de 200 kHz en todas las fases simultáneamente hasta 6 kV.
- **Completamente compatible con la clase A:** Los analizadores 435 y 437 de la Serie II realizan pruebas conforme a la exigente norma internacional IEC 61000-4-30 Clase A.
- **Señalización de la red eléctrica:** Los analizadores 435 y 437 de la Serie II miden interferencias causadas por señales de control de cargas a frecuencias específicas.
- **Medición de 400 Hz:** El analizador 437 de la Serie II captura mediciones de la calidad de potencia eléctrica en sistemas de energía militares o los utilizados en aviones.
- **Identificación de problemas en tiempo real:** Analice las tendencias utilizando cursores y la función zoom.
- **La clasificación de seguridad más alta de la industria:** 600 V CAT IV/1000 V CAT III Clasificado para uso en la entrada del servicio.
- **Mida las tres fases y el neutro:** Con cuatro puntas de prueba de corriente flexibles incluidas con un mejorado diseño delgado para adaptarse a los lugares más estrechos.
- **Tendencia automática:** Cada medición se registra siempre automáticamente, sin necesidad de configuración alguna.
- **Monitor del sistema:** Diez parámetros de calidad de potencia en una sola pantalla, de acuerdo con la norma de calidad de potencia eléctrica ENSO160.
- **Función de registrador:** Configurado para cualquier condición de prueba con memoria de hasta 600 parámetros a intervalos definidos por el usuario.
- **Visualización de gráficos y generación de informes:** Con el software de análisis incluido.
- **Vida útil de la batería:** Siete horas de tiempo de funcionamiento por carga en un pack de baterías de ión litio.

El analizador de la calidad de energía y potencia eléctrica trifásica 437 Serie II estará disponible a principios del 2012

Medición de Potencia Eléctrica Unificada

El sistema de Medición de Potencia Eléctrica Unificada (UPM) patentado por Fluke proporciona la visión más completa de potencia eléctrica disponible, midiendo:

- Parámetros de Potencia Eléctrica Clásicos (Steinmetz 1897) y Potencia Eléctrica IEEE 1459-2000
- Análisis detallado de la pérdida
- Análisis de desequilibrio

Estos cálculos UPM se utilizan para cuantificar el costo fiscal de la pérdida de energía causados por problemas de la calidad eléctrica. Los cálculos se realizan utilizando información específica de la instalación, utilizando la calculadora de pérdida de energía y ésta determina cuánto dinero se pierde en una empresa debido al derroche de energía.

Ahorro de energía

Tradicionalmente los ahorros de energía se consiguan controlando y fijando objetivos o, en otras palabras, localizando las mayores cargas en una instalación y optimizando su funcionamiento. El costo de la calidad eléctrica sólo puede cuantificarse en términos de tiempo de inactividad causado por la pérdida de la producción y el daño del equipo eléctrico. El método de Medición de Potencia Eléctrica Unificada (UPM) va más allá para lograr conseguir ahorro de energía mediante la detección del derroche de energía causado por problemas de la calidad eléctrica. Utilizando la Medición de Potencia Eléctrica Unificada, la Calculadora de Pérdida de Energía de Fluke (consulte la captura de pantalla siguiente) determinará cuánto dinero pierde una instalación debido al derroche de energía.

Desequilibrio

La tecnología UPM proporciona un desglose más completo de la energía consumida en la planta. Además de medir la potencia reactiva (causada por un factor de potencia insuficiente), UPM también mide el derroche de energía causado por desequilibrio; el efecto de cargar cada fase de manera desigual en sistemas trifásicos. El desequilibrio puede corregirse a menudo volviendo a conectar cargas en diferentes fases para asegurar que la corriente consumida en cada fase sea lo más uniforme posible. El desequilibrio también puede corregirse con la instalación de un dispositivo de reactancia de desequilibrio (o filtro) que minimizará los efectos. La corrección del desequilibrio debe considerarse una tarea básica del mantenimiento de la instalación, ya que los problemas de desequilibrio pueden causar fallas en el motor o reducir la vida útil del equipo. El desequilibrio también derrocha energía. El uso de UPM puede minimizar o eliminar dicho derroche de energía y proporcionar un ahorro económico.

Armónicos

UPM proporciona también detalles de la energía derrochada en la instalación debido a la presencia de armónicos. Los armónicos en su red eléctrica, pueden generarse debido a cargas internas o a cargas de empresas adyacentes. La presencia de armónicos en su instalación puede producir lo siguiente:

- sobrecalentamiento de transformadores y conductores
- disparo inesperado de los interruptores automáticos
- fallas prematuras del equipo eléctrico

La cuantificación del costo de la energía derrochada debido a la presencia de armónicos, simplifica el cálculo del retorno de la inversión necesario para justificar la adquisición de filtros de armónicos. Con la instalación de un filtro de armónicos, pueden reducirse los efectos nocivos de los armónicos y eliminarse el derroche de energía, obteniendo costos operativos inferiores y un funcionamiento más confiable.

Calculadora de pérdida de energía

Kilovatios (potencia) útiles disponibles
 Kilovatios inutilizados por armónicos
 Kilovatios inutilizados por problemas de desequilibrio
 Horas totales de kilovatios derrochados facturables
 Costo total de horas de kilovatios derrochados

Energy Loss Calculator

		0:03:26		U P  	
	Total	Loss	Cost		
Effective kW	35.9	W 488	\$	48.83	/hr
Reactive kvar	21.5	W 175	\$	17.49	/hr
Unbalance kVA	2.52	W 1.5	\$	0.15	/hr
Distortion kVA	7.17	W 57.2	\$	5.72	/hr
Neutral A	29.3	W 57.7	\$	5.77	/hr
Total			k \$	683	/y
11/10/11 10:49:38 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160					
LENGTH	DIAMETER	METER	RATE	HOLD	
100 m	25 mm2		0.10 /kWh	RUN	

