

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD



PROYECTO FINAL DE GRADO

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

AUTOR: MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ

**TUTOR: PROF. ING. NELSON GUSTAVO AGUIRRE
ALCARAZ**

CO TUTOR: ING. AGUSTIN JUNIOR VERA GODOY

CORONEL OVIEDO, DICIEMBRE DE 2024



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.



Usted es libre de:

- **Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
- **Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material

Bajo los siguientes términos:

- **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.
- **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

DERECHO DE AUTOR

Quien suscribe, Marcelo Elías Campos Benítez, autor del trabajo de investigación titulado **“Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá”**, declara que voluntariamente cede a título gratuito en forma pura y simple ilimitada e irrevocablemente a favor de la Facultad de Ciencias y Tecnologías – UNCA, el derecho de autor de contenido patrimonial, que le corresponde sobre el trabajo de referencia. Conforme a lo anteriormente expresado, esta sesión le otorga a la FCyT la Facultad de comunicar la obra divulgarla, publicarla y reproducirla en soportes analógicos o digitales en la oportunidad que así lo estime conveniente. La FCyT deberá indicar qué autoría o creación del trabajo corresponde a mi persona y hará referencia al autor y a las personas que hayan colaborado en la realización del presente trabajo de investigación.

En la ciudad de Coronel Oviedo a los , del mes de diciembre del 2024

.....

Firma



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electricista, aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores y con la siguiente nota final:

CALIFICACIÓN FINAL: _____

ACTA N°: _____

FECHA : _____

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentido crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

DEDICATORIA

A mis padres Ángel Campos y Luz Benítez por su apoyo durante todo este proceso y ayudarme a cumplir mis metas.

A mi hermano Mario Campos por acompañarme durante este recorrido.

A Luz González por su ayuda constante.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen María.

A mi tutor el Ing. Nelson Aguirre y cotutor el Ing. Agustín Vera.

Al Ing. Emilc Gómez.

Al Ing. Pedro González.

A la Facultad de Ciencias y Tecnologías, por darme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente.

A la Ing. Lucia Benítez.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

RESUMEN

Se realizó un relevamiento de datos técnicos de las instalaciones eléctricas en la línea de producción de filtros y empaque, identificando que el 70,4% de la potencia instalada en cada línea corresponde a cargas no lineales, como variadores de frecuencia y fuentes conmutadas. Para analizar los armónicos hasta el orden 50, según lo establece la norma IEEE-519, se midieron magnitudes eléctricas en esta línea de producción utilizando el analizador de redes EXTECH PQ3350.

Los resultados mostraron tasas de distorsión de la demanda total en corriente (TDD) del 22,4% al 26,7%, superando el límite de referencia del 8% indicado en la norma. Asimismo, las tasas de distorsión armónica total (THD) en voltaje variaron entre el 8,3% y el 15,3%, también por encima del límite de referencia del 8%.

Dado el elevado nivel de distorsión armónica en el sistema, se determinó que la solución más eficaz sería un filtro activo de armónicos con una capacidad de 75 amperios, el cual permitirá una reducción adaptativa de armónicos en un amplio rango. El presupuesto para esta alternativa asciende a un total de 18.801 USD.

Palabras clave: Industria, innovación e infraestructura (ODS 9), Consumo y producción responsables (ODS 12), Distribución de Energía Eléctrica en ambientes industriales.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ABSTRACT

A technical data survey of the electrical installations in the filter and packaging production line was carried out, identifying that 70.4% of the installed power in each line corresponds to non-linear loads, such as frequency inverters and switched-mode power supplies. To analyze harmonics up to order 50, as established by the IEEE-519 standard, electrical magnitudes were measured in this production line using the EXTECH PQ3350 network analyzer.

The results showed total current demand distortion (TDD) rates of 22.4% to 26.7%, exceeding the reference limit of 8% indicated in the standard. Likewise, voltage total harmonic distortion (THD) rates ranged from 8.3% to 15.3%, also above the 8% reference limit.

Given the high level of harmonic distortion in the system, it was determined that the most effective solution would be an active harmonic filter with a capacity of 75 amps, which will allow for adaptive harmonic reduction over a wide range. The budget for this alternative amounts to a total of 18,801 USD.

Key words: Industry, innovation and infrastructure (SDG 9), Responsible consumption and production (SDG 12), Distribution of electrical energy in industrial environments.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE

DERECHO DE AUTOR	2
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos.....	2
ANTECEDENTES	3
MARCO TEÓRICO.....	5
Definiciones [4]	5
Filtros de armónicos.....	5
Efectos de los armónicos [5]	5
Efectos de las armónicas sobre equipos específicos [5]	7
Tipos de potencias.....	7
Factor de potencia.....	7
Potencia Activa.....	8
Potencia Reactiva.....	8
Tetraedro de potencias (Definiciones de Budeanu)	9
Descomposición de Fourier para Análisis de Armónicos.....	10
Conceptos Básicos de la Serie de Fourier	11
Análisis de Armónicos.....	11
Cargas no lineales	12
Variadores de frecuencia.....	13
Fuentes conmutadas.....	15
Tipos de Filtros de Armónicos.....	16



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

Filtros pasivos	16
Filtros activos	17
Beneficios de los Filtros de Armónicos	17
Norma IEEE-519 2022 [4]	17
METODOLOGÍA	19
1. Relevamiento de datos	19
1.1. Ubicación y descripción de la empresa	19
2. Listado de Cargas no lineales	21
3. Medición de armónicos	22
3.1. Equipo utilizado	22
Descripción General	22
Características Principales	22
Especificaciones Técnicas	23
Funciones Adicionales.....	23
Aplicaciones Comunes	24
Ventajas y Desventajas	24
Ubicación del instrumento de medición.....	25
4. Límites de distorsión armónica [4]	26
4.1. Límites de distorsión armónica de voltaje.....	26
4.1.1. THD Voltaje V_1	27
4.1.2. THD Voltaje V_2	28
4.1.3. THD Voltaje V_3	30
4.2. Límites de distorsión armónica de corriente	31
4.2.1. TDD Corriente I_1	33
4.2.2. TDD Corriente I_2	36
4.2.3. TDD Corriente I_3	38



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

5. Alternativa propuesta	41
6. Presupuesto	42
RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	1
Anexo 1	1
A.1. Dimensionamiento del filtro	1
Anexo 2	4
A.2. Datos técnicos del filtro seleccionado	4
A.2.2. Esquema eléctrico para la instalación	7
Anexo 3	8
A.3. Tablas y gráficos de lecturas	8
A.3.1. Intensidades de línea	8
A.3.2. Comparativa de TDD% con intensidades de línea	10
A.3.3. Comparativa de armónicos de corriente de las componentes impares de I_1 ...	12
A.3.4. Voltajes de Línea	13
A.3.5. Muestra de medición de corriente I_1	15
A.3.6. Muestra de medición de corriente I_2	16
A.3.7. Muestra de medición de corriente I_3	17
A.3.8. Oscilografía de corriente I_1	18
A.3.9. Oscilografía de corriente I_2	19
A.3.10. Oscilografía de corriente I_3	20
A.3.11. Oscilografía de Voltaje V_1	20
A.3.12. Oscilografía de Voltaje V_2	21



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentido crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

A.3.13. Oscilografía de Voltaje V_3	21
ANEXO 4	22
A.1. Registro fotográfico de la visita técnica	22



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tetraedro de potencias. Conjunto de potencias de Budeanu.....	10
Figura 2. Ubicación de PARALEVA S.A.	19
Figura 3. Unifilar de cargas alimentadas por Transformador 1.....	25
Figura 4. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V_1	27
Figura 5. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V_1	28
Figura 6. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V_2	29
Figura 7. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V_2	29
Figura 8. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V_3	30
Figura 9. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V_3	31
Figura 10. Gráfico de TDD_1 vs. Tiempo.....	33
Figura 11. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_1	34
Figura 12. Gráfico de TDD_2 vs. Tiempo.....	36
Figura 13. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_2	37
Figura 14. Gráfico de TDD_3 vs. Tiempo.....	38
Figura 15. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_3	40
Figura 16. Gráfico para el cálculo de I_{sc}	3
Figura 17. Gráfico aproximado para el cálculo del FSh.....	3
Figura 18. Lectura de intensidades de la Línea Filtro y Empaque.....	8
Figura 19. Comparativa de $TDD1\%$ con I_1	10
Figura 20. Comparativa de $TDD2\%$ con I_2	11
Figura 21. Comparativa de $TDD3\%$ con I_3	11
Figura 22. Comparativa de armónicos de corriente de las componentes impares de orden 5, 7, 11 y 13 a lo largo del tiempo.....	12
Figura 23. Gráfico de voltajes de línea	13
Figura 24. Imagen del tablero con las sondas de medición instaladas.....	22
Figura 25. Unidades de transformadores de la marca WEG de 1500 kVA que alimentan la empresa PARALEVA.....	23
Figura 26. Interruptor caja moldeada de Filtro y Empaque.....	23



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de líneas por transformador.	20
Tabla 2. Listado de cargas instaladas por Línea.	21
Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje [4].....	27
Tabla 4. Límites de distorsión actuales para sistemas con clasificación de 120 V a 69 kV [4].	32
Tabla 5. Resumen de corrientes máximas de carga por fase.....	32
Tabla 6. Resumen de TDD en corriente.	32
Tabla 7. Cuadro comparativo de filtro activo vs. pasivo.....	41
Tabla 8. Comparación de precios de filtros activos.	42
Tabla 9. Presupuesto de la alternativa propuesta.	42
Tabla 10. Resumen de cargas no lineales por línea.....	43
Tabla 11. Resumen de corrientes de línea máximas.....	43
Tabla 12. Resumen de niveles de TDD por fase.	43
Tabla 13. Resumen de THD por fase.	44
Tabla 14. Muestra de medición de las corrientes.	9
Tabla 15. Muestra de medición de voltajes Línea-Línea.	14

INTRODUCCIÓN

La empresa PARALEVA S.A. ubicada en Tebicuary, dedicada a la producción de alimentos sólidos y líquidos, cuenta con diversas líneas de producción que emplean distintos equipos, incluyendo variadores de frecuencia y fuentes conmutadas en la línea de filtro y empaque. Estos dispositivos, considerados cargas no lineales, pueden afectar negativamente la calidad de la energía eléctrica, generando armónicos que comprometen el rendimiento de los equipos. La línea de filtro y empaque es fundamental en el proceso productivo, ya que cualquier interrupción o falla en su funcionamiento podría resultar en la pérdida total de productos procesados. Alimentada por un transformador de 1500 KVA, esta línea presenta indicios de contaminación por armónicos de corriente, según mediciones realizadas.

Con el objetivo de preservar los equipos, optimizar la productividad y reducir los costos operativos, este trabajo busca analizar los niveles de armónicos en la línea de filtro y empaque, proponiendo soluciones para mejorar la calidad de energía. Mediante un estudio cuantitativo basado en observación directa y entrevistas no estructuradas, se realizaron mediciones con un analizador de calidad de energía Extech PQ3350. Los resultados de esta investigación permitirán a PARALEVA S.A. implementar medidas correctivas para mitigar los armónicos, aumentando así la eficiencia de sus instalaciones y reduciendo sus costos operativos.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Objetivo General

- Proponer alternativas para el mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá.

Objetivos Específicos

- Realizar el relevamiento de datos técnicos de las instalaciones eléctricas de la línea de producción de filtro y empaque.
- Realizar las mediciones de las magnitudes eléctricas referente a análisis de armónicos establecidos en la IEEE-519 en su versión más reciente en la línea de producción Filtro y Empaque con el analizador de redes EXTECH(INSTRUMENTS) PQ3350.
- Efectuar el análisis y diagnóstico de los parámetros eléctricos de armónicos obtenidos en función a la norma IEEE-519 en su versión más reciente y estudiar las posibles desviaciones.
- Identificar los puntos críticos y plantear las alternativas correctivas según sea el caso, eligiendo aquella que tenga mayor factibilidad.
- Elaborar presupuesto de la alternativa seleccionada.

ANTECEDENTES

En 2021 **Hugo Barzola Meza** y **Cesar Rubén Ventura Gonzalo** en su trabajo “**Sistema de filtros para mejorar la calidad de la energía eléctrica en la planta de producción de la Cooperativa Agropia**” [1] se plantearon como objetivo diseñar e implementar un sistema de filtros para optimizar la calidad de la energía en la planta de Agropia. Se llevó a cabo un estudio experimental en el que se midieron diversos parámetros eléctricos usando un analizador de redes eléctricas Fluke 435-II. Los resultados indicaron que el sistema de filtros propuesto mejoró significativamente la calidad de la energía. En particular, se observó un aumento en la potencia activa, una reducción de la potencia reactiva, una disminución en la distorsión armónica total (THD) y una mejora en el factor de potencia (que pasó de 0.826 a 0.998).

Además, el sistema redujo los niveles de armónicos relevantes (como los armónicos 3, 5, 9 y 11) y disminuyó el Flicker causado por interarmónicos, lo cual fue importante para la estabilidad de la red. Sin embargo, las mediciones mostraron que los niveles de voltaje en algunos casos excedieron los límites normativos, aunque la frecuencia se mantuvo dentro de lo permitido. En general, la implementación de los filtros permitió mejorar la forma de la onda de voltaje, cumpliendo así con el objetivo de elevar la calidad de la energía eléctrica en la planta de producción de Agropia.

En el año 2023 **Víctor Ariel Miltos Cáceres** en su proyecto final de grado con título: “**Análisis de los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de la ciudad de Coronel Oviedo y propuesta de medidas de atenuación de los mismos**” [2] tuvo como objetivo analizar estos niveles en la ciudad de Coronel Oviedo, utilizando como principal herramienta la medición directa de armónicos por medio del analizador KYORITSU KEW6310.

Se realizó un análisis de los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de Coronel Oviedo y se propusieron medidas de mitigación. Las mediciones directas de armónicos en tres puntos de la ciudad revelaron que los niveles de armónicos de corriente sobrepasan los límites internacionales en promedio en un 37%, mientras que los armónicos de tensión se mantienen dentro de los límites. Como solución, se

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

evaluaron dos alternativas: alivio de carga y adecuaciones de red o la implementación de filtros activos. Se concluyó que los filtros activos, que ofrecen mejor costo-beneficio, podrían reducir eficazmente la distorsión armónica.

En el año 2024 **Alexis Duarte Román** en su proyecto final de grado: “**Análisis de los niveles de armónicos y propuesta de medidas de atenuación en la instalación eléctrica de la empresa Cooperativa Chortitzer sucursal Coronel Oviedo**” [3] analizó los niveles de armónicos en el tablero eléctrico principal de una planta de producción y propuso medidas para reducirlos. A través de mediciones con un analizador de redes y comparaciones con la norma IEEE 519-2014, se determinó que los armónicos de tensión están dentro de los límites, mientras que los de corriente, especialmente los de orden 5, 7 y 11, los exceden. Se evaluaron dos alternativas de mitigación, concluyendo que la implementación de un filtro activo de 60 A es la opción más adecuada desde el punto de vista técnico y económico, con un costo de inversión de 13.461,42 USD.

MARCO TEÓRICO

Definiciones [4]

Armónico (componente): Un componente de orden mayor que uno de las series de Fourier de un periódico cantidad. Por ejemplo, en un sistema de 50 Hz, el orden armónico 3, también conocido como el "tercer armónico", es 150 Hz.

Corriente de carga de demanda máxima: este valor actual se establece en el punto de acoplamiento común y debe tomarse como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada uno de los doce meses previos divididos por 12.

Distorsión de la demanda total (TDD): la relación del cuadrado medio de la raíz del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y específicamente excluyendo interarmónicos, expresados como porcentaje de la corriente de demanda máxima. Se pueden incluir componentes armónicos de orden mayor a 50 cuando sea necesario.

Distorsión armónica total (THD): la relación del cuadrado medio de la raíz del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y específicamente excluyendo interarmónicos, expresados como por ciento de lo fundamental. Los componentes armónicos de orden superior a 50 pueden incluirse cuando necesario.

Filtros de armónicos

Los filtros de armónicos son dispositivos diseñados para mitigar o reducir las distorsiones armónicas en sistemas eléctricos, mejorando así la calidad de la energía. Estas distorsiones son variaciones en la forma de onda de voltaje y corriente que pueden causar problemas en equipos eléctricos, como sobrecalentamientos y fallos.

Efectos de los armónicos [5]

Los voltajes y las corrientes armónicas pueden causar muchos problemas, siendo el incremento en pérdidas y el calentamiento los principales

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

- La presencia de armónicas en los sistemas de suministro de energía eléctrica implica el aumento de pérdidas en las líneas y la aparición de posibles condiciones de resonancia que provocan sobrevoltajes permanentes y transitorios al realizar maniobras (acciones de switcheo) en el sistema.
- Fusibles fundidos en capacitores para corrección de factor de potencia, debido a voltajes y corrientes altas por resonancia con la impedancia de la línea.
- La presencia de corrientes armónicas triple-n (múltiplos de la 3ª armónica como 9ª, 15ª, 21ª, ...) puede hacer que circule una corriente excesiva en el neutro de circuitos trifásicos de cuatro hilos, resultando en un sobrecalentamiento del neutro.
- La presencia de armónicas conduce al envejecimiento acelerado del aislamiento, al calentamiento adicional de las partes conductoras de los equipos e instalaciones, al incremento de las pérdidas de energía en las redes, a la operación errática de los esquemas de protección, al envejecimiento acelerado de los bancos de capacitores provocando su fallo, etc.
- La presencia de armónicas implica el aumento de las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis en los núcleos de motores y de transformadores, tanto del sistema de suministro como de los consumidores.
- Los transformadores se sobrecalientan, especialmente los devanados en delta en donde las armónicas triple-n generadas en el lado carga de un transformador delta-estrella circulan y se quedan atrapadas en el lado primario.
- La presencia de armónicas crea interferencias en los servicios de comunicación y de transmisión de datos.
- La práctica ha mostrado un incremento del error en las lecturas de medidores de energía del tipo disco de inducción y de medidores de corriente promediada ante la presencia de armónicas, además de daños mecánicos producidos por las armónicas de orden $3n+2$ cuando éstas son significativas, por lo que se recomienda la no utilización de este tipo de medidores en redes o consumidores contaminados

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

- Operación inadecuada de dispositivos de protección, incluyendo disparo en falso de relevadores y falla de UPS en transferir adecuadamente, especialmente si los controles incorporan detectores (sensores) de cruce por cero.

Efectos de las armónicas sobre equipos específicos [5]

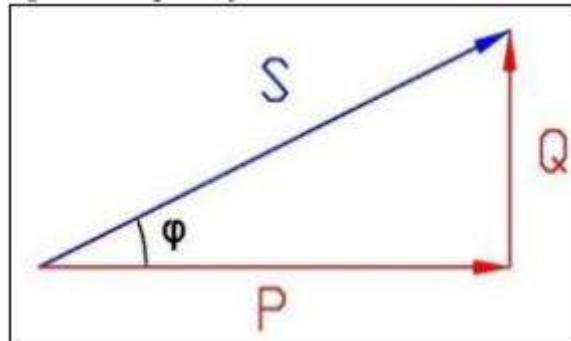
- Interruptores: malfuncionamiento. Los elementos térmicos que están diseñados para sobrecarga actúan debido al incremento de las corrientes armónicas, los interruptores electrónicos detectores de picos reaccionan ante los picos de la onda de corriente armónica.
- Equipo de protección: disparo en falso, no disparo
- Motores: nivel de ruido incrementado, sobrecalentamiento, vibraciones adicionales, pares pulsantes, mayores pérdidas en el cobre y en el núcleo, y en los devanados de estator y de rotor, eficiencia reducida, reducción de su vida útil.
- Equipos y dispositivos electrónicos y controlados por computadora: mala operación del equipo de control y de protección, falla prematura del equipo, operación errática de controladores estáticos y de robots, pulsos equivocados en transmisión de datos.

Tipos de potencias

Factor de potencia

El factor de potencia es un guía del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el cual nos señala el consumo de energía reactiva en la instalación en comparación con el consumo de energía activa. En el factor de potencia $\cos \varphi$ o tangente φ , la potencia activa P y la potencia reactiva Q se suman entre sí en forma vectorial dando como resultado la potencia aparente como se muestra en la tabla 5 [6].

Tabla 8 Triangulo de potencias.



$$\cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$$

Potencia Activa

La potencia activa se la define como la potencia que se transforma íntegramente en trabajo o en calor (pérdidas). El concepto anterior se deduce que todas las máquinas eléctricas alimentadas con corriente alternan convierten la energía eléctrica suministrada en trabajo mecánico y calor, esta energía se mide en KW. Se calcula mediante la siguiente expresión: $P = \sqrt{3} * U * I * \cos(\phi)$

Donde

P: Potencia activa

U: Voltaje de la red (voltaje de línea)

I: Corriente de línea

ϕ : Angulo de desfase entre voltaje y la corriente

Potencia Reactiva

Ciertos receptores necesitan campos magnéticos para su funcionamiento (motores, transformadores, etc.) y consumen otro tipo de energía denominada energía reactiva. El motivo es que este tipo de cargas (denominadas inductivas) absorben energía de la red durante la creación de los campos magnéticos que necesitan para su funcionamiento y la entregan durante la destrucción de los mismos y se mide en VAR con la siguiente ecuación

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \text{sen}(\phi)$$

Potencia Aparente

Es el valor real demandado a la red y que es la suma vectorial de las potencias activas y reactivas. Es importante destacar que es la energía generada y transportada por las líneas el cual se mide en VA con la siguiente expresión [6].

Tetraedro de potencias (Definiciones de Budeanu)

Budeanu trabaja con los valores eficaces de cada armónico individual de voltaje (V_n) e intensidad (I_n) y el desfase entre las voltajes e intensidades armónicas (φ_n). Propone unas expresiones de potencias resultado de una extensión de la Teoría Clásica.

Potencia activa: Es el promedio de la potencia eléctrica instantánea. Contiene una parte relativa a la frecuencia fundamental y otra a un término de potencia activa asociada a los armónicos correspondientes. Sólo el producto de voltajes e intensidades de la misma frecuencia produce términos no nulos en el promedio.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)v(t)dt = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n)$$

Potencia reactiva: Es una definición propia de Budeanu.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_n)$$

Potencia aparente: Producto de valores eficaces de voltaje e intensidad.

$$S = VI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

Factor de potencia:

$$\lambda = P/S = \cos(\varphi)$$

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Falta ubicar los productos cruzados de los valores eficaces. Éstos quedan introducidos en un nuevo término de potencia imaginaria, la distorsión de potencia D, debiéndose exclusivamente a contenidos armónicos y al igual que la potencia reactiva no realiza trabajo.

$$D^2 = S^2 - P^2 + Q^2$$

Se define la potencia ficticia como la que no es activa.

$$P_c = \sqrt{Q^2 + D^2}$$

Diversos autores ponen en evidencia las definiciones propuestas por Budeanu. Se debe a que la potencia reactiva y de distorsión no son ortogonales, es decir, son dependientes (gráficamente los ejes de potencia reactiva y de distorsión no forman ángulo recto, tal y como muestra la Figura 1). Por lo tanto, una compensación de potencia reactiva no asegura que se alcance un valor de potencia aparente menor. Desde el punto de vista de la mitigación de armónicos, es deseable que se eliminen las potencias activa y reactiva (o las intensidades asociadas) relativas a los armónicos.

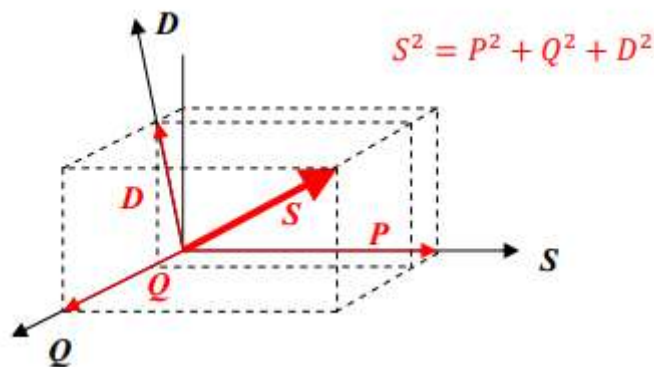


Figura 1. Tetraedro de potencias. Conjunto de potencias de Budeanu.

Descomposición de Fourier para Análisis de Armónicos

La descomposición de Fourier es una herramienta matemática fundamental para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos. A través de esta técnica, se pueden descomponer señales periódicas complejas (como una onda de corriente o voltaje distorsionada) en una serie de componentes sinusoidales, cada una con una frecuencia

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Esto permite analizar y cuantificar la contribución de cada frecuencia armónica en una señal.

Conceptos Básicos de la Serie de Fourier

La descomposición de Fourier se basa en el principio de que cualquier señal periódica $f(t)$ de período T se puede representar como una suma de senos y cosenos (o una serie compleja exponencial) con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental $f_0 = 1/T$.

La serie de Fourier de una señal $f(t)$ es:

$$f(t) = a_0 + \sum (a_n \cos(n \omega_0 t) + b_n \sin(n \omega_0 t))$$

donde:

- $\omega_0 = 2\pi f_0$ es la frecuencia angular fundamental,
- a_0 es el valor medio de la señal,
- a_n y b_n son los coeficientes de Fourier, que indican la magnitud de cada componente armónica.

Estos coeficientes se calculan como:

$$a_0 = 1/T \int f(t) dt$$

$$a_n = 2/T \int f(t) \cos(n \omega_0 t) dt$$

$$b_n = 2/T \int f(t) \sin(n \omega_0 t) dt$$

Análisis de Armónicos

En el análisis de armónicos de sistemas eléctricos, la descomposición de Fourier permite identificar los armónicos individuales (frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental) que contribuyen a la distorsión de una señal de corriente o voltaje.

Frecuencia Fundamental: Es el primer armónico con frecuencia f_0 .

Armónicos: Los componentes con frecuencias $2f_0, 3f_0, \dots, nf_0$, donde n es un número entero, son los armónicos. Por ejemplo, el 5º armónico tiene una frecuencia de $5f_0$.

Cargas no lineales

Las cargas no lineales son aquellas que presentan una relación no proporcional entre la corriente y el voltaje aplicado, lo que significa que la forma de onda de la corriente no sigue la forma de onda del voltaje. Esto se traduce en que, aunque se conecten a un voltaje sinusoidal, la corriente resultante será no sinusoidal, generando así armónicos en el sistema eléctrico.

Características de las Cargas No Lineales

Impedancia Variable: La impedancia de estas cargas cambia con el voltaje, lo que provoca que la corriente consumida varíe de manera no lineal.

Generación de Armónicos: Las cargas no lineales generan corrientes armónicas que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estos armónicos pueden distorsionar la forma de onda del voltaje y afectar la calidad de la energía eléctrica.

Ejemplos Comunes: Se encuentran comúnmente en dispositivos electrónicos como computadoras, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), variadores de velocidad (VFD), y lámparas fluorescentes.

Efectos en el Sistema Eléctrico

Las cargas no lineales pueden causar varios problemas en los sistemas eléctricos:

Sobrecarga de Transformadores: La presencia de armónicos puede llevar al sobrecalentamiento de transformadores, lo que reduce su vida útil. Esto puede requerir transformadores especiales diseñados para manejar las cargas armónicas.

Problemas en el Neutro: En sistemas trifásicos, los armónicos pueden acumularse en el conductor neutro, aumentando significativamente la corriente que circula por él y potencialmente causando fallas en el sistema.

Distorsión Armónica: La distorsión causada por las cargas no lineales puede afectar el rendimiento de otros equipos conectados al sistema, llevando a un mal funcionamiento o inestabilidad.

Variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos que controlan la velocidad y el par de motores eléctricos de corriente alterna (CA) ajustando la frecuencia y la voltaje de la energía suministrada al motor. Estos dispositivos son fundamentales en diversas aplicaciones industriales y comerciales, ya que permiten un control preciso del rendimiento del motor, lo que se traduce en eficiencia energética y reducción de costos operativos.

Funcionamiento

Los variadores de frecuencia operan a través de un proceso que incluye varios componentes clave:

Rectificador: Convierte la corriente alterna (CA) de la red eléctrica en corriente continua (CC).

Condensadores: Almacenan energía y suavizan la onda de la corriente eléctrica, proporcionando una fuente de alimentación más estable.

Inversor: Convierte la corriente continua nuevamente en corriente alterna, pero a una frecuencia y voltaje ajustables según las necesidades del motor.

Este proceso permite que el motor funcione a diferentes velocidades dependiendo de la demanda del sistema, optimizando así su rendimiento y prolongando su vida útil.

Tipos de Variadores de Frecuencia

Existen varios tipos de variadores de frecuencia, cada uno diseñado para satisfacer diferentes necesidades:

Variadores de Voltaje Constante (VVC): Mantienen una relación constante entre voltaje y frecuencia, ideales para aplicaciones como ventiladores y bombas.

Variadores de Voltaje y Frecuencia Variables (VVVF): Permiten un control más preciso al ajustar tanto el voltaje como la frecuencia, adecuados para aplicaciones como elevadores.

Variadores Vectoriales: Ofrecen un control avanzado del motor, adaptándose a variaciones en la voltaje de entrada.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Variadores Multinivel: Utilizan múltiples niveles de voltaje para reducir la distorsión armónica, adecuados para aplicaciones de alta potencia.

Aplicaciones

Los variadores de frecuencia son utilizados en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

Sistemas HVAC: Para controlar ventiladores y bombas ajustando su velocidad según las necesidades del ambiente.

Maquinaria industrial: En líneas de producción automatizadas donde se requiere un control preciso del motor.

Agricultura: Para optimizar sistemas de riego ajustando el flujo según las necesidades específicas.

Beneficios

El uso de variadores de frecuencia presenta múltiples ventajas:

Ahorro energético: Pueden reducir el consumo eléctrico entre un 20% y un 70%, dependiendo de la aplicación.

Menor desgaste del equipo: Al permitir arranques suaves y desaceleraciones controladas, se minimiza el estrés mecánico en los motores.

Reducción de emisiones acústicas: Los motores controlados por VFD tienden a operar más silenciosamente.

Generación de armónicos por Variadores de Frecuencia

Los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y se generan en los VFD debido a su naturaleza como cargas no lineales. Esto significa que, al convertir la corriente alterna en corriente continua y luego volver a convertirla en corriente alterna, se introducen distorsiones que pueden afectar la calidad de la energía eléctrica en el sistema. Los armónicos más comunes generados por los VFD son los 5^o, 7^o, 11^o y 13^o, y su presencia puede ser cuantificada mediante la Tasa Total de Distorsión Armónica (THD).

Fuentes conmutadas

Componentes Clave

Rectificador: Convierte la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC).

Transistor de Conmutación: Controla el flujo de energía mediante la conmutación rápida.

Transformador: En fuentes aisladas, se utiliza para proporcionar aislamiento entre la entrada y salida.

Filtros: Reducen el ruido y estabilizan la salida.

Ventajas

Eficiencia Energética: Gracias a su diseño, las SMPS tienen una eficiencia superior en comparación con las fuentes lineales.

Tamaño Compacto: Operan a frecuencias más altas, lo que permite utilizar componentes más pequeños, reduciendo así el tamaño y peso del dispositivo.

Versatilidad: Pueden manejar una amplia gama de voltajes de entrada y proporcionar salidas reguladas adecuadas para diversas aplicaciones, desde cargadores de teléfonos hasta sistemas industriales.

Desventajas

Complejidad: La construcción de una fuente conmutada es más compleja que la de una fuente lineal, lo que puede requerir un diseño más cuidadoso para evitar interferencias electromagnéticas (EMI) y otros problemas relacionados.

Interferencias Electromagnéticas: Debido a la alta frecuencia de operación, pueden generar ruido eléctrico que puede afectar otros dispositivos electrónicos si no se gestionan adecuadamente.

Aplicaciones

Las fuentes conmutadas son omnipresentes en la electrónica moderna y se utilizan en:

- Cargadores de Dispositivos Móviles

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

- Computadoras y Servidores
- Electrodomésticos
- Equipos Industriales

Generación de armónicos por fuentes conmutadas

La generación de armónicos en fuentes conmutadas es un fenómeno importante que afecta la calidad de la energía eléctrica en sistemas eléctricos. Las fuentes de alimentación conmutadas (SMPS) son dispositivos que convierten la energía eléctrica mediante un proceso de conmutación, y su funcionamiento puede introducir distorsiones en la forma de onda de la corriente, resultando en la producción de armónicos.

Causas de la Generación de Armónicos

Proceso de Rectificación: Durante la conversión de CA a CC, las fuentes conmutadas utilizan rectificadores que pueden introducir armónicos impares en la corriente de línea. Este proceso es especialmente crítico en la primera etapa de conversión, donde se generan armónicos debido a la forma en que se manejan las corrientes.

Frecuencia de Conmutación: Las fuentes conmutadas operan a frecuencias mucho más altas (generalmente por encima de 30 kHz), lo que puede contribuir a la generación de armónicos adicionales y a la distorsión de la forma de onda.

Tipos de Filtros de Armónicos

Filtros pasivos

Descripción: Los filtros pasivos son dispositivos que varían su impedancia en función de la frecuencia. Fundamentalmente se componen de elementos pasivos (Utilizan componentes pasivos como resistores, capacitores e inductores) y son capaces de compensar los armónicos de corriente en una red eléctrica.