Tabla de selección del Analizador de Calidad de Potencia Eléctrica 430 serie II

Modelo	Fluke 434-II	Fluke 435-II	Fluke 437-II
Cumplimiento de norma estándar	IEC 61000-4-30 Clase S	IEC 61000-4-30 Clase A	IEC 61000-4-30 Clase A
Voltios Amperios Hz	•	•	•
Caídas de tensión y sobretensiones	•	•	•
Armónicos	•	•	•
Potencia y energía	•	•	•
Calculadora de pérdida de energía	•	•	•
Desequilibrio	•	•	•
Monitor	•	•	•
Corriente de arranque	•	•	•
Captura de forma de onda de evento		•	•
Flicker (Fluctuaciones rápidas de tensión)		•	•
Transitorios		•	•
Señalización de la red		•	•
Onda de potencia		•	•
Eficacia del inversor de potencia	•	•	•
400 Hz			•
Estuche blando, modelo C1740	•	•	
Maletín rígido con ruedas, modelo C437-II			•
Tarjeta SD (máx. 32 GB)	8 GB	8 GB	8 GB

Todos los modelos incluyen los siguientes accesorios: juego de puntas de prueba, modelo TL430, 4 puntas de prueba de corriente flexibles delgadas, modelo i430, batería, modelo BP290, adaptador de corriente, modelo BC430 con juego de adaptadores de potencia internacional, cable USB A-B mini y CD PowerLog.

Especificaciones técnicas

Las especificaciones son válidas para los modelos Fluke 434-II, Fluke 435-II y Fluke 437-II a menos que se especifique de otro modo.

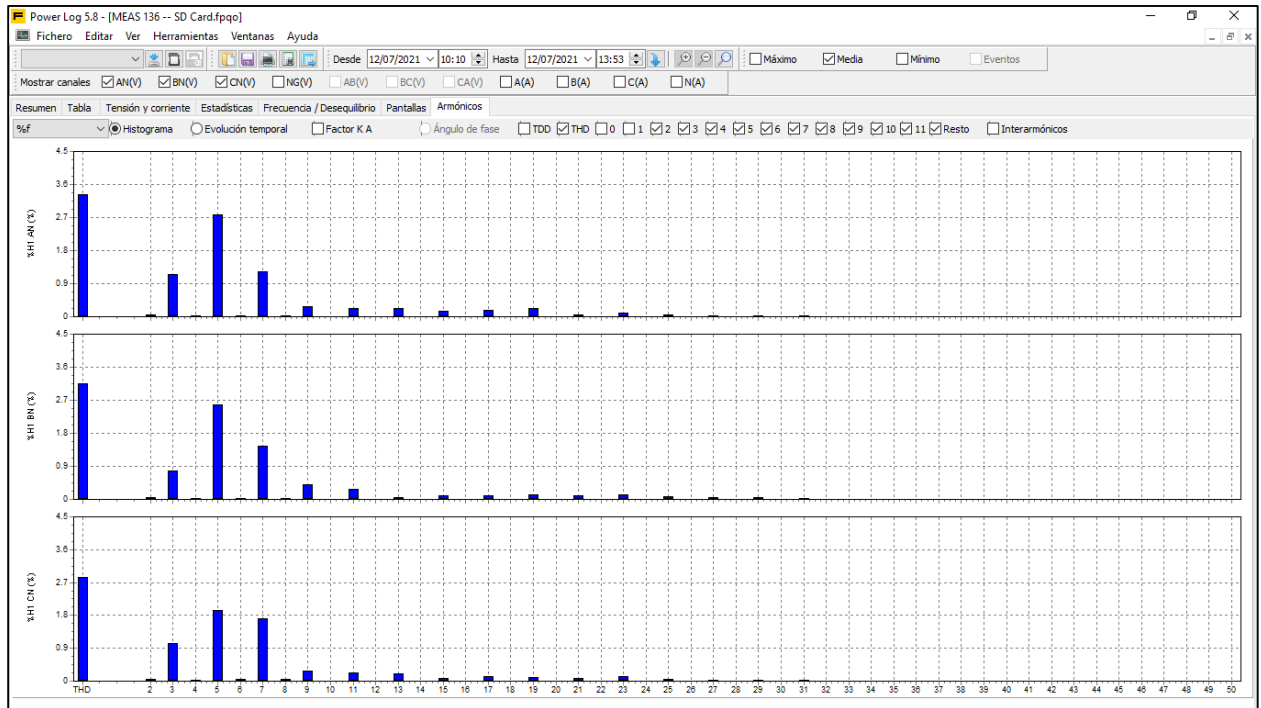
Las especificaciones de amperios y vatios se basan en las puntas de prueba, modelo i430-Flexi-TF a menos que se especifique de otro modo.