La inserción de estos dispositivos en la red eléctrica modifica la respuesta en frecuencia de la red, de tal forma que se podría alterar el camino de circulación de los armónicos de corriente. Los filtros pasivos se pueden clasificar en filtros pasivos paralelo y serie. Son efectivos para eliminar frecuencias armónicas específicas.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Aplicaciones: Comúnmente usados en instalaciones industriales con cargas constantes, donde se requiere una solución simple y económica.

Ventajas: Sencillez y bajo costo inicial. La instalación de los filtros pasivos es sencilla y, en muchos casos, son más robustos y económicos que otras alternativas [7].

Filtros activos

Descripción: Dispositivos electrónicos que inyectan corrientes opuestas a las corrientes armónicas existentes, utilizando tecnología avanzada como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analizar y compensar las distorsiones.

Aplicaciones: Adecuados para entornos donde la calidad de la energía es crítica, como en plantas industriales, centros de datos y sistemas de energías renovables.

Ventajas: Adaptabilidad a cambios en la carga, mayor eficacia en la reducción de armónicos y mejora en el factor de potencia.

Beneficios de los Filtros de Armónicos

Reducción de armónicos: Mejora la calidad del suministro eléctrico.

Aumento de eficiencia energética: Contribuyen a reducir costos operativos.

Protección de equipos: Previenen daños y aumentan la vida útil de los dispositivos eléctricos.

Estabilidad del sistema eléctrico: Ayudan a mantener un flujo constante y seguro de energía.

Norma IEEE-519 2022 [4]

La norma IEEE 519-2022, titulada oficialmente "*IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*", establece límites para la distorsión armónica de corriente y voltaje en sistemas eléctricos, especialmente en instalaciones con recursos de energía distribuida o invertida, como energía solar o eólica. Esta actualización reemplaza la edición de 2014 y ofrece nuevas pautas para mitigar problemas de calidad de energía debido a armónicos, protegiendo así tanto el sistema de distribución como los equipos conectados.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Entre las novedades, la IEEE 519-2022 incluye:

Orientación para instalaciones con recursos de energía invertida/distribuida:

Proporciona criterios para aplicar límites específicos de distorsión en instalaciones con recursos de energía distribuida que representan más del 10% de la carga media anual. Estos sitios ahora deben seguir IEEE 1547 o IEEE 2800, lo cual optimiza la integración de energías renovables sin afectar la estabilidad del sistema

Revisión de los límites de armónicos pares: La nueva edición relaja los límites para armónicos pares, permitiendo mayor flexibilidad para diseñar y operar sistemas eléctricos. Los armónicos pares hasta el sexto orden ahora pueden alcanzar hasta el 50% de sus equivalentes impares, mientras que aquellos de orden superior ya no están limitados a un 25% y pueden igualar a sus equivalentes impares

Esta versión mejora la claridad en cuanto al cálculo de distorsión y la medición, requiriendo el uso de instrumentos de clase A para monitorear hasta el 50º armónico, ayudando a mantener la calidad de energía en los puntos de acoplamiento común y a cumplir con las normas reguladoras.

METODOLOGÍA

1. Relevamiento de datos

1.1. Ubicación y descripción de la empresa

PARALEVA S.A. se encuentra dentro del municipio de Tebicuary Departamento de Guairá, a 600 metros del río Tebicuary. Se dedica al rubro de alimentos en general, sólidos y líquidos. Elabora levaduras y soluciones en panificación.

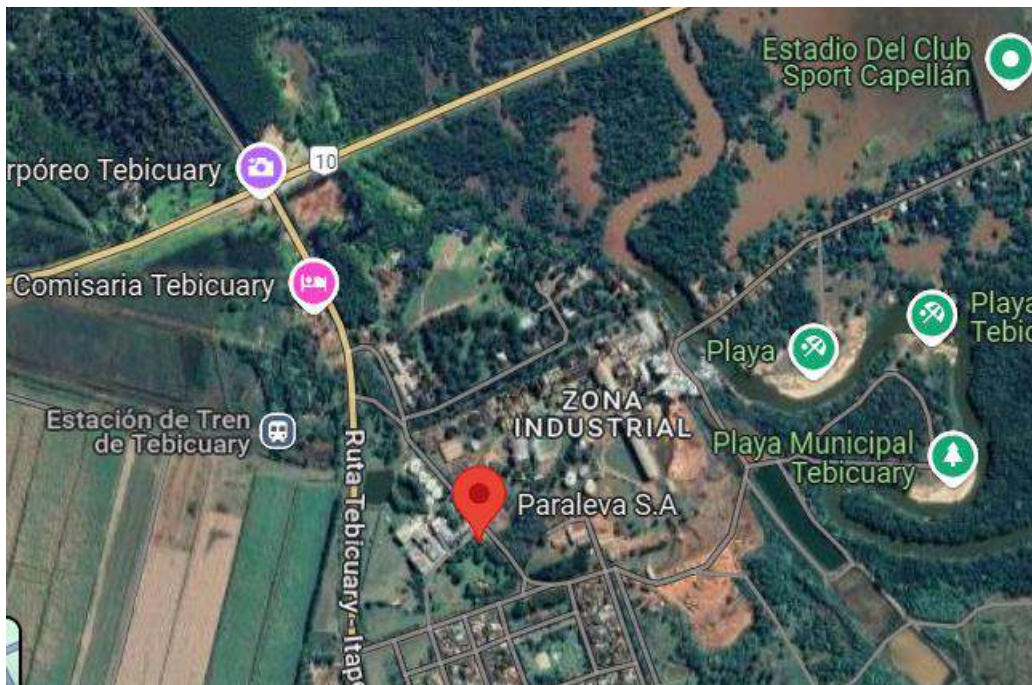


Figura 2. Ubicación de PARALEVA S.A.

La ANDE provee el servicio eléctrico a la empresa mediante una línea de media tensión. La instalación tiene una potencia reservada de 2000 kW y cuenta con tres transformadores donde alimentan las diferentes líneas de producción. En la Tabla 1 se muestra la distribución de líneas por transformador.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Tabla 1. Distribución de líneas por transformador.

TR1	Separación
	Fermentación
	CAVA
	Filtro y empaque
	Taller y deposito
	York 1 y 2
	Banco de capacitores
	Sopladores Auxiliares
	Agua proceso York 2 y 3
	Agua proceso 1
TR2	Soplador F2
	Refrigeración
	Reserva
	Oficina
	Instantánea
	Comedor
TR3	Nutrientes
	Soplador
	Rebombeo y Retorno

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

2. Listado de Cargas no lineales

La Línea de Filtro y Empaque está formada por dos líneas gemelas en la Tabla 2 se presenta el listado de cargas instaladas en una línea. Se destaca que el 70,4% de la potencia instalada pertenece a cargas no lineales.

Tabla 2. Listado de cargas instaladas por Línea.

Denominación	Potencia [kW]	Carga no lineal	Nota	Código
Motor Bomba de Vacío	15		Arranque Estrella/Triangulo	
Motor Tambor 1	4	Sí	Variador 4kW	CF1
Motor Bomba crema	5,5	Sí	Variador 5kW	CF2
Transformador	0,5		380V/24V AC	TR1
Fuente 24V	1,43	Sí	6,5 amperes	FA1
Motor extrusidora	15	Sí	Variador 15 kW	CF1
Motor amasado	11	Sí	Variador 11 kW	CF2
Motor bomba aceite	0,12		Arranque directo	
Motor bomba aceite anillo sinterizado	0,09		Arranque directo	
Motor Envolvedora	1,1	Sí	Variador 1,1 kW	CF3
Resistencia de sellado	1,48		3 unidades de resistencia de sellado	
Fuente 24V FA1	1,43	Sí	6,5 amperes	FA1
Fuente 24V FA2	1,43	Sí	6,5 amperes	FA2
Potencia total	58,08			
Potencia cargas no lineales	40,89	70,4%		

3. Medición de armónicos

Según [7] se puede considerar dos tipos de mediciones en función del tiempo de medición:

Mediciones armónicas de tiempo muy corto: Los valores armónicos de tiempo muy corto se evalúan en un intervalo de 3 segundos basados en una agregación de 15 ventanas consecutivas de 10 ciclos para sistemas de energía de 50 Hz.

Mediciones de armónicos de corta duración: Los valores armónicos de corta duración se evalúan en un intervalo de 10 minutos sobre la base de una agregación de 200 valores de tiempo muy cortos consecutivos para un componente de frecuencia específico.

Magnitudes a medir y analizar:

- Intensidad de Corriente de carga en las tres fases (I_1 ; I_2 ; I_3)
- 50 componentes armónicas de corriente (I_1 ; I_2 ; I_3), incluido la fundamental.
- Tasa de distorsión armónica THD, Corriente fases (I_1 ; I_2 ; I_3)
- Voltaje en las tres fases (V_1 ; V_2 ; V_3)
- 50 componentes armónicas de voltaje (V_1 ; V_2 ; V_3), incluido la fundamental.
- Tasa de distorsión armónica THD, Voltaje fases (V_1 ; V_2 ; V_3)

3.1. Equipo utilizado

Descripción General

El Extech PQ3350 es un analizador de calidad de energía diseñado para medir y registrar varios parámetros eléctricos en sistemas monofásicos y trifásicos. Este dispositivo permite a los usuarios monitorear la calidad de la energía en tiempo real, detectando problemas como caídas de voltaje, picos, armónicos, y otros factores que afectan el rendimiento de los sistemas eléctricos.

Características Principales

Mediciones Trifásicas y Monofásicas: Ideal para monitorear redes eléctricas tanto en configuraciones monofásicas como trifásicas (3P4W, 3P3W).

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Pantalla LCD de Alta Resolución: Ofrece datos en tiempo real con gráficos y análisis de forma de onda.

Rango de Medición:

Voltaje: Hasta 600 V AC en sistemas trifásicos.

Corriente: Compatible con pinzas de hasta 3000 A AC (según los accesorios utilizados).

Frecuencia: Mide la frecuencia de la señal eléctrica en un rango de 45 a 65 Hz.

Armónicos: Análisis de armónicos de hasta el 50.º orden para voltaje y corriente.

Registro de Datos: Almacena datos de medición en una tarjeta SD para un análisis posterior; compatible con software para transferencia de datos a una PC.

Especificaciones Técnicas

Precisión:

Voltaje: $\pm 0.5\%$ de lectura

Corriente: $\pm 1.0\%$ de lectura (dependiendo de la pinza)

Intervalo de Registro: Configurable desde 2 segundos hasta 2 horas.

Capacidad de Almacenamiento: La tarjeta SD puede almacenar grandes cantidades de datos para análisis a largo plazo.

Temperatura de Funcionamiento: Entre 0°C y 50°C.

Fuente de Alimentación: Batería de iones de litio recargable o adaptador de corriente.

Funciones Adicionales

Datalogging: Configuración flexible para almacenar datos en intervalos programados.

Detección de Eventos Transitorios: Capacidad para identificar fluctuaciones momentáneas en la energía.

Interfaz de PC: Conexión USB y software para análisis de datos y generación de informes.

Compatibilidad con Diferentes Pinzas: Permite el uso de pinzas de diferentes tamaños, ajustándose al tipo de instalación.

Aplicaciones Comunes

El Extech PQ3350 es útil en una variedad de aplicaciones, incluyendo:

Mantenimiento Preventivo: Detecta problemas de calidad de energía que podrían afectar la operación de equipos sensibles.

Auditorías Energéticas: Análisis del consumo y calidad de energía para identificar oportunidades de ahorro.

Diagnóstico de Fallas: Localización de fallos eléctricos en sistemas industriales o comerciales.

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Alta precisión y capacidad de medición de armónicos.
- Portabilidad y facilidad de uso en campo.
- Software de PC para análisis.

Desventajas:

- Precio elevado en comparación con otros modelos de análisis básico.
- Requiere experiencia para interpretar los datos de armónicos y transitorios.
- Poca capacidad de memoria interna (no extensible).
- Baterías no recargables.
- Software muy limitado (no se puede cambiar modos ni variables desde la PC).
- Solo puede grabar una variable armónica a la vez.

El analizador Extech PQ3350 es una herramienta robusta para profesionales que necesitan monitorear y mantener la calidad de energía en instalaciones complejas. Su versatilidad y precisión lo hacen ideal para ingenieros eléctricos y técnicos de mantenimiento, aunque puede requerir cierta experiencia en análisis de energía para su uso óptimo.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Ubicación del instrumento de medición

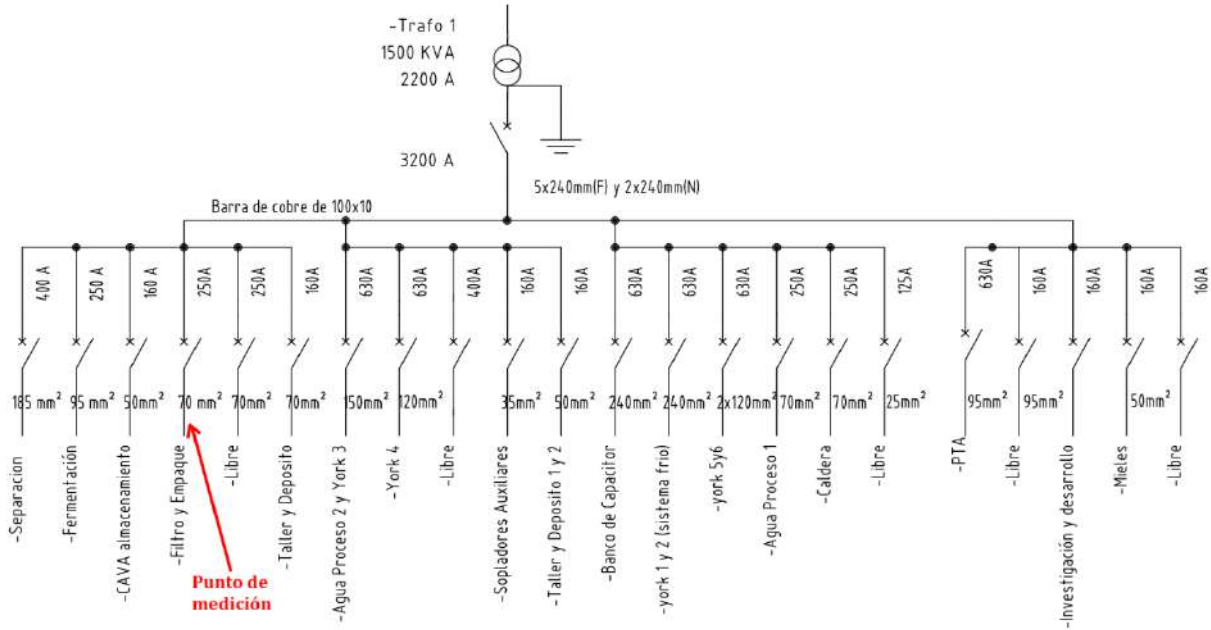


Figura 3. Unifilar de cargas alimentadas por Transformador 1.

4. Límites de distorsión armónica [4]

Según [4] la gestión de los armónicos en una red eléctrica se considera una responsabilidad conjunta de los usuarios finales y los propietarios u operadores de la red, se requieren límites de armónicos tanto para los voltajes como para las corrientes. Los límites de la norma se basan en el hecho de que un cierto nivel de distorsión del voltaje es generalmente aceptable y tanto los propietarios u operadores del sistema como los usuarios deben trabajar en cooperación para mantener la distorsión real del voltaje por debajo de niveles objetables. El supuesto subyacente de estos límites es que, limitando las inyecciones de corriente armónica por parte de los usuarios, la distorsión del voltaje puede mantenerse por debajo de niveles inaceptables. En caso de que la limitación de las corrientes armónicas por sí sola no dé lugar a niveles aceptables de distorsión del voltaje, los propietarios u operadores del sistema deberán tomar medidas para modificar las características del sistema de modo que los niveles de distorsión del voltaje sean aceptables.

Los límites de la norma IEEE se aplican únicamente en el PCC y no se aplicarán ni a equipos individuales ni a ubicaciones dentro de las instalaciones de un usuario. En la mayoría de los casos, los voltajes y corrientes armónicas en estas ubicaciones podrían ser significativamente mayores que los límites en el PCC debido a la falta de diversidad, cancelación y otros fenómenos que tienden a reducir los efectos combinados de múltiples fuentes armónicas a niveles inferiores a su suma algebraica.

4.1. Límites de distorsión armónica de voltaje

En el PCC, los propietarios o gestores de redes limitarán los armónicos de voltaje de línea a neutro de la forma siguiente [4]:

- Diariamente: Los valores del percentil 99 de tiempo muy corto (3 segundos) serán inferiores a 1,5 veces los valores indicados en la tabla 1.
- Semanal: Los valores del percentil 95 de tiempo muy corto (10 minutos) serán inferiores a los valores indicados en la Tabla 3. Todos los valores se expresarán en porcentaje del voltaje nominal de frecuencia de potencia en el PCC. El cuadro

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

1 se aplica a los armónicos de voltaje cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de potencia hasta el armónico 50 inclusive.

Tabla 3. Límites de distorsión de voltaje [4].

Voltaje de bus V en PCC	Armónico individual (%) $h \leq 50$	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5	8
1 kV $< V \leq 69$ kV	3	5
69 kV $< V \leq 161$ kV	1,5	2,5
161 kV $< V$	1	1.5a

4.1.1. THD Voltaje V_1

La Figura 4, muestra el porcentaje de distorsión armónica total (THD) en el voltaje V_1 a lo largo del tiempo. El valor del percentil 95 (es decir, el valor que es excedido durante el 5% del período de medición) es de 8,9%, la mayoría de los valores de THD se mantienen cercanos a este valor, con algunas fluctuaciones menores. El voltaje V_1 tiene una distorsión armónica total que está por encima del límite deseado del 8%.

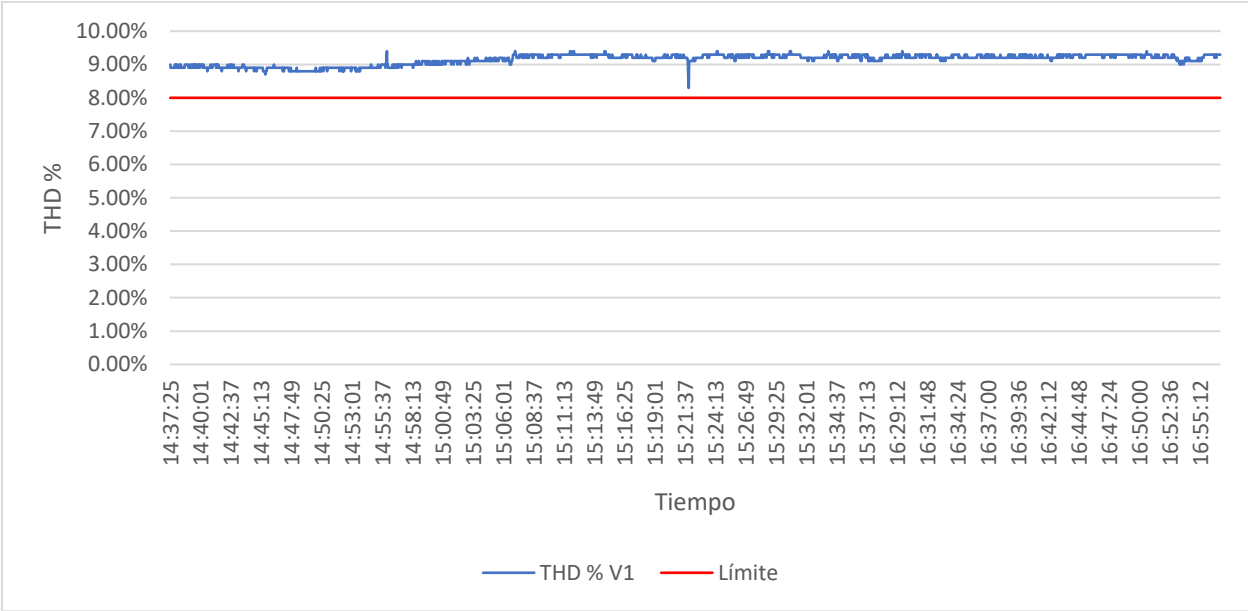


Figura 4. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V_1 .

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

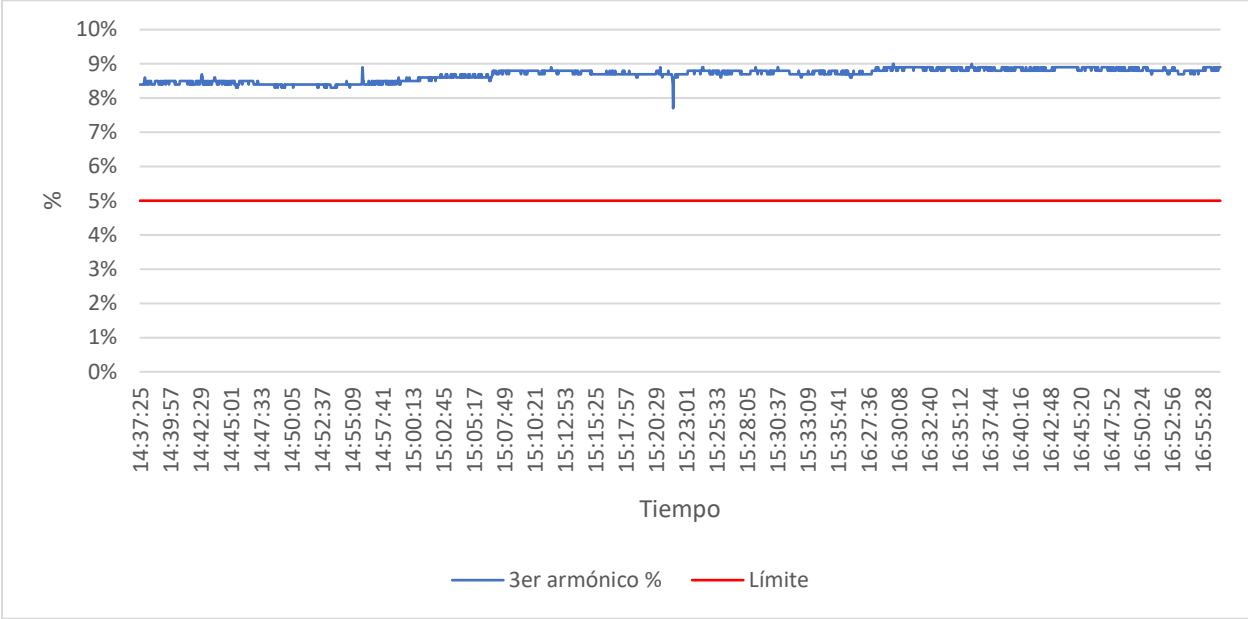


Figura 5. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V_1 .

La Figura 5, muestra el nivel porcentual del tercer armónico en el voltaje V_1 a lo largo del tiempo.

Los valores del tercer armónico están mayormente alrededor del 8,6%, con algunas fluctuaciones pequeñas.

Se observa un pico y una caída significativa en ciertos momentos, aunque estos son aislados. El voltaje V_1 presenta un nivel de tercer armónico que excede el límite establecido del 5 %, lo cual puede afectar la calidad de la energía.

4.1.2. THD Voltaje V_2

La Figura 6, muestra el porcentaje de distorsión armónica total (THD) en el voltaje V_2 a lo largo del tiempo. El valor del percentil 95 (es decir, el valor que es excedido durante el 5% del período de medición) es de 15,3%, la mayoría de los valores de THD se mantienen cercanos a este valor, con algunas fluctuaciones menores. El voltaje V_2 tiene una distorsión armónica total que está mayormente por encima del límite deseado del 8%. Esta línea presenta un mayor porcentaje de THD comparado con los voltajes V_1 y V_3 .

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

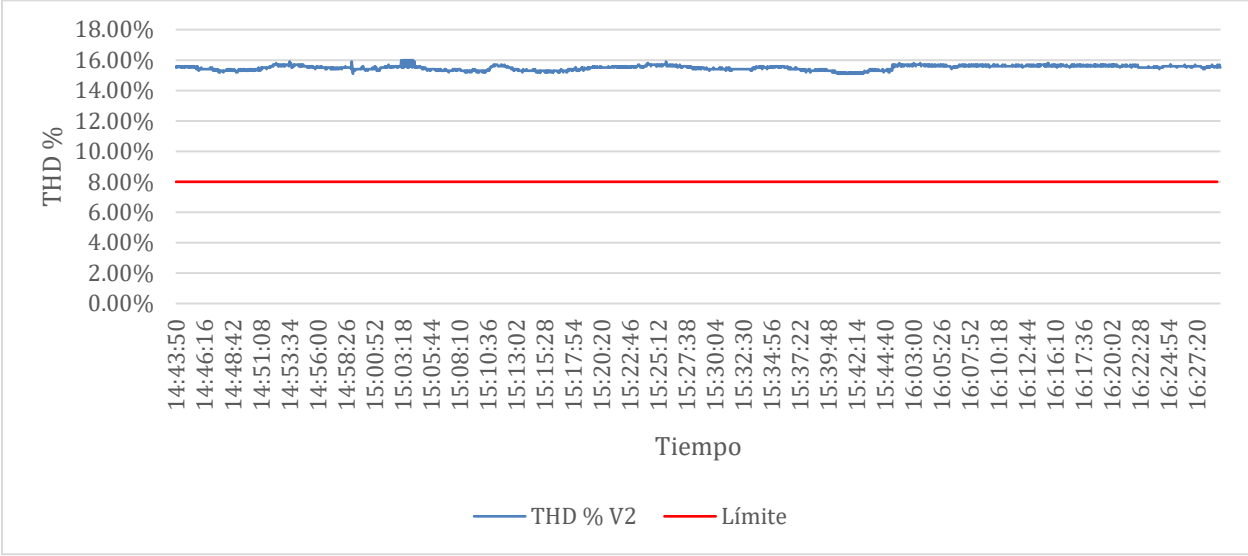


Figura 6. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V₂.

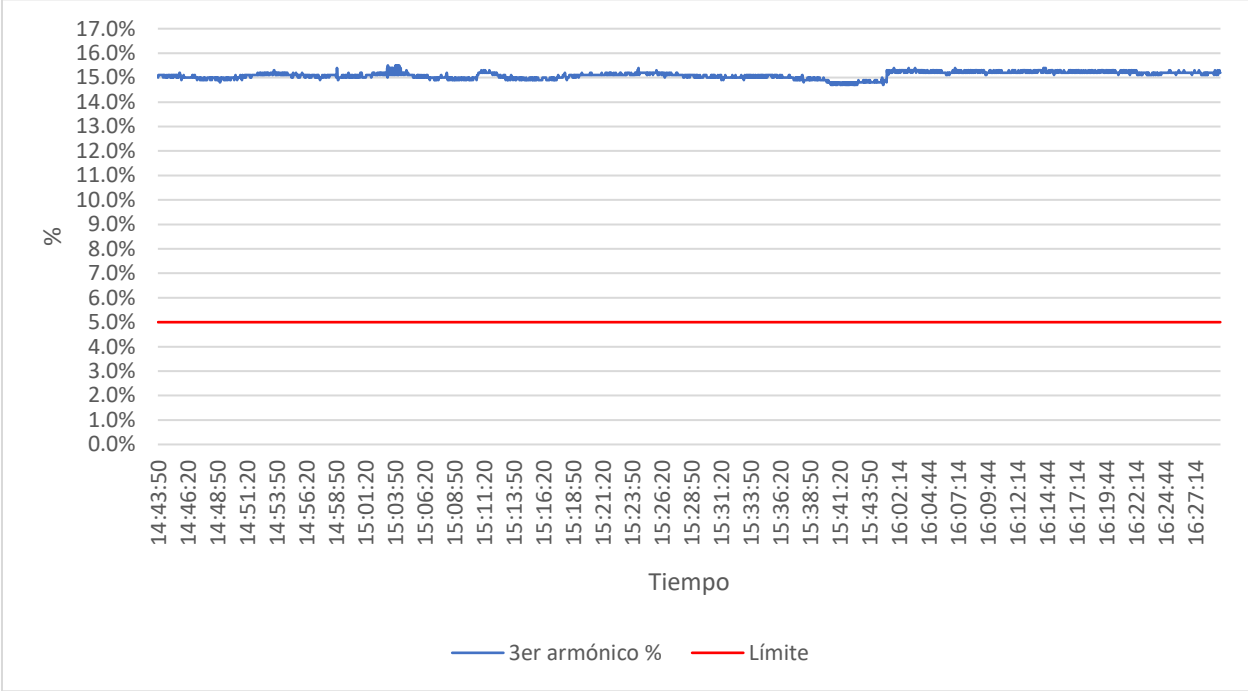


Figura 7. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V₂.

La Figura 7 muestra el nivel porcentual del tercer armónico en el voltaje V₂ a lo largo del tiempo.

Los valores del tercer armónico están mayormente alrededor del 15%, con algunas fluctuaciones pequeñas.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

El voltaje V_2 presenta un nivel alto de tercer armónico que excede el límite establecido del 5 %, lo cual puede afectar la calidad de la energía.

4.1.3. THD Voltaje V_3

La Figura 8, muestra el porcentaje de distorsión armónica total (THD) en el voltaje V_3 a lo largo del tiempo. El valor del percentil 95 (es decir, el valor que es excedido durante el 5% del período de medición) es de 8,3%, la mayoría de los valores de THD se mantienen cercanos a este valor, con algunas fluctuaciones menores. El voltaje V_3 tiene una distorsión armónica total que está por encima del límite deseado del 8%.

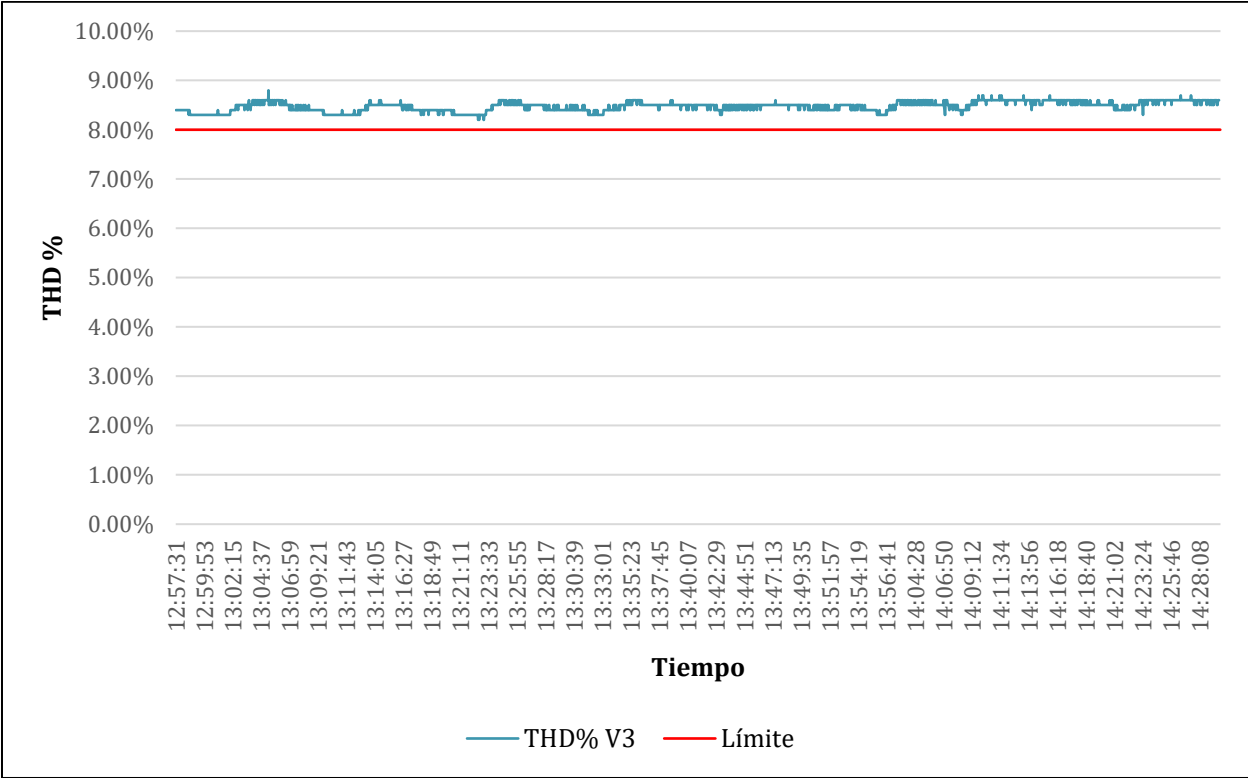


Figura 8. Gráfico de THD vs. Tiempo en el voltaje V_3 .

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

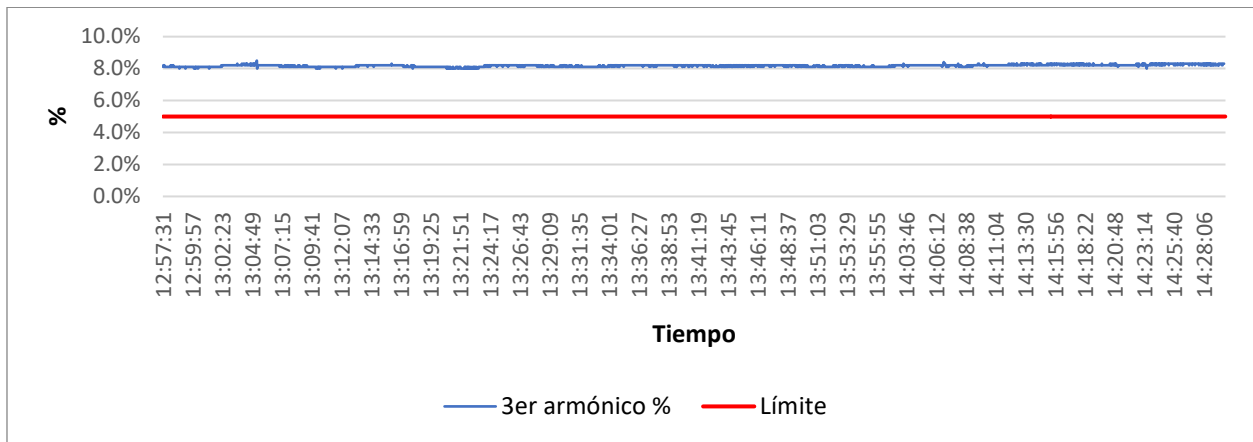


Figura 9. Gráfico del nivel armónico porcentual de tercer orden en el voltaje V_3 .