Características de entrada

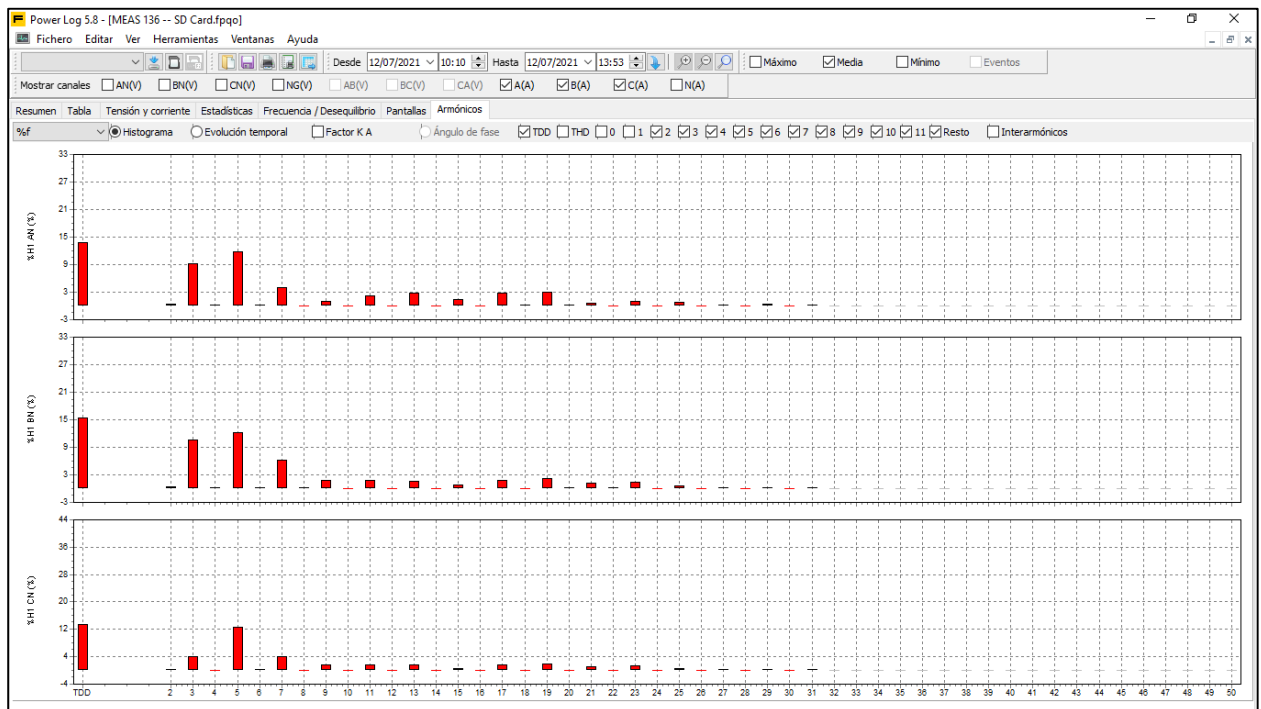
Entradas de voltaje	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro) acopladas a CC
Máximo voltaje de entrada	1.000 Vrms
Rango de voltaje nominal	1 V a 1000 V seleccionable
Máximo voltaje de medición pico	6 kV (modo de transitorios sólo)
Impedancia de entrada	4 MΩ/5 pF
Ancho de banda	> 10 kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios
Escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable
Entradas de corriente	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro) acopladas a CC o CA
Tipo	Pinza o transformador de corriente con salida mV o punta de prueba, modelo i430flex-TF
Rango	0,5 Arms a 600 Arms con punta de prueba, modelo i430flex-TF incluida (con sensibilidad 10x) 5 Arms a 6000 Arms con punta de prueba, modelo i430flex-TF incluida (con sensibilidad 1x) 0,1 mV/A a 1 V/A y personalizado para utilizar con pinzas CA o CC opcionales
Impedancia de entrada	1 MΩ
Ancho de banda	> 10 kHz
Escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable

Anexo D: Espectro de armónicos mediante software Power log 5.8

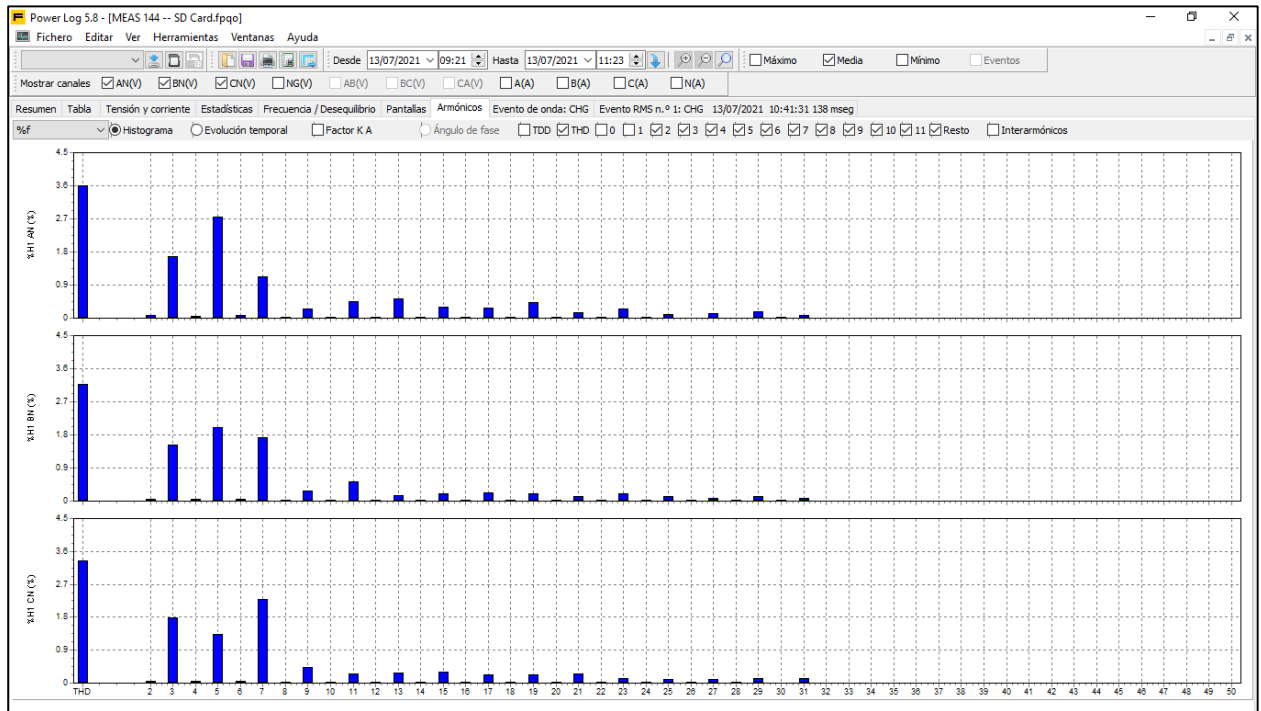
Armónicos de tensión tablero TP-I



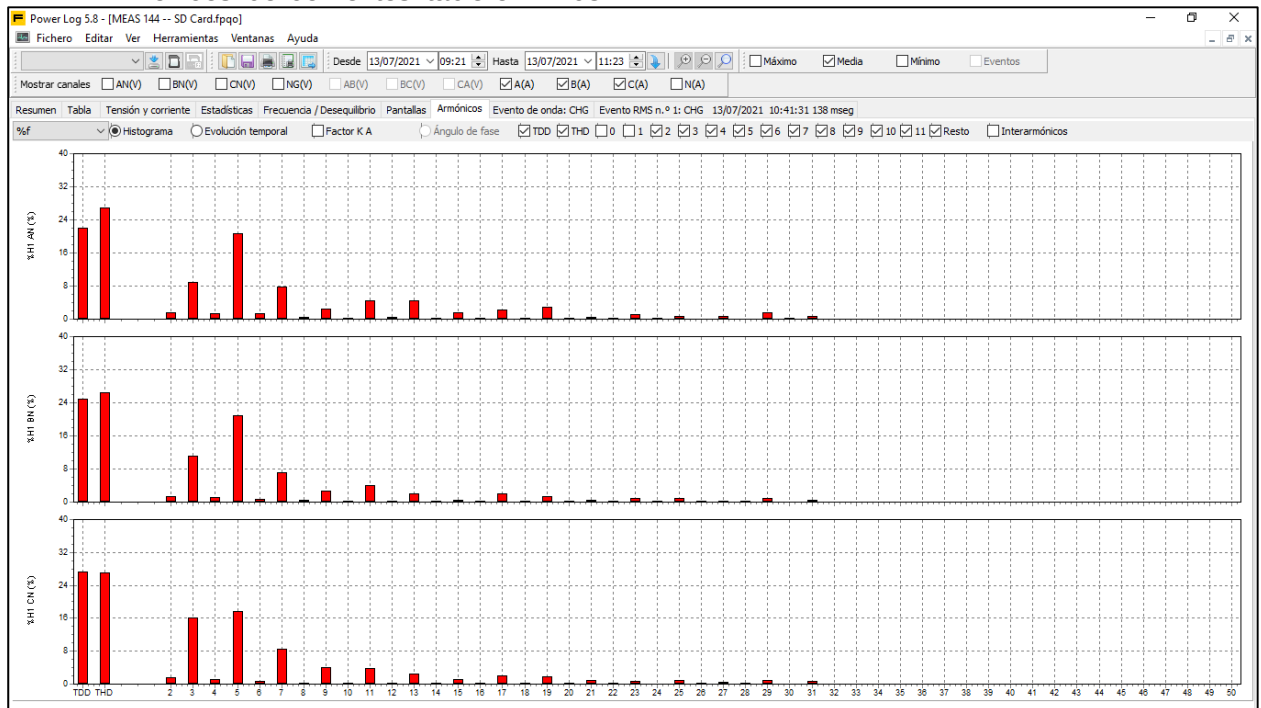
Armónicos de corrientes tablero TP-I



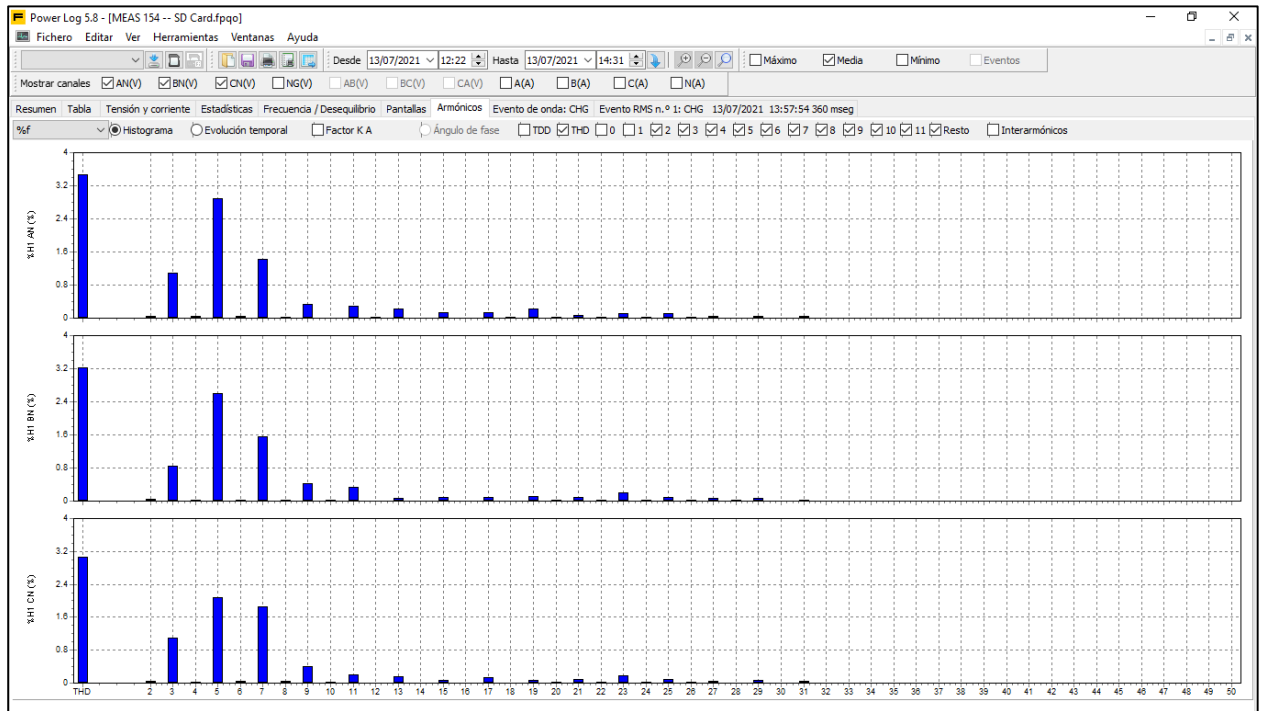
Armónicos de tensión tablero TD-03



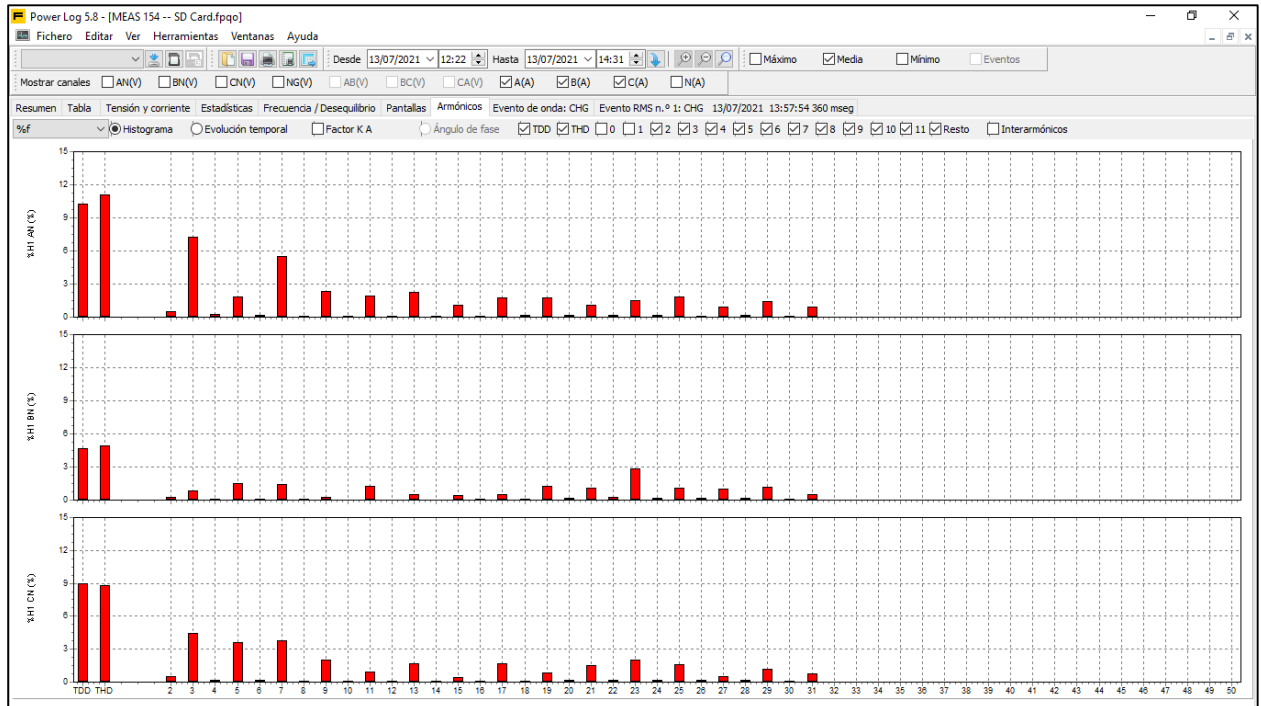
Armónicos de corrientes tablero TD-03



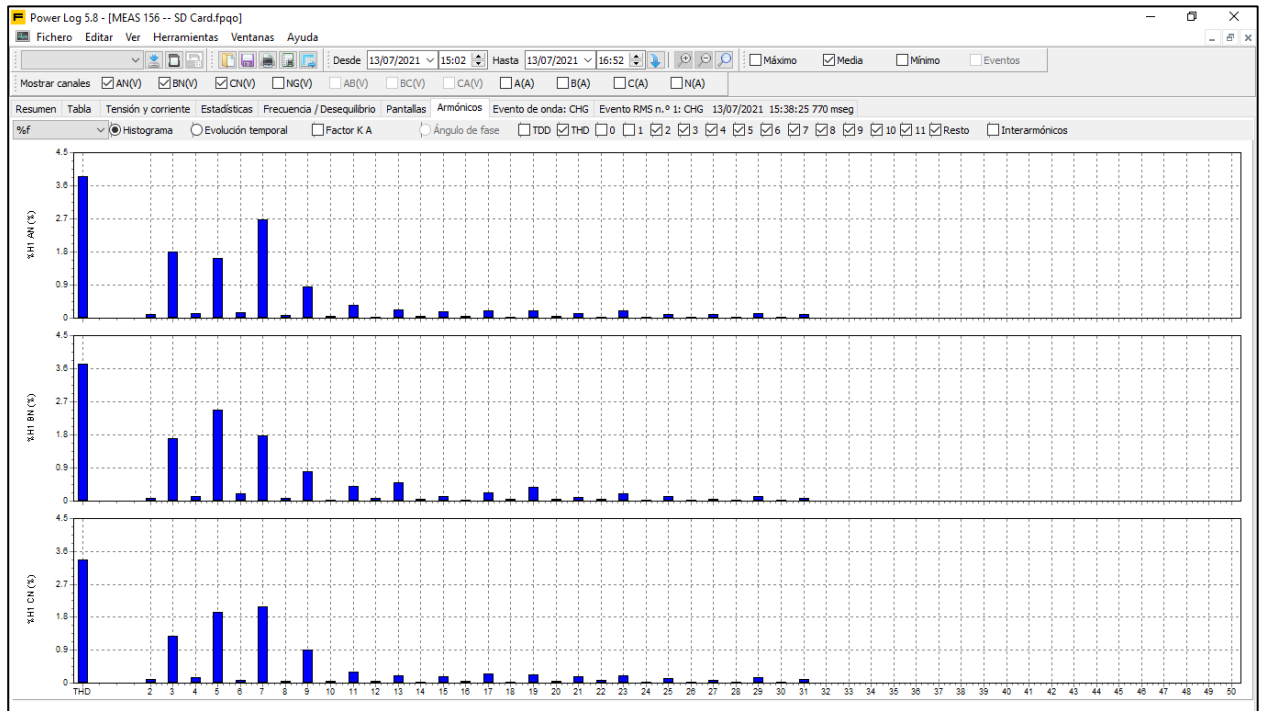
Armónicos de tensión tablero TD-01



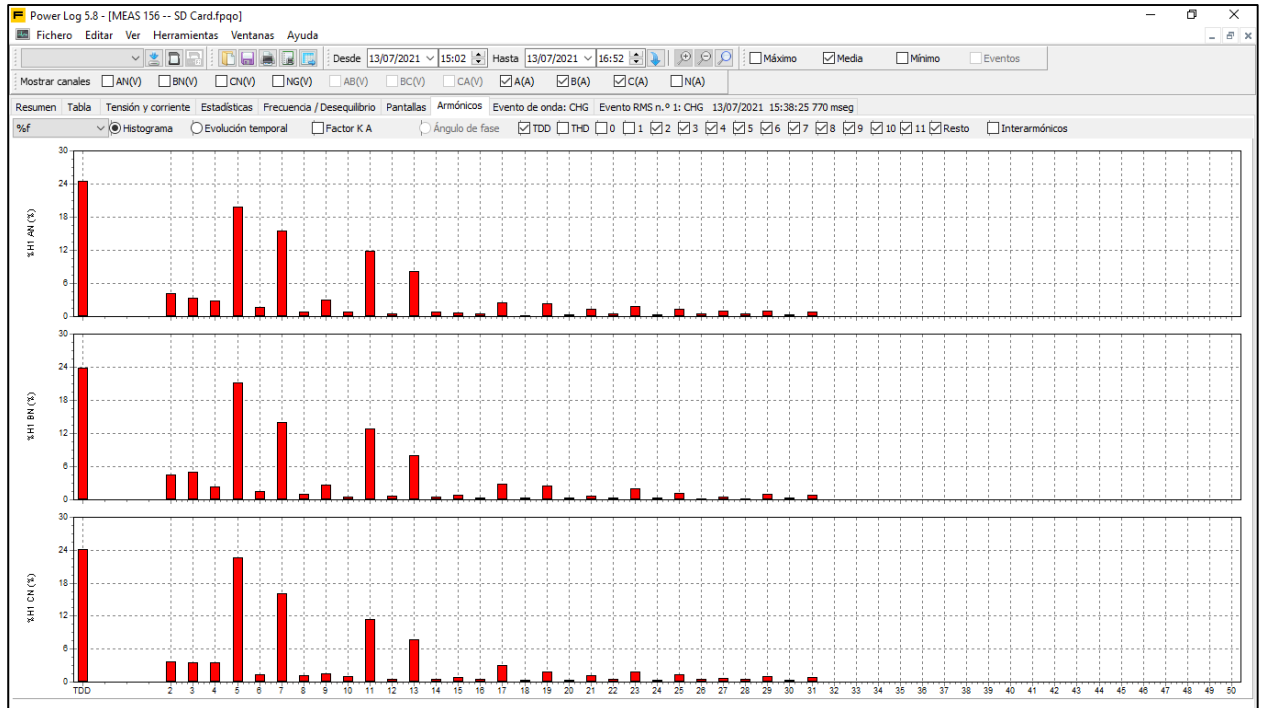
Armónicos de corrientes tablero TD-01



Armónicos de tensión tablero TD-07



Armónicos de corrientes tablero TD-07



Anexo E: Procedimiento de Medición de Armónicos y Calidad de Energía con Analizador de Redes Fluke Serie 435-II

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 1 DE 13		

1. OBJETIVO:

Identificar los peligros, evaluar y controlar los riesgos para evitar incidentes y/o enfermedades ocupacionales que afecten la vida y la salud de todo el personal involucrado a la empresa POWENERGY SRL y evitar que se produzcan impactos negativos al medio ambiente durante el desarrollo de los trabajos de "MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES".

2. PERSONAL

Supervisor de Mantenimiento Eléctrico

- Asegurar que el personal que realiza este diagnóstico tenga pleno conocimiento del presente procedimiento.
- Instruir al personal en los riesgos y controles de la tarea, mediante la revisión del procedimiento antes de iniciar el trabajo.

Técnico Electricista

- Observar y controlar los riesgos alrededor de su área de trabajo.
- Cumplir con el presente procedimiento.

Calificaciones del Personal