La Figura 9 muestra el nivel porcentual del tercer armónico en el voltaje V_3 a lo largo del tiempo.

Los valores del tercer armónico están mayormente alrededor del 8%, con algunas fluctuaciones pequeñas.

El voltaje V_3 presenta un nivel de tercer armónico que excede el límite establecido del 5 %, lo cual puede afectar la calidad de la energía.

4.2. Límites de distorsión armónica de corriente

Según [4] los límites de distorsión de corriente se aplicarán al PCC de un usuario principalmente con cargas productoras de armónicos. Para instalaciones con recursos basados principalmente en inversores, se recomienda a los usuarios consultar otras normas aplicables, como IEEE Std 1547-2018 o IEEE Std 2800-2022.

- Diario: Las corrientes armónicas del percentil 99 de tiempo muy corto (3 s) deberán ser inferiores a 2,0 veces los valores dados en la Tabla 4.
- Semanal: Las corrientes armónicas del percentil 99 de tiempo corto (10 min) deberán ser inferiores a 1,5 veces los valores indicados en la Tabla 4.
- Semanal: Las corrientes armónicas del percentil 95 de tiempo corto (10 min) deberán ser menores que los valores indicados en la Tabla 4.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Tabla 4. Límites de distorsión actuales para sistemas con clasificación de 120 V a 69 kV [4].

Distorsión armónica máxima de la corriente en porcentaje de IL						
Orden de armónicos individual ^b						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h < 11^a$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

a) Para $h \leq 6$, los armónicos pares se limitan al 50% de los límites de armónicos indicados en la tabla.

b) No se permiten las distorsiones de corriente que dan lugar a un desplazamiento de cc, por ejemplo, los convertidores de media onda.

c) Las instalaciones de generación de energía están limitadas a estos valores de distorsión de corriente, independientemente de la I_{sc}/I_L real, a menos que estén cubiertas por otras normas con alcance aplicable. donde:

I_{sc} = corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

I_L = corriente máxima de carga de demanda en el PCC en condiciones normales de funcionamiento con carga.

Tabla 5. Resumen de corrientes máximas de carga por fase.

	L ₁	L ₂	L ₃
I_L	141,7A	169,1A	136,7A

Según la Tabla 6 El límite de TDD en este sistema es del 18% ($12\% \cdot 1,5$). Sin embargo, los valores observados (TDD_1 , TDD_2 y TDD_3) están todos significativamente por encima de este límite, con valores entre 22,4% y 26,7%. Esto indica una alta distorsión en la corriente de demanda debido a los armónicos.

Tabla 6. Resumen de TDD en corriente.

I_{sc}/I_L	TDD ₁	TDD ₂	TDD ₃	TDD Límite
53,97	25,7%	22,4%	26,7%	18%

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

4.2.1. TDD Corriente I₁

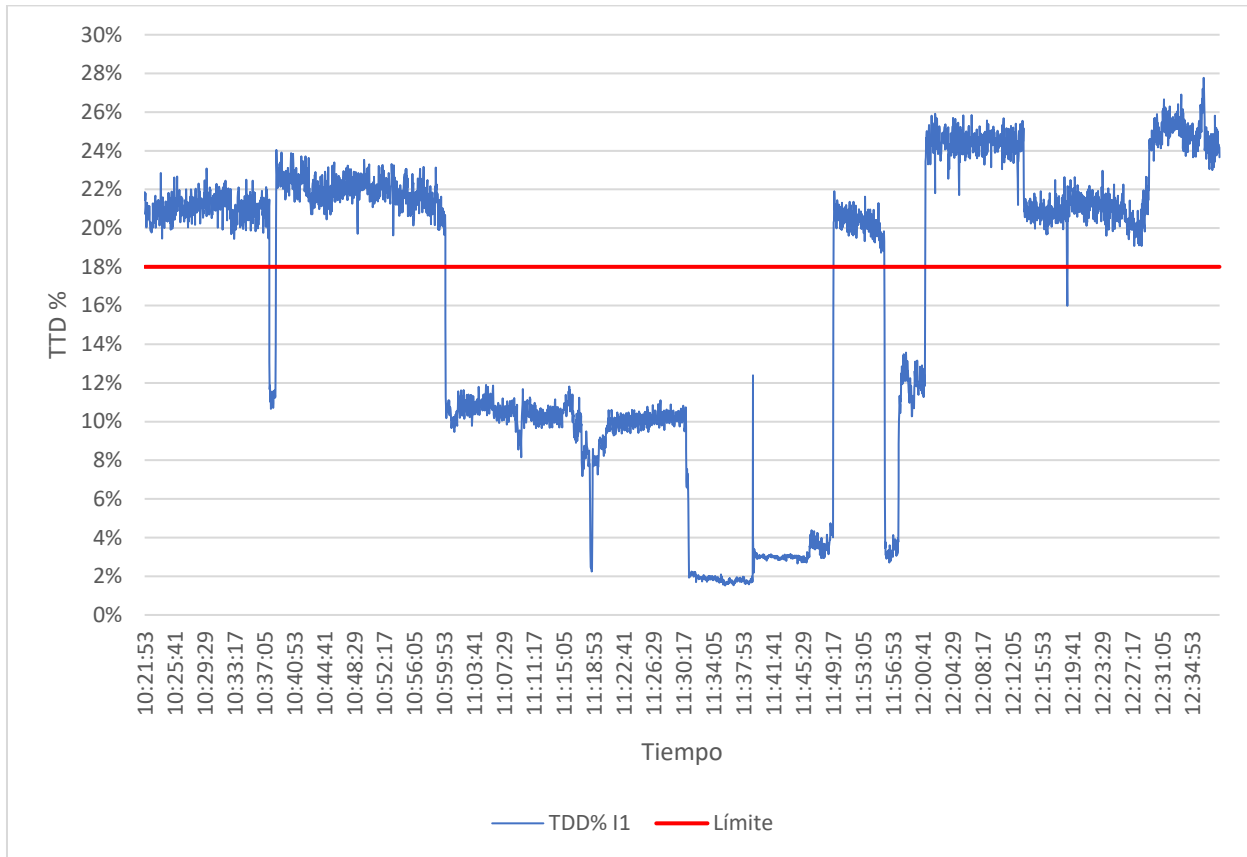


Figura 10. Gráfico de TDD₁ vs. Tiempo.

La Figura 10 muestra la evolución temporal de la Distorsión de la Demanda Total (TDD) de la corriente I₁, representada en la línea azul, en comparación con el límite permitido según la norma de referencia marcado por la línea roja, fijado en un nivel del 18%.

Observaciones:

TDD por encima del límite: Durante gran parte del período monitoreado, el valor de TDD supera el límite del 18%, alcanzando valores que oscilan entre el 20% y el 27%. Esto indica una alta distorsión en la corriente de demanda.

Fluctuaciones en el valor de TDD: El gráfico muestra varias caídas bruscas en los niveles de TDD, especialmente en puntos alrededor de las 11:32 y 11:50. Estas caídas llevan momentáneamente los niveles de TDD por debajo del límite, pero son seguidas por recuperaciones rápidas.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Esto sugiere que hay momentos específicos en los que la distorsión disminuye, debido a cambios en la carga, interrupciones o la activación de cargas no lineales.

Patrones de incremento: Después de cada caída en el TDD, los valores vuelven a subir rápidamente y permanecen elevados hasta la siguiente caída. Esto podría indicar una recurrencia de condiciones operativas que provocan un aumento en los niveles de armónicos.

En la última parte del gráfico, después de las 12:20, se observa un incremento sostenido que lleva el TDD a su nivel más alto, en torno al 27%, lo cual es muy superior al límite permitido.

Este gráfico indica que el sistema está experimentando niveles de distorsión de demanda total (TDD) consistentemente altos, que superan el límite del 18% la mayor parte del tiempo. Las caídas ocasionales por debajo del límite se deben a cambios en el perfil de carga. Sin embargo, la recurrencia y magnitud de los valores elevados de TDD sugieren que el sistema podría beneficiarse de la implementación de métodos de mitigación de armónicos para mejorar la calidad de la energía y reducir la distorsión en la corriente de demanda.

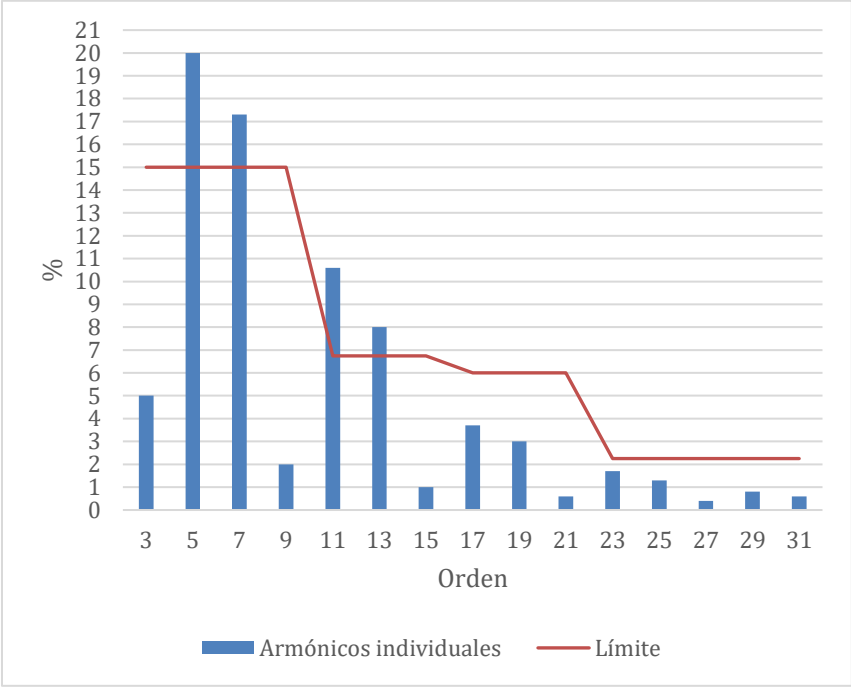


Figura 11. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_1 .

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

La Figura 11 muestra el percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_1 , representados en barras azules, en comparación con los límites establecidos, indicados con una línea roja. El eje Y representa el nivel porcentual de armónicos, mientras que el eje X indica los armónicos impares (3, 5, 7, etc.).

Observaciones:

Altos niveles en armónicos de bajo orden: Los armónicos de orden 5 y 7 presentan valores muy elevados, superando el 15%, respectivamente. Estos valores están por encima del límite permitido, indicado por la línea roja en esos puntos.

El armónico de orden 11 y 13 también muestra un valor significativo, superando el límite 6,75%.

Disminución en armónicos de orden más alto: A medida que el orden del armónico aumenta (13 en adelante), los niveles de los armónicos individuales tienden a disminuir. A partir del armónico de orden 13, la mayoría de los armónicos están dentro de los límites permitidos, con algunos valores muy bajos que se mantienen muy por debajo de la línea límite.

El gráfico indica que los armónicos de bajo orden (principalmente 5 y 7) están excediendo los límites permitidos, lo cual podría ser indicativo de una distorsión significativa en la forma de onda de la corriente I_1 debido a estas componentes armónicas. En contraste, los armónicos de orden más alto se encuentran mayormente dentro de los límites, lo que sugiere que el problema de distorsión se concentra en los armónicos de bajo orden.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

42.2. TDD Corriente I₂

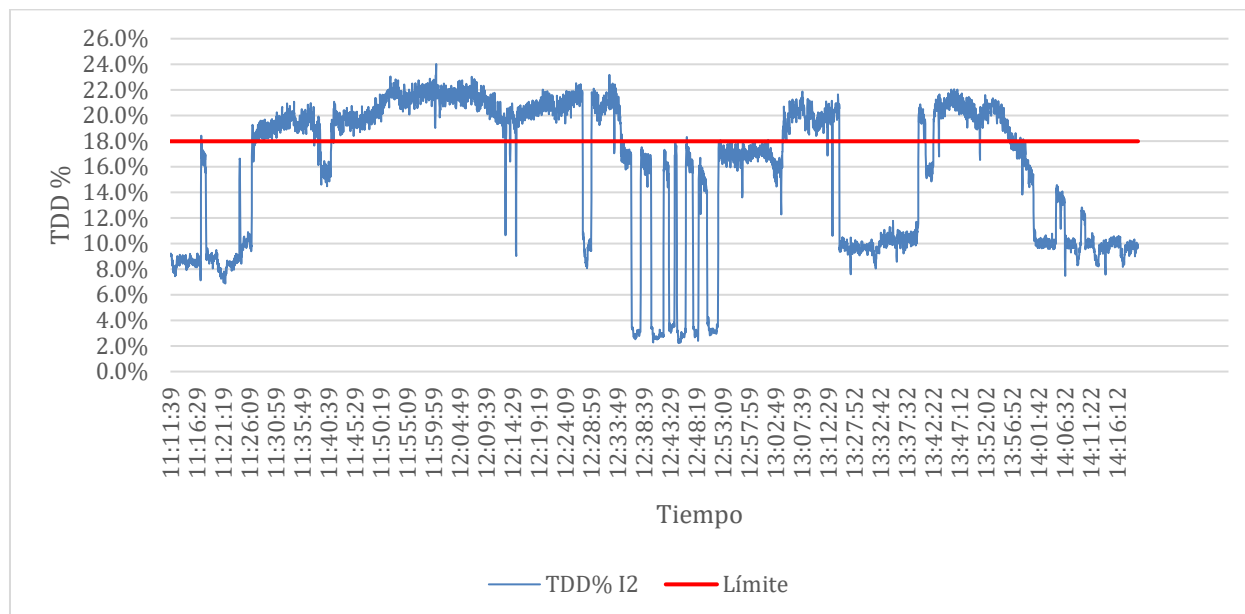


Figura 12. Gráfico de TDD₂ vs. Tiempo.

La Figura 12 muestra la evolución temporal de la Distorsión de la Demanda Total (TDD) de la corriente I₂, representada en la línea azul, en comparación con el límite permitido según la norma de referencia marcado por la línea roja, fijado en un nivel del 18%.

Observaciones:

TDD por encima del límite: Durante gran parte del período monitoreado, el valor de TDD supera el límite del 18%, alcanzando valores que oscilan entre el 18% y el 24%. Esto indica una alta distorsión en la corriente de demanda.

Fluctuaciones en el valor de TDD: El gráfico muestra varias caídas bruscas en los niveles de TDD, especialmente en puntos alrededor de las 12:38 y 12:53. Estas caídas llevan momentáneamente los niveles de TDD por debajo del límite, pero son seguidas por recuperaciones rápidas.

Esto sugiere que hay momentos específicos en los que la distorsión disminuye, debido a cambios en la carga, interrupciones o la activación de cargas no lineales.

Patrones de incremento: Después de cada caída en el TDD, los valores vuelven a subir rápidamente y permanecen elevados hasta la siguiente caída. Esto podría indicar una recurrencia de condiciones operativas que provocan un aumento en los niveles de armónicos.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Este gráfico indica que el sistema está experimentando niveles de distorsión de demanda total (TDD) consistentemente altos, que superan el límite del 18% la mayor parte del tiempo. Las caídas ocasionales por debajo del límite se deben a cambios en el perfil de carga. Sin embargo, la recurrencia y magnitud de los valores elevados de TDD sugieren que el sistema podría beneficiarse de la implementación de métodos de mitigación de armónicos para mejorar la calidad de la energía y reducir la distorsión en la corriente de demanda.

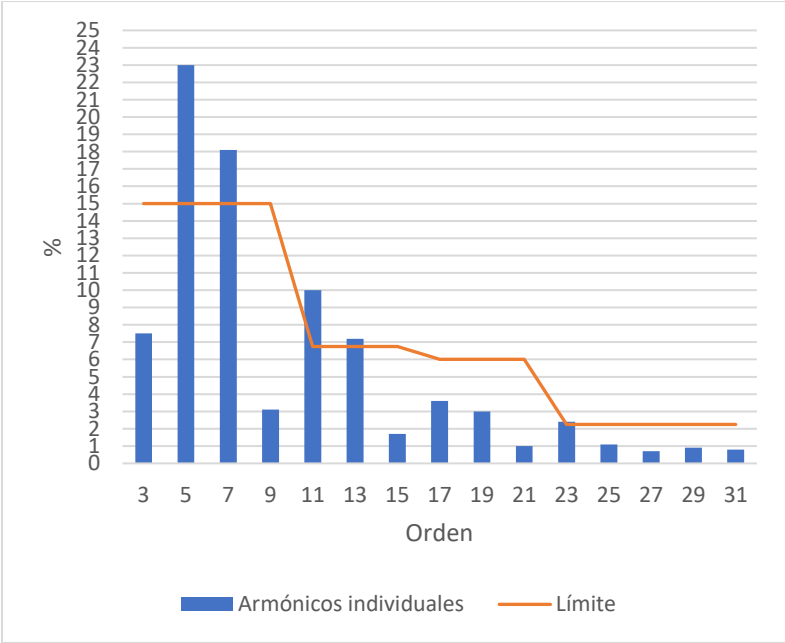


Figura 13. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_2 .

La Figura 13 muestra el percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_2 , representados en barras azules, en comparación con los límites establecidos, indicados con una línea naranja. El eje Y representa el nivel porcentual de armónicos, mientras que el eje X indica los armónicos impares (3, 5, 7, etc.).

Observaciones:

Altos niveles en armónicos de bajo orden: Los armónicos de orden 5 y 7 presentan valores muy elevados, superando el 15%, respectivamente. Estos valores están por encima del límite permitido, indicado por la línea roja en esos puntos.

El armónico de orden 11 y 13 también muestra un valor significativo, superando el límite 6,75%.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Disminución en armónicos de orden más alto: A medida que el orden del armónico aumenta (13 en adelante), los niveles de los armónicos individuales tienden a disminuir. A partir del armónico de orden 13, la mayoría de los armónicos están dentro de los límites permitidos (a excepción del orden 23), con algunos valores muy bajos que se mantienen muy por debajo de la línea límite.

El gráfico indica que los armónicos de bajo orden (principalmente 5 y 7) están excediendo los límites permitidos, lo cual podría ser indicativo de una distorsión significativa en la forma de onda de la corriente I_2 debido a estas componentes armónicas. En contraste, los armónicos de orden más alto se encuentran mayormente dentro de los límites, lo que sugiere que el problema de distorsión se concentra en los armónicos de bajo orden.

4.2.3. TDD Corriente I_3

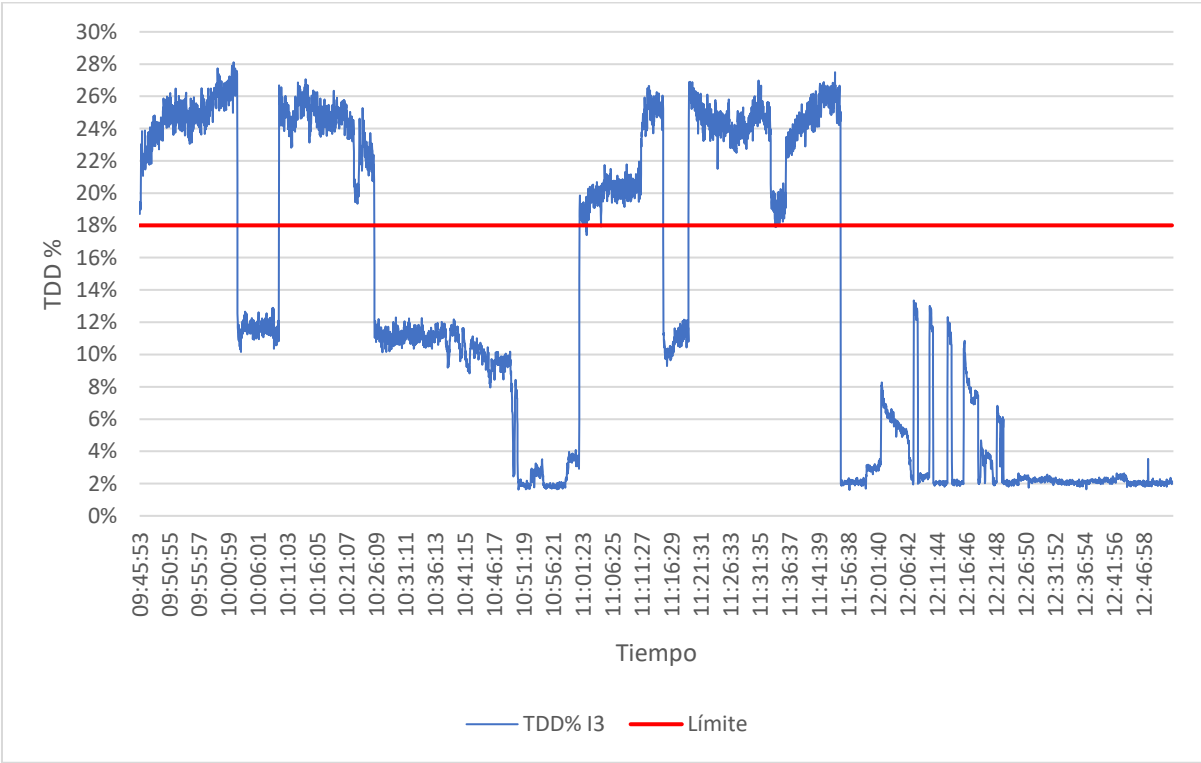


Figura 14. Gráfico de TDD₃ vs. Tiempo.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

La Figura 14 muestra la evolución temporal de la Distorsión de la Demanda Total (TDD) de la corriente I_3 , representada en la línea azul, en comparación con el límite permitido según la norma de referencia marcado por la línea roja, fijado en un nivel del 18%.

Observaciones:

TDD por encima del límite: Durante gran parte del período monitoreado, el valor de TDD supera el límite del 18%, alcanzando valores que oscilan entre el 18% y el 28%. Esto indica una alta distorsión en la corriente de demanda.

Fluctuaciones en el valor de TDD: El gráfico muestra varias caídas bruscas en los niveles de TDD, especialmente en puntos alrededor de las 10:22 a 11:03 y 11:55 a 12:47. Estas caídas llevan momentáneamente los niveles de TDD por debajo del límite, pero son seguidas por recuperaciones rápidas.

Esto sugiere que hay momentos específicos en los que la distorsión disminuye, debido a cambios en la carga, interrupciones o la activación de cargas no lineales.

Patrones de incremento: Después de cada caída en el TDD, los valores vuelven a subir rápidamente y permanecen elevados hasta la siguiente caída. Esto podría indicar una recurrencia de condiciones operativas que provocan un aumento en los niveles de armónicos.

Este gráfico indica que el sistema está experimentando niveles de distorsión de demanda total (TDD) consistentemente altos, que superan el límite del 18% la mayor parte del tiempo. Las caídas ocasionales por debajo del límite se deben a cambios en el perfil de carga. Sin embargo, la recurrencia y magnitud de los valores elevados de TDD sugieren que el sistema podría beneficiarse de la implementación de métodos de mitigación de armónicos para mejorar la calidad de la energía y reducir la distorsión en la corriente de demanda.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024



Figura 15. Percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_3 .

La Figura 15 muestra el percentil 99 de armónicos individuales impares de la corriente I_3 , representados en barras azules, en comparación con los límites establecidos, indicados con una línea naranja. El eje Y representa el nivel porcentual de armónicos, mientras que el eje X indica los armónicos impares (3, 5, 7, etc.).

Observaciones:

Altos niveles en armónicos de bajo orden: Los armónicos de orden 5 y 7 presentan valores muy elevados, superando el 15%, respectivamente. Estos valores están por encima del límite permitido, indicado por la línea roja en esos puntos.

El armónico de orden 11 y 13 también muestra un valor significativo, superando el límite 6,75%.

Disminución en armónicos de orden más alto: A medida que el orden del armónico aumenta (13 en adelante), los niveles de los armónicos individuales tienden a disminuir. A partir del armónico de orden 13, la mayoría de los armónicos están dentro de los límites permitidos, con algunos valores muy bajos que se mantienen por debajo de la línea límite.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

El gráfico indica que los armónicos de bajo orden (principalmente 5 y 7) están excediendo los límites permitidos, lo cual podría ser indicativo de una distorsión significativa en la forma de onda de la corriente I_3 debido a estas componentes armónicas. En contraste, los armónicos de orden más alto se encuentran mayormente dentro de los límites, lo que sugiere que el problema de distorsión se concentra en los armónicos de bajo orden.

5. Alternativa propuesta

En la Tabla 7 se realiza una comparativa entre el filtro activo y el pasivo para la selección de la propuesta que más se adapte a las necesidades.

Tabla 7. Cuadro comparativo de filtro activo vs. pasivo.

Característica	Filtro Activo	Cumple		Filtro Pasivo	Cumple	
		Si	No		Si	No
Adaptabilidad	Alta (ajuste automático)	x		Baja (fijo y no ajustable)		x
Eficacia	Alta (reduce múltiples armónicos)	x		Moderada (limitada a pocos armónicos)		x
Costo	Generalmente más alto		x	Generalmente más bajo	x	
Riesgo de resonancia	Bajo	x		Alto		x

Considerando la presencia de altos niveles de TDD y las fluctuaciones presentadas en las Figuras anteriores, la opción de un filtro activo de armónicos sería la más efectiva para este sistema, ya que permite una reducción adaptativa de los armónicos en un amplio rango. Un filtro activo o puede abordar tanto los picos altos y constantes del TDD como las caídas intermitentes, proporcionando una solución más completa y flexible para mejorar la calidad de energía en el sistema.

En el Anexo 1 se incluye la memoria de cálculo del filtro activo, que determina la necesidad de un filtro de 75 amperios.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

6. Presupuesto

En la Tabla 8, se presenta el costo de filtros activos de dos marcas resultando la más económica la de la marca Circutor.

Tabla 8. Comparación de precios de filtros activos.

Marca	Modelo	Capacidad	Costo (USD)
Circutor	AFQm-3WF-030M-480	75A	13.451
Schneider	PCSP080D7IP54	80A	136.273

En la Tabla 9, se presenta el presupuesto de la alternativa propuesta. El componente más costoso es el filtro activo, con un valor de 13.451 USD, representando alrededor del 72% del presupuesto total.

Se ha destinado un 10% del presupuesto (1.669 USD) para cubrir posibles costos adicionales o variaciones imprevistas.

Tabla 9. Presupuesto de la alternativa propuesta.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Filtro activo AFQm-3WF-030M	1	13.451,00	13.451,00
Transporte	1	79,35	79,35
Instalación	1	2.690,00	2.690,00
Conductores 25mm ²	Global	114,00	114,00
Terminales	Global	16,00	16,00
Transformador de corriente núcleo partido 200 A	3	221,00	663,00
Interruptor termomagnético	1	118,50	118,50
		Imprevistos (10%)	1.669,03
		Total (USD)	18.801,35

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó el relevamiento de datos técnicos de las instalaciones eléctricas de la línea de producción de filtro y empaque (conformadas por dos "líneas" idénticas) identificando que en cada línea 70,4% de la potencia instalada (40,89 kW) son cargas no lineales (variadores de frecuencia y fuentes conmutadas).

Tabla 10. Resumen de cargas no lineales por línea.

Nº de Tablero	Variadores	Fuentes
Tablero 1	2	1
Tablero 2	3	2

Se llevaron a cabo mediciones de las magnitudes eléctricas referente a análisis de armónicos (hasta el orden 50) establecidos en la IEEE-519 en la línea de producción Filtro y Empaque utilizando el analizador de redes EXTECH PQ3350.

Las corrientes máximas encontradas durante el intervalo de medición se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Resumen de corrientes de línea máximas.

	L ₁	L ₂	L ₃
I _{max}	141,7A	169,1A	136,7A

En la Tabla 12 se realiza un resumen del percentil 99 (es decir, el valor que es excedido durante el 1% del período de medición) de los niveles de TDD en corriente por fase. Excediendo el límite establecido por la IEEE-519 2022.

Tabla 12. Resumen de niveles de TDD por fase.

I _{sc} /I _L	TDD ₁	TDD ₂	TDD ₃	TDD Límite
53,97	25,7%	22,4%	26,7%	18%

En la

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Tabla 13 se realiza un resumen del valor del percentil 95 (es decir, el valor que es excedido durante el 5% del período de medición) de los niveles de THD en voltaje por fase excediendo el límite establecido la IEEE-519.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ - 2024

Tabla 13. Resumen de THD por fase.

Voltaje	THD ₁	THD ₂	THD ₃
Percentil 95	8,9%	15,3%	8,3%

Dado el alto nivel de distorsión armónica en el sistema y a las fluctuaciones del mismo, un filtro activo de armónicos sería la solución más eficaz. Este filtro, con una capacidad de 75 amperios, permitirá una reducción adaptativa de armónicos en un amplio rango. Se elaboró el presupuesto de la alternativa seleccionada alcanzando la suma de 18.801 USD.

CONCLUSIONES

Se realizó el relevamiento de datos técnicos de las instalaciones eléctricas de la línea de producción de filtro y empaque identificando que en cada línea 70,4% de la potencia instalada son cargas no lineales (variadores de frecuencia y fuentes conmutadas).

Se llevaron a cabo mediciones de las magnitudes eléctricas referente a análisis de armónicos establecidos en la IEEE-519 en la línea de producción Filtro y Empaque utilizando el analizador de redes EXTECH PQ3350 que permitió medir valores instantáneos RMS, registrar las voltajes por cada fase; asimismo, registrar las corrientes por cada fase, identificar el desbalance de corriente (%), registrar la magnitud de la distorsión armónica de voltaje THDV y armónica de corriente THDi individuales (Hasta el orden 50).

Encontrándose tasas de distorsión de la demanda total en corriente (TDD) del 22,4% a 26,7% superando el valor de referencia del 8% según la norma. Y tasas de distorsión armónica total (THD) en voltaje del 8,3% a 15,3% superando el valor de referencia de 8%.

Considerando la presencia de altos niveles de TDD y las fluctuaciones presentadas en las Figuras anteriores, la opción de un filtro activo de armónicos sería la más efectiva para este sistema, ya que permite una reducción adaptativa de los armónicos en un amplio rango. Según el análisis realizado se determina la necesidad de un filtro activo de 75A.

Se elaboró el presupuesto de la alternativa seleccionada alcanzando la suma de 18.801 USD.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el análisis de armónicos en las demás líneas de producción de la fábrica que no fueron abarcados en el presente trabajo.

Realizar monitoreos periódicos de las diferentes magnitudes eléctricas (voltaje, frecuencia, armónicos y perturbaciones) con el fin de prevenir deficiencias en la calidad de la energía eléctrica, evitando paralizaciones inesperadas de los equipos y asegurando un funcionamiento adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Barzola Meza and C. R. Ventura Gonzalo, Sistema de filtros para mejorar la calidad de la energía eléctrica en la planta de producción de la Cooperativa Agropia - 2021, Huancayo, 2021.
- [2] M. Caceres and V. Ariel, Análisis de los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de la ciudad de coronel Oviedo y propuesta de medidas de atenuación de los mismos, Coronel Oviedo, 2023.
- [3] D. Román and Alexis, Análisis de los niveles de armónicos y propuesta de medidas de atenuación en la instalación eléctrica de la empresa Cooperativa Chortitzer sucursal Coronel Oviedo, Coronel Oviedo, 2024.
- [4] IEEE Power and Energy Society ,
IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems , IEEE Std 519-2022, 2022.
- [5] M. A. S. Cortés, Calidad de la Energía Eléctrica, 2009.
- [6] J. S. R. Daniel, *ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA EMPRESA.*
- [7] I. D. O. P. Ardila, "Compensación Selectiva de Armónicos," 2007. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/1707/TD00117.pdf?sequence=1>.

ANEXOS

Anexo 1

A.1. Dimensionamiento del filtro

Se debe tener en cuenta el factor de servicio a aplicar en función del THD de voltaje de la instalación, debido al incremento de la distorsión que provocan algunas cargas al mejorar su voltaje de alimentación, tal y como se explica a continuación:

El filtro activo debe estar dimensionado para las corrientes de armónicos que debe filtrar. La corriente nominal del filtro debe ser como mínimo un 20% superior al nivel máximo de armónicos a filtrar. Este factor puede ser mayor según las características de la instalación.

Los filtros activos pueden presentar problemas de sobrecarga al intentar cancelar las corrientes armónicas en redes con alta impedancia de cortocircuito. El síntoma más claro para detectar estos casos suele ser que originalmente se parte de un THD(V) (en voltaje) superior al 3%. Se ha constatado que cuanto más elevado sea el THD(V) inicial mayor probabilidad de sobrecarga del filtro. El motivo de dicho comportamiento es que la carga no se comporta como una fuente de corriente, sino que cuanto mayor es la corriente armónica eliminada por el filtro, más armónicos genera la carga, pudiendo llegar a generar más del doble de lo medido inicialmente. Para evitar este fenómeno conviene sobredimensionar el filtro activo multiplicando la corriente inicial de armónicos medida en la carga por un factor de seguridad (FSh). Es decir:

$$I_{FILTRO} = F_{Sh} * I_{CARGA} * TDH(I)$$
$$I_{FILTRO} = 1,399 * 151.52 A * 31,1\%$$
$$I_{FILTRO} = 72,91A$$

Donde:

I_{FILTRO} : corriente nominal del filtro activo.