- El personal que realice el diagnóstico y monitoreo con el ANALIZADOR DE REDES, recibirá la orientación y capacitación necesaria sobre la instalación, configuración, manipulación del equipo en mención.
- El personal que intervendrá en el monitoreo con el ANALIZADOR DE REDES, debe ser un Técnico Electricista con experiencia de 02 años en este tipo de trabajos.

3. EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL

- Lentes de seguridad
- Tapones auditivos u orejeras
- Cascos de seguridad
- Zapatos de seguridad dieléctricos
- Guantes de seguridad dieléctricos para baja tensión (600 V)

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 2 DE 13		

4. EQUIPO / HERRAMIENTAS / MATERIALES

- Analizador de redes Fluke serie 435-II, Certificado
- Detector de voltaje en Baja Tensión
- Multímetro digital o Revelador de Tensión

5. PROCEDIMIENTO: Configuración e Instalación del Analizador de Redes

5.1. Realizar una inspección visual del transformador de distribución, y el interior del tablero de distribución a monitorear, para definir:

5.1.1. El tipo o esquema de distribución del sistema, Delta/Delta, Delta/Estrella-Neutro, etc.

5.1.2. Verificación del nivel de tensión, ejemplo 10000/400-230 VAC en celda de media tensión y tablero de distribución, puede ser con el instrumento del tablero de media tensión o con un voltímetro en el lado de baja tensión.

5.1.3. Definir el sentido del flujo de corriente y los puntos de instalación de las pinzas de corriente y puntas de prueba de tensión, en el tablero de distribución y sub tableros en baja tensión.

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 4 DE 13		

5.2. Inspección visual del equipo ANALIZADOR DE REDES, con la finalidad de tener el equipo de monitoreo en buenas condiciones de operación:

- Pinzas de corriente, en buenas condiciones.
- Puntas de prueba de tensión "cocodrilos", los cables no deben tener daños en el aislamiento, las puntas de prueba y conectores hacia el instrumento deben estar en buenas condiciones.
- La batería del equipo debe tener mayor al 80% de carga.
- Los puntos de conexión o entrada del equipo e monitoreo, deben estar en buenas condiciones.



Figura-2 Analizador de redes, Fluke 435-II y accesorios de medición

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 5 DE 13		

5.3. Configuración del ANALIZADOR DE REDES, de acuerdo a la información obtenida en la inspección del sistema de distribución, la configuración se realiza de acorde a esta información, con lo cual se conseguirá que el monitoreo y análisis de los armónicos sean correctos.

Se inicia en la pantalla de configuración, Ingresando la fecha y hora, frecuencia y tensión nominal, luego la topología de la red eléctrica.

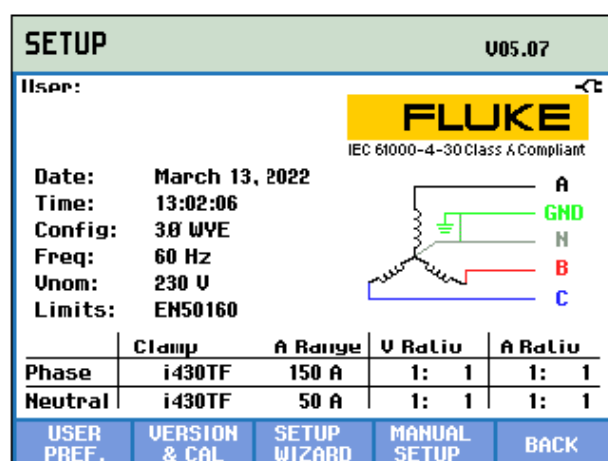


Figura-3 Ventana principal de configuración del analizador de redes, Fluke 435-II

La topología de la red es muy importante, ya que en base a esta información se instalaran las sondas o pinzas de corriente y puntas de prueba de tensión, también las relaciones de transformación si la medición es directa o por medio de transformador de corriente o tensión, ejemplo puede ser

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 6 DE 13		

para el tipo de conexión 3Fases WYE estrella, el nivel de tensión se configura teniendo en cuenta la tensión de fase, como las mediciones son directas, la sonda de corriente utilizado es el i430TF de 600 amperios y las tensiones también directas pueden ser de 400 voltios.