F_{Sh} : factor de seguridad > 1,2

I_{CARGA} : corriente máxima de la carga.

THD(I): distorsión armónica de la corriente de carga.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

Por lo anterior se propone un filtro activo cuya corriente sea el valor comercial inmediatamente superior que es de 75A.

De la tabla siguiente se elige el mayor de los valores (31,1%) para determinar el I_{FILTRO} :

	THD ₁	THD ₂	THD ₃
Percentil 99	30,4%	31,1%	30,1%

Ecuación 1: Corriente nominal del Filtro Activo

Para el cálculo de este factor de seguridad deberemos conocer previamente el parámetro llamado relación de cortocircuito RSC, en el punto de conexión de las cargas no lineales a compensar (no a la entrada de la instalación). La relación de cortocircuito se define como la relación entre la corriente de cortocircuito de una red (ISC) y la corriente nominal del conjunto de convertidores no lineales (ICNL) que generan los armónicos que se pretenden filtrar. (Ecuación 2)

$$R_{SC} = \frac{I_{SC}}{I_{CNL}}$$

Ecuación 2: Cálculo de la relación de cortocircuito Rsc

Donde:

I_{sc} : 9.127,03A.

I_{cni} : 151,52A.

$$R_{sc} = \frac{9127,03 \text{ A}}{151,52 \text{ A}} = 60,23$$

En una instalación real, se puede calcular la corriente de cortocircuito (I_{sc}) en el punto de conexión mencionado, teniendo el voltaje en dicho punto para dos corrientes de carga distintas. Por ejemplo, a plena carga, I_A y 10% de carga, I_B . Si V_{OC} es el voltaje nominal en vacío, la I_{sc} , se puede calcular mediante la fórmula indicada en la Figura 16.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

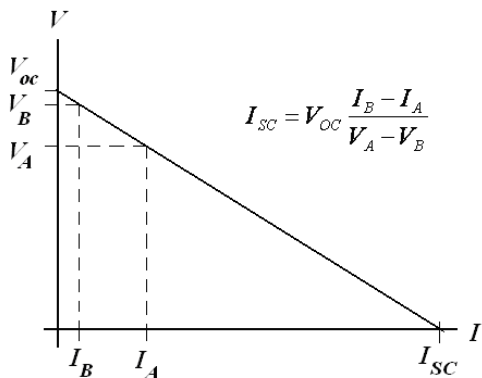


Figura 16. Gráfico para el cálculo de I_{sc}

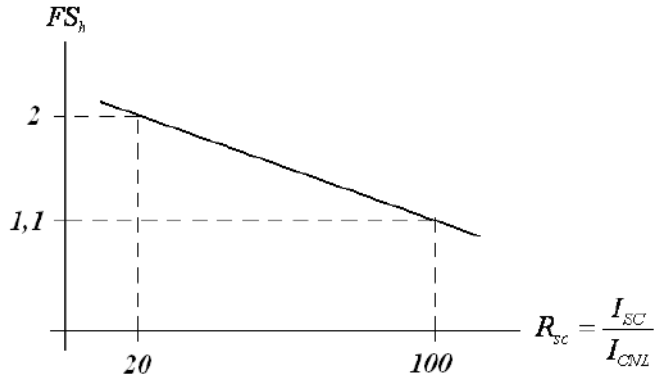


Figura 17. Gráfico aproximado para el cálculo del FSh.

Ecuación de la recta de la Figura 17 para cálculo del F_{sh} :

$$F_{sh} = (-0,01125 * R_{sc}) + 2,225 = F_{sh} = (-0,01125 * 60,23) + 2,225 = 1,547$$

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

Anexo 2

A.2. Datos técnicos del filtro seleccionado



AFQm-3WF-030M-480

AFQm-3WF-030M-480, Filtro activo multifunción, 3 hilos

Código: R7MM0F.

- > Sistema: 3 hilos, 230...480 V
- > Corriente de fase (A): 30
- > Corriente de cresta (A): 60
- > Fijación: Mural

Descripción

Los filtros activos con tecnología multinivel **AFQm** de instalación en pared, constituyen la solución más completa para resolver los problemas de calidad causados, tanto en instalaciones trifásicas industriales como comerciales o de servicios, no únicamente por los armónicos, sino también por el consumo de potencia reactiva. Las características y funciones implementadas son las siguientes:

- Capacidad unitaria de filtrado para corrientes de 30 A, 75 A y 100 A.
- Pequeño armario que se instala en pared. Facilidad en instalación por dimensiones.
- Gama para instalaciones de 3 hilos (modelo 3W) o 4 hilos (modelo 4W).
- Multirango de tensión y frecuencia (50/60 Hz)
- Reducción de las corrientes armónicas hasta el orden de 50º armónico.
- Frecuencias armónicas a filtrar seleccionables para lograr la máxima eficacia del filtro.
- Compensación de potencia reactiva (inductiva/capacitiva).
- Equilibrado de las corrientes de fase, mejora de consumo en el neutro (modelo 4W)

Si se requieren mayores capacidades de filtrado, hasta un máximo de 100 filtros pueden conectarse en paralelo (los filtros deben ser el mismo modelo de 3 ó 4 hilos).

Aplicación

Solución ideal para instalaciones, con gran cantidad de cargas monofásicas y trifásicas que sean generadoras de armónicos tales como ordenadores, SAI, luminarias, aparatos elevadores, aires acondicionados con variador, etc. También para instalaciones que requieren una buena calidad de suministro con vistas a aumentar la eficiencia de la producción o a mejorar la continuidad de suministro del sistema.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO

MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024



AFQm-3WF-030M-480

Código: R7MM0F.

Especificaciones

Alimentación en alterna

Consumo	650 W
Frecuencia	50 / 60 Hz ($\pm 5\%$)
Tensión nominal	208 ... 480 V- F-F ($\pm 10\%$)

Características mecánicas

Tamaño (mm) ancho x alto x fondo	430 x 530 x 178 (mm)
Envolvente	Acero galvanizado 1,5 mm
Ruido	52 dBA
Tipo de conexión	Red y Tierra: Terminal anilla M6, Corriente: conector 6 polos, RS-485: conector 3 polos, Ethernet: RJ-45
Peso Neto (kg)	21

Características ambientales

Grado de protección	IP 20
Humedad relativa (sin condensación)	0 ... 95 %
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +50 °C
Temperatura de trabajo	-10 ... +45 °C

Características eléctricas

Factor cresta (corriente)	2:1
Corriente máxima (fase)	30 A (RMS)
Sistema de tierras	TN, TT

Círculo de medida de corriente

Relación de transformación	5 ... 5000 / 5A
----------------------------	-----------------

Comunicación red

Protocolo	TCP/IP, Modbus TCP
Tecnología / Tipo	Ethernet

Normas

Seguridad eléctrica, Altitud máx. (m)	3000 (2000 m without performance degradation)
Normas	IEC 61000-6-4, UNE-EN 55011, IEC 61000-6-2, IEC 62477-1, IEC 61439-1

Interface usuario

Tipo display	TFT color, táctil de 3,5"
--------------	---------------------------

Precisión de medidas

Armónicos de tensión (THD)	25 % (máx)
----------------------------	------------

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024



AFQm-3WF-030M-480

Código: R7MM0F.

Prestaciones

Compensación de fases	Seleccionable
Compensación de potencia reactiva (Kvar)	Seleccionable
Filtrado / tiempo de respuesta	2º ... 50º armónico (seleccionable) / < 100 µs
Montaje en paralelo	Hasta 100 unidades de diferente calibre Conexión de los transformadores solo en unidad Master
Programación de prioridades	Seleccionable

Salida de fuente de alimentación

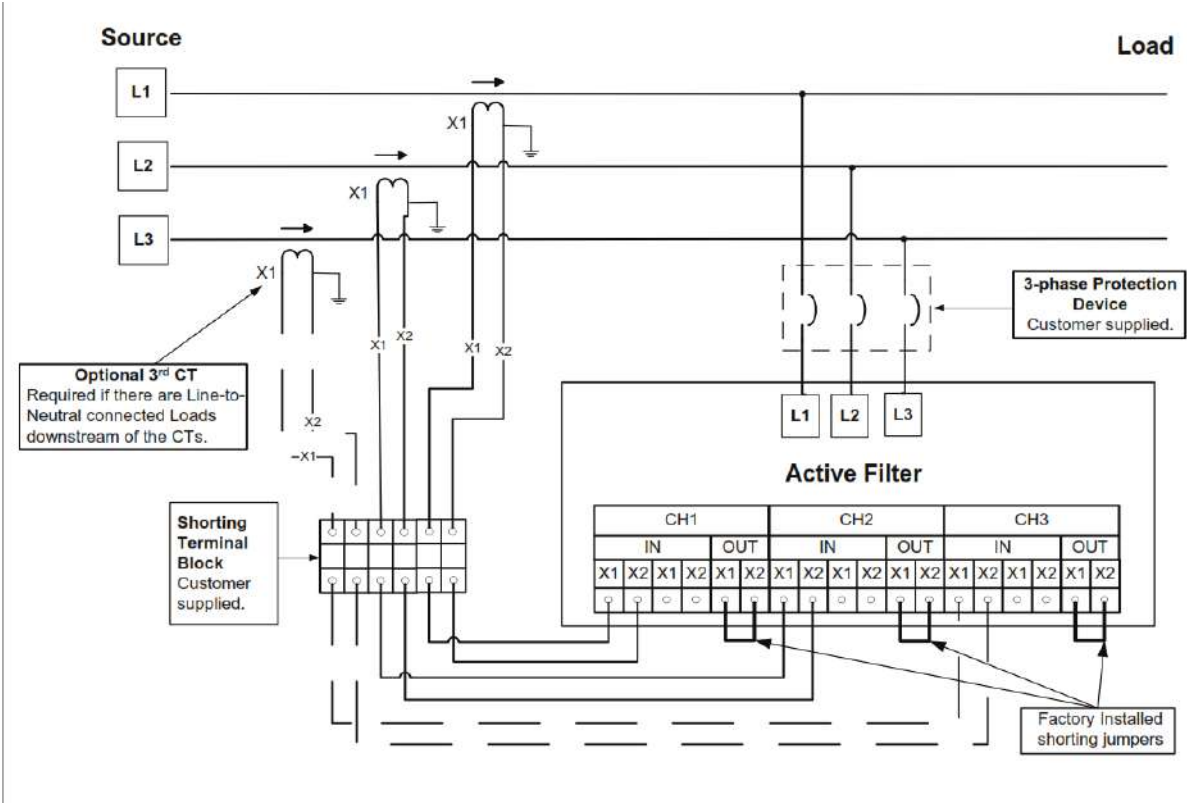
Potencia	22906 VA
----------	----------

Comunicación serie

Protocolo	Modbus/RTU
Tecnología / Tipo	RS-485

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.2.2. Esquema eléctrico para la instalación



Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

Anexo 3

A.3. Tablas y gráficos de lecturas

A.3.1. Intensidades de línea

En la Figura 18 , se presenta tres series de datos que corresponden a las corrientes I₁, I₂ e I₃. Se aprecia que en general las corrientes están balanceadas.

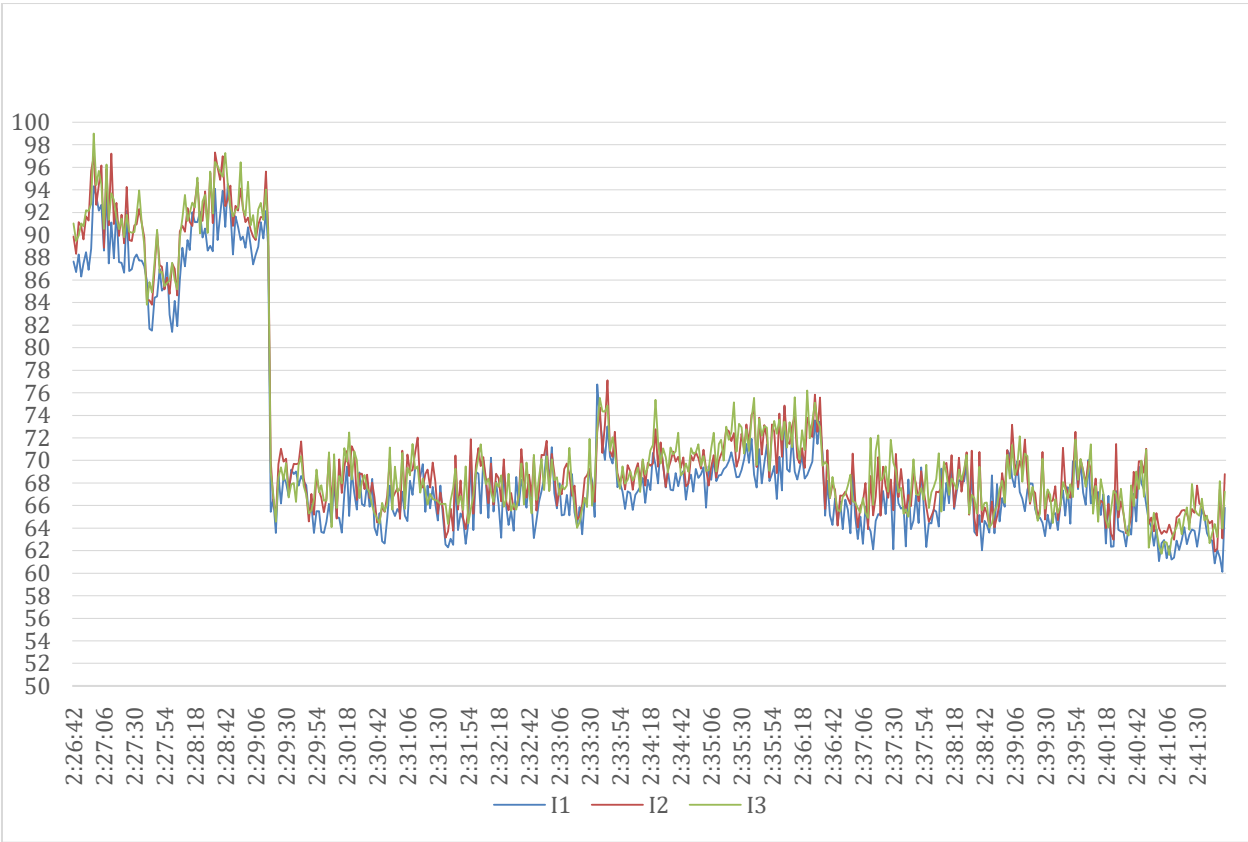


Figura 18. Lectura de intensidades de la Línea Filtro y Empaque.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

Tabla 14. Muestra de medición de las corrientes.

Fecha	Tiempo	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)
10/31/2024	2:26:42	87,66	89,85	91,02
10/31/2024	2:26:44	86,7	88,32	89,46
10/31/2024	2:26:46	88,26	91,14	89,94
10/31/2024	2:26:48	86,31	90,78	91,02
10/31/2024	2:26:50	87,48	89,61	90,78
10/31/2024	2:26:52	88,47	91,65	92,19
10/31/2024	2:26:54	86,91	91,29	92,13
10/31/2024	2:26:56	88,77	95,67	92,76
10/31/2024	2:26:58	94,32	96,99	99
10/31/2024	2:27:00	93,45	92,67	94,44
10/31/2024	2:27:02	92,16	94,44	95,67
10/31/2024	2:27:04	92,67	96,18	94,47
10/31/2024	2:27:06	88,62	88,86	90,54
10/31/2024	2:27:08	94,11	95,85	96,24
10/31/2024	2:27:10	87,48	90,87	91,35
10/31/2024	2:27:12	91,11	97,23	93,69
10/31/2024	2:27:14	87,93	90,96	93,09
10/31/2024	2:27:16	92,34	92,85	91,53
10/31/2024	2:27:18	87,6	89,91	90,51
10/31/2024	2:27:20	87,54	91,8	91,44
10/31/2024	2:27:22	86,64	89,28	89,82
10/31/2024	2:27:24	92,13	94,26	91,8
10/31/2024	2:27:26	86,79	89,55	90,3
10/31/2024	2:27:28	86,97	89,46	90,21
10/31/2024	2:27:30	87,96	90,87	90,27
10/31/2024	2:27:32	88,26	90,93	91,77
10/31/2024	2:27:34	87,72	92,31	93,96
10/31/2024	2:27:36	87,72	91,05	91,05
10/31/2024	2:27:38	87,21	89,79	89,13
10/31/2024	2:27:40	85,95	84,24	83,82
10/31/2024	2:27:42	81,69	84,21	85,83
10/31/2024	2:27:44	81,51	83,82	84,9
10/31/2024	2:27:46	84,45	86,91	87,57
10/31/2024	2:27:48	84,54	90,27	90,45
10/31/2024	2:27:50	87,00	87,3	86,64
10/31/2024	2:27:52	85,05	87,18	86,73
10/31/2024	2:27:54	85,32	85,17	85,47
10/31/2024	2:27:56	87,54	86,22	85,74
10/31/2024	2:27:58	82,92	84,78	85,95

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.2. Comparativa de TDD% con intensidades de línea

En los siguientes gráficos, se presentan dos series de datos a lo largo del tiempo:
TDD % (en azul): Representa la Distorsión de la Demanda Total, que indica la cantidad de distorsión armónica presente en la corriente en relación con la carga total. Cuanto mayor sea este porcentaje, mayor será la distorsión.