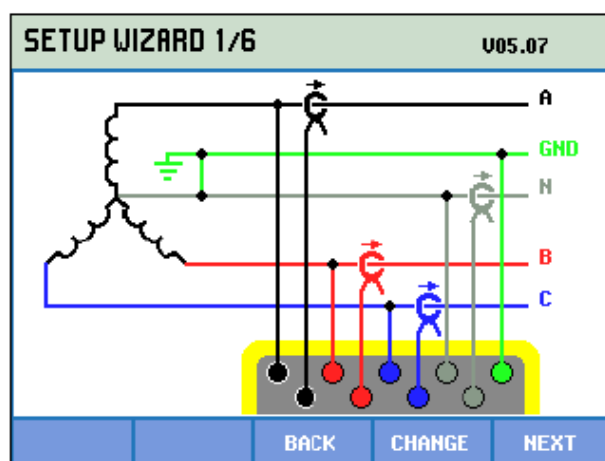


Figura-4 Ventana #1 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

El equipo analizador de Fluke 435-II, nos proporciona un soporte de ayuda "Wizard" para la configuración del equipo, los cuales nos permite configurar el equipo de una manera rápida y eficaz, estas ventanas de ayuda se muestran en las figuras siguientes.

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 7 DE 13		

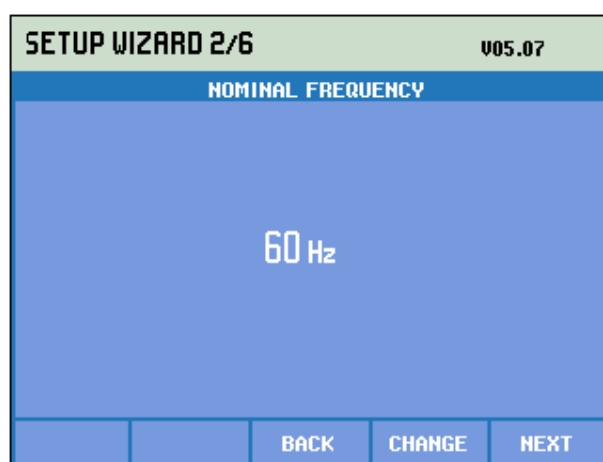


Figura-5 Ventana #2 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

La relación de tensión a medir, el instrumento toma como referencia la tensión de fase $V_{LL}/1.73$ para la configuración estrella y la tensión de línea V_{LL} , para la configuración delta, la relación de transformación 1:1 para una medición directa, ese detalle se observa en la siguiente figura.

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 8 DE 13		

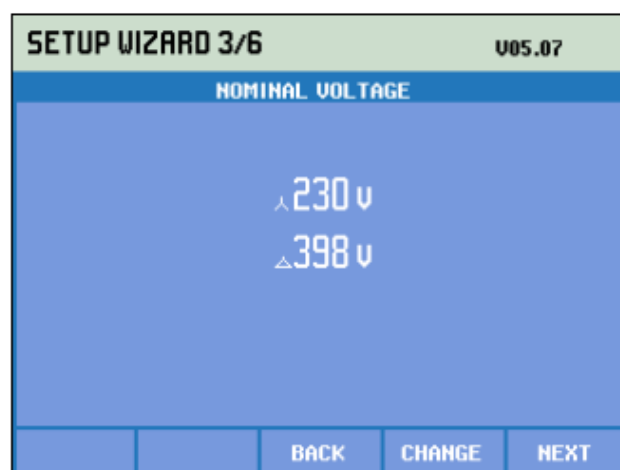


Figura-6 Ventana #3 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

El equipo Fluke 435-II, tiene una compatibilidad con la norma europea EN50160 de calidad de energía eléctrica, lo cual toma como referencia para los límites de las variables medidas de calidad de energía.

La Norma UNE-EN 50160, específicamente tiene el objetivo de supervisar las características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución, aprobada por CENELEC en 1.994, define las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión, en condiciones normales de explotación, en el punto de entrega al cliente.

En la siguiente figura, se observa la configuración del equipo para tener como límites, si hay algún dato por encima del margen que estipula esta norma, el equipo indicara la anormalidad de la variable medida.

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 9 DE 13		

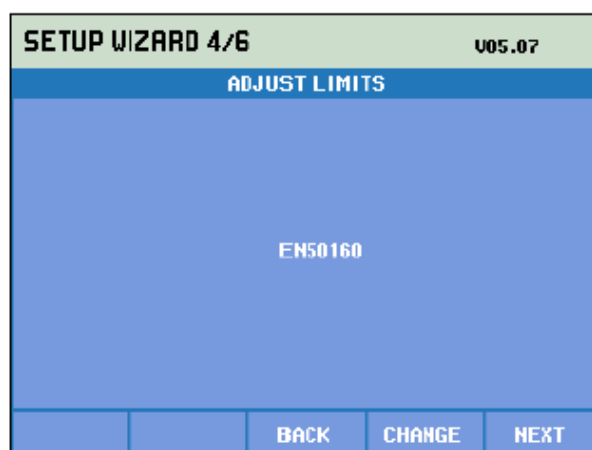


Figura-7 Ventana #4 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

Las sondas de corriente utilizado es el i430TF, este accesorio viene equipado con el analizado de redes, tiene la capacidad de medir desde 400 miliamperios hasta 600 amperios, para colocar el rango de medición es recomendable tener una referencia de la demanda, como ejemplo para medir 100 amperios, se sugiere configurar 150 amperios mayor en 1.5 veces del valor de demanda de corriente, como la medición es directa la relación de transformación será 1:1.

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 10 DE 13		

SETUP WIZARD 5/6		U05.07	
CURRENTCLAMP SETTINGS			
	PHASE	NEUTRAL	
Amp clamp:	1430TF	1430TF	
Clamp range:	AUTO	AUTO	
Nominal range:	150 A	50 A	
Sensitivity:	×1	×1	
Ratio:	1:1	1:1	
		BACK	NEXT

Figura-8 Ventana #5 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

Para el caso de medición de tensión, si la medición es directa, se puede configurar a 400 voltios, ya que no se cuenta con un transformador de tensión, por ello la relación de transformación es 1:1, si se realiza el monitoreo en media tensión esta relación de transformación es diferente.

SETUP WIZARD 6/6		U05.07	
VOLTAGE PROBE SETTINGS			
	PHASE	NEUTRAL	
Volt ratio:	1:1	1:1	
		BACK	NEXT

Figura-9 Ventana #6 de ayuda del analizador de redes, Fluke 435-II

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 11 DE 13		

5.4. Instalación del ANALIZADOR DE REDES, se debe toma en cuenta de forma primordial la seguridad del personal Técnico, debe contar con la capacidad de realizar este trabajo y contar con los equipos de protección personal para la instalación de las sondas de corriente y puntas de prueba de tensión en los tableros.

La instalación del equipo analizador de redes, se realiza tomando como referencia a la inspección realizada en el párrafo 5.1.3, donde se ubicó los puntos de conexión de las sondas de corriente y puntas de prueba de tensión.

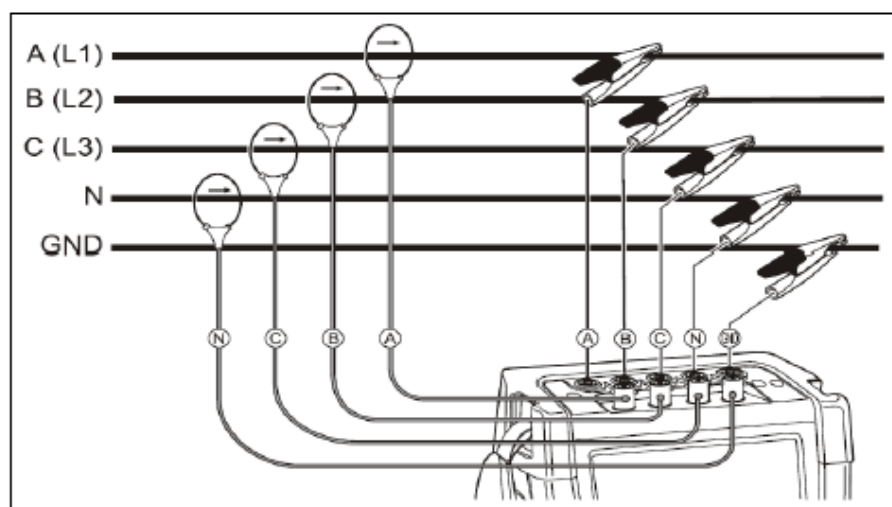


Figura-10 Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 12 DE 13		

Luego de realizar las conexiones en el tablero a monitorear, se debe verificar en el analizador la correcta conexión de los puntos de medición, esto mediante el diagrama vectorial de corrientes y tensión, con la ayuda del teclado "SCOPE" y "PHASOR".

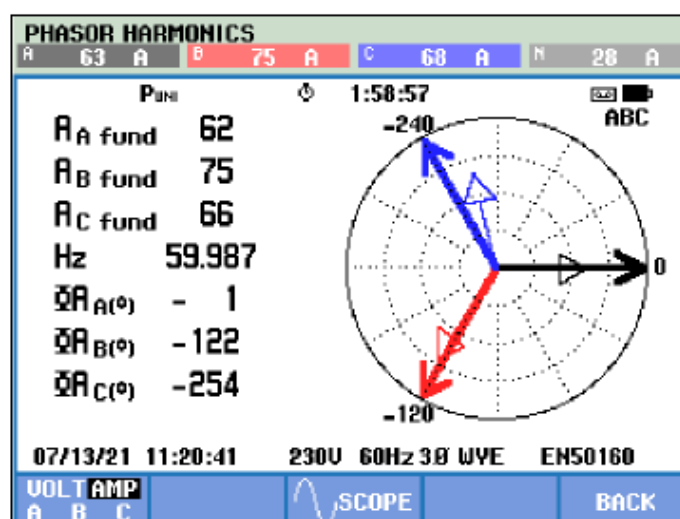


Figura-11 Conexión correcta del analizador con el sistema de distribución trifásico

CODIGO: PWE-PETS-OP-020	PROCEDIMIENTO	
FECHA: 07/05/2019	MONITOREO DE ARMONICOS Y CALIDAD DE ENERGIA CON ANALIZADOR DE REDES	
VERSION: 0		
PÁGINA 13 DE 13		

Finalmente, para iniciar el monitoreo de armónicos, se realiza con la ayuda de la tecla "MENU" y seleccionar "Harmonics", se pone en marcha el monitoreo correspondiente, durante el tiempo definido.

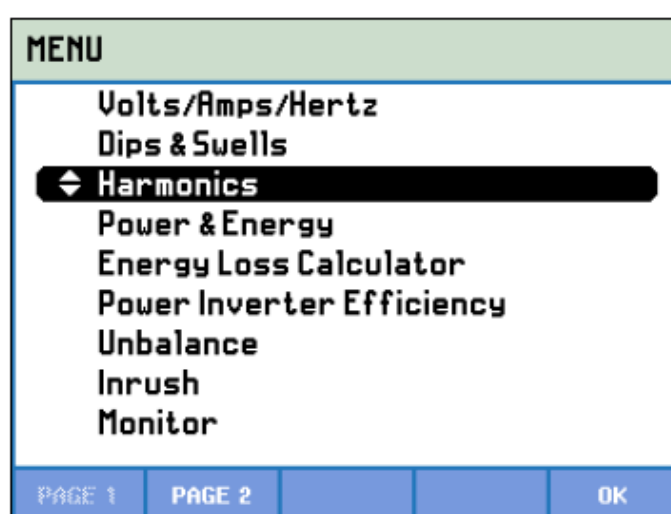


Figura-12 Pantalla inicio de monitoreo de armónicos

Procedimiento aprobado por Gerencia General de Powenergy S.R.L.


 POWENERGY S.R.L.
 Mary Zuñiga Gutiérrez
 GERENTE GENERAL