Intensidad en Amperios (en verde): Muestra la magnitud de la corriente en amperios. En muchos momentos del gráfico, cuando la intensidad (en verde) aumenta, el TDD % también tiende a incrementarse, lo que sugiere una correlación directa entre ambos. Esto puede deberse a que, al aumentar la carga, la cantidad de distorsión armónica se incrementa.



Figura 19. Comparativa de TDD1% con I_1 .

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

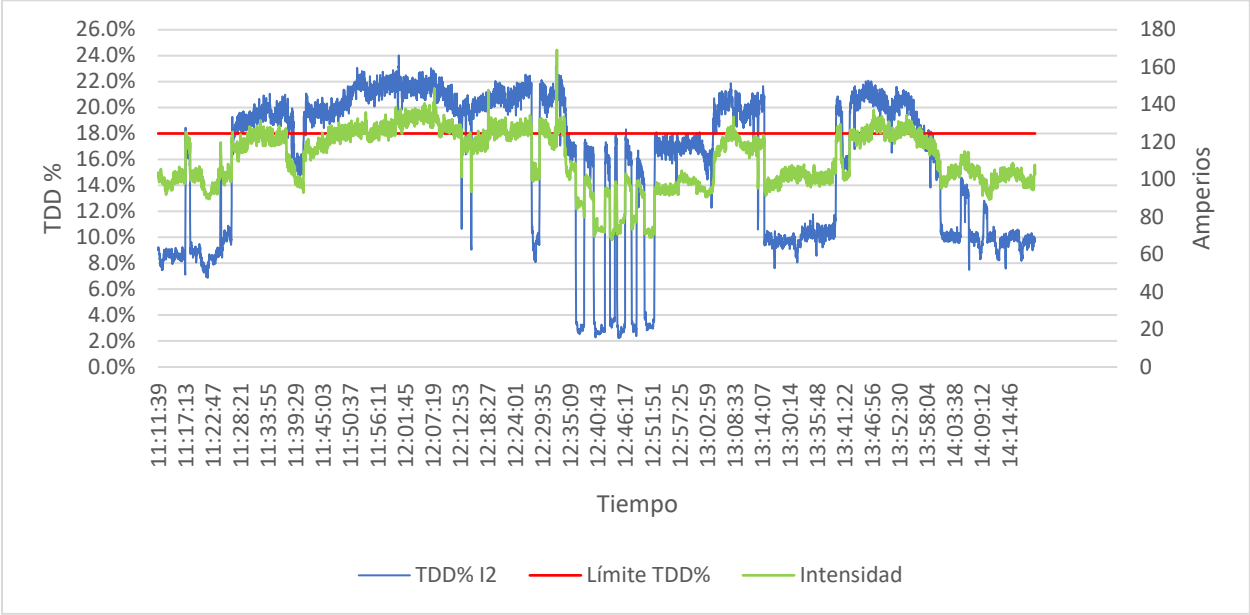


Figura 20. Comparativa de TDD2% con I₂.

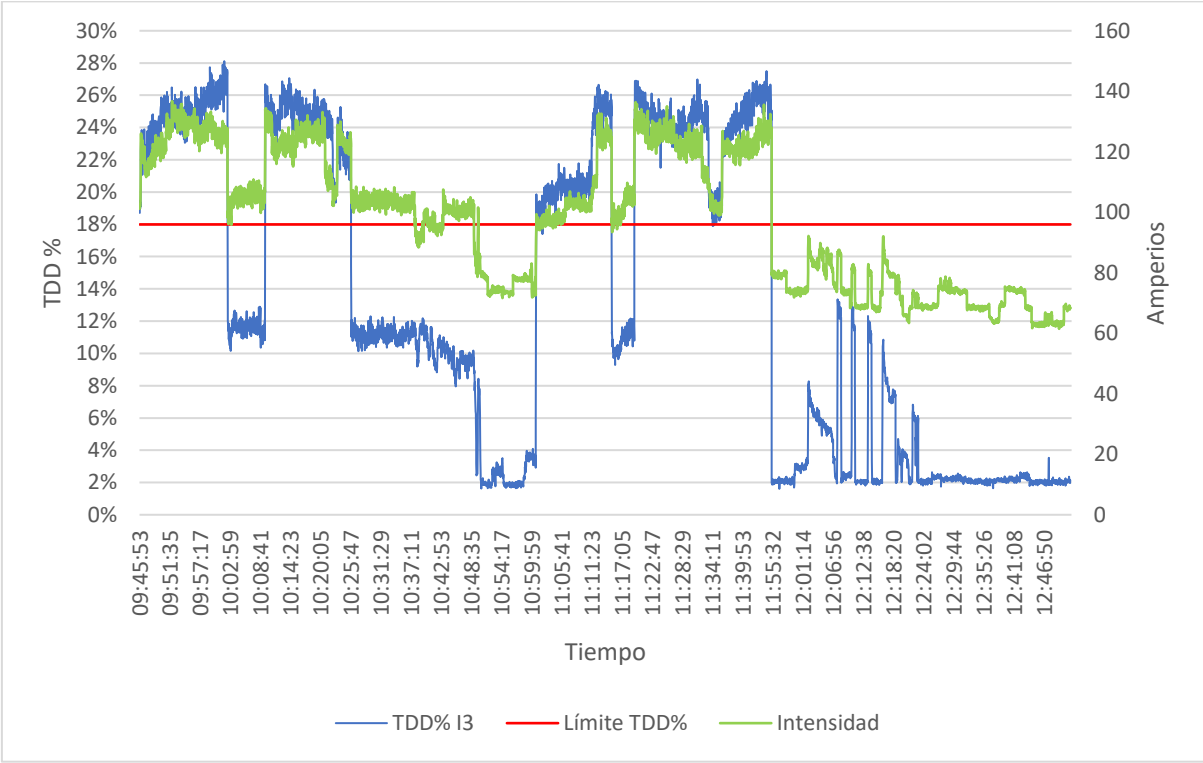


Figura 21. Comparativa de TDD3% con I₃.

A.3.3. Comparativa de armónicos de corriente de las componentes impares de I_1

En la Figura 22, se presenta la comparativa de armónicos de corriente de las componentes impares de orden 5, 7, 11 y 13 (componentes que superan los valores según la IEEE 519) a lo largo del tiempo para la corriente I_1 . La componente de Orden 5 (Rojo) tiene el mayor porcentaje entre los armónicos y muestra una variabilidad significativa a lo largo del tiempo. En varios momentos, se acerca o supera el 20%, especialmente al inicio y cerca del final de la medición, lo cual indica una fuerte presencia de esta distorsión en la corriente. Se puede apreciar una correlación significativa entre los distintos componentes impares.

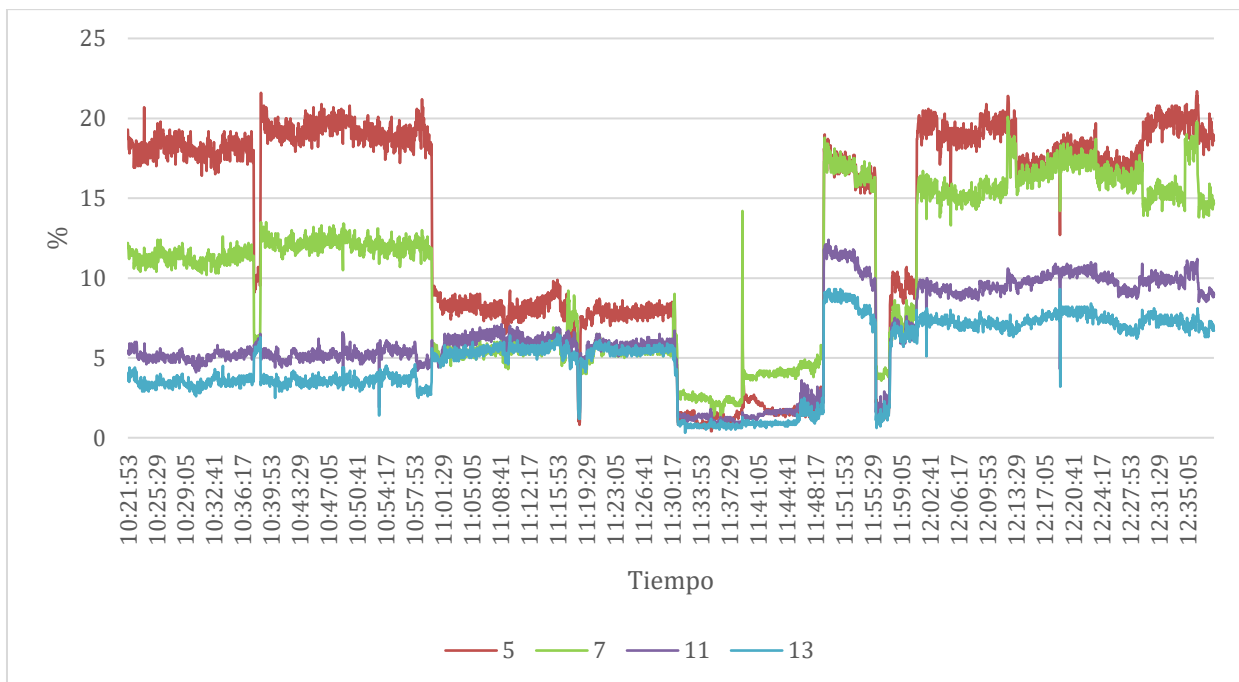


Figura 22. Comparativa de armónicos de corriente de las componentes impares de orden 5, 7, 11 y 13 a lo largo del tiempo.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.4. Voltajes de Línea

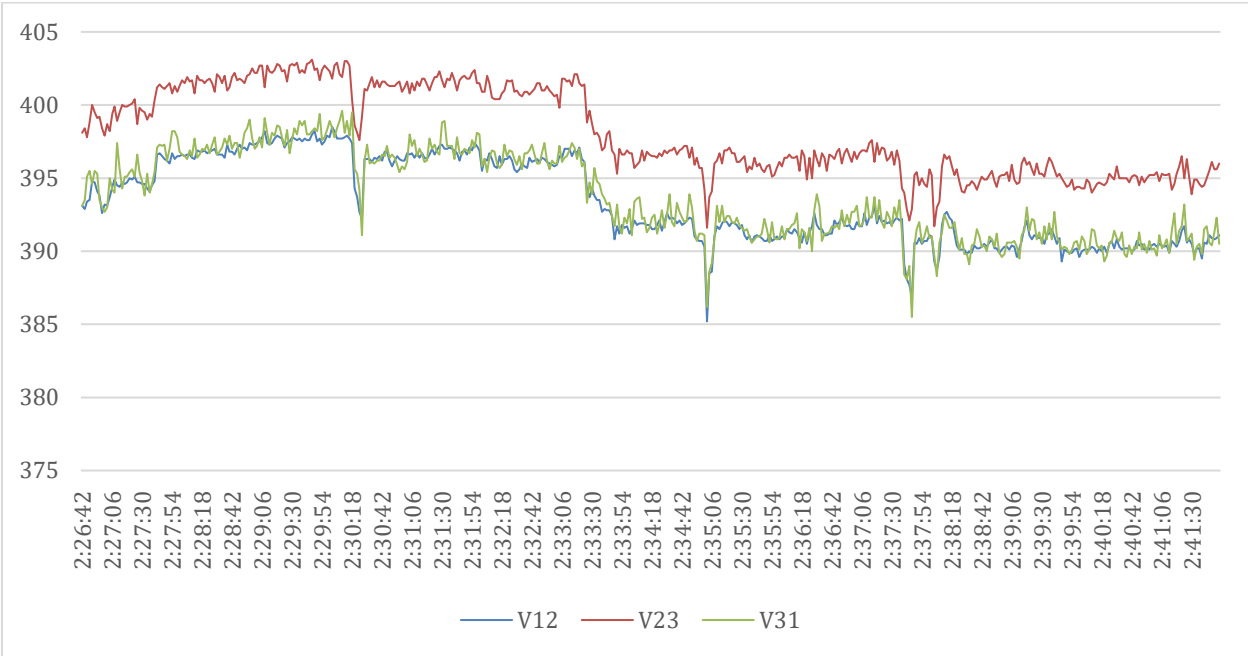


Figura 23. Gráfico de voltajes de línea

La Figura 23, muestra tres series de datos (V_{12} , V_{23} y V_{31}), cada una representando el voltaje entre líneas en un sistema trifásico (según la medición en la línea principal de Filtro y Empaque). Las series están coloreadas de la siguiente manera:

V_{12} en azul.

V_{23} en rojo.

V_{31} en verde.

El gráfico sugiere una tendencia general estable en los valores de voltaje entre líneas, con algunas caídas que afectan principalmente a V_{23} y V_{31} en momentos específicos. Esto podría ser indicativo de algún evento transitorio o variaciones en la carga del sistema en esos puntos.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

Tabla 15. Muestra de medición de voltajes Línea-Línea.

Fecha	Tiempo	V ₁ (V)	V ₂ (V)	V ₃ (V)
10/31/2024	2:26:42	393,1	398,1	393,1
10/31/2024	2:26:44	392,9	398,4	393,5
10/31/2024	2:26:46	393,4	397,8	395,1
10/31/2024	2:26:48	393,5	398,8	395,5
10/31/2024	2:26:50	394,8	400	394,6
10/31/2024	2:26:52	394,7	399,5	395,5
10/31/2024	2:26:54	394,1	399,1	395,3
10/31/2024	2:26:56	393,8	399,2	393,5
10/31/2024	2:26:58	392,6	398,4	393
10/31/2024	2:27:00	393,2	397,9	392,7
10/31/2024	2:27:02	393,1	398,7	393
10/31/2024	2:27:04	393,7	398,2	395
10/31/2024	2:27:06	394,4	399,4	394,2
10/31/2024	2:27:08	394,9	399,9	394
10/31/2024	2:27:10	394,5	398,9	397,4
10/31/2024	2:27:12	394,4	399,5	395,6
10/31/2024	2:27:14	394,7	400	394,3
10/31/2024	2:27:16	394,6	399,9	395,1
10/31/2024	2:27:18	394,7	399,9	395,1
10/31/2024	2:27:20	395	400	395,4
10/31/2024	2:27:22	394,9	400,1	395,6
10/31/2024	2:27:24	395,1	400,4	395,1
10/31/2024	2:27:26	394,7	398,7	396,6
10/31/2024	2:27:28	394,7	399,8	395,4
10/31/2024	2:27:30	394,6	399,6	394,8
10/31/2024	2:27:32	394,6	399,5	393,8
10/31/2024	2:27:34	394,3	399	395,3
10/31/2024	2:27:36	394,1	399,4	394
10/31/2024	2:27:38	394,5	399,2	394,6
10/31/2024	2:27:40	394,8	400,3	395,4
10/31/2024	2:27:42	396,6	401,2	397,1
10/31/2024	2:27:44	396,7	401,4	397,3
10/31/2024	2:27:46	396,5	401,2	397,2
10/31/2024	2:27:48	396,3	401,1	397,3
10/31/2024	2:27:50	396,2	401,3	396,2
10/31/2024	2:27:52	396	401,5	397
10/31/2024	2:27:54	396,7	400,8	398,2
10/31/2024	2:27:56	396,3	401,3	398,2
10/31/2024	2:27:58	396,5	400,9	397,8

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.5. Muestra de medición de corriente I₁

TIME	RMS (A)	THD-F	n=3	n=5	n=7	n=11	n=13
10:21:53	126,9	24,4%	4,7	19,3	12,20	5,3	3,6
10:21:55	128,3	23,7%	4,5	18,7	11,90	5,4	3,7
10:21:57	129,3	23,9%	4,7	18,8	11,80	5,3	3,8
10:21:59	126,0	23,3%	4,3	18,2	11,50	5,5	4,1
10:22:01	130,5	22,7%	4,0	18	11,20	5,2	3,5
10:22:03	125,1	24,0%	4,7	18,8	12,00	5,6	4
10:22:05	122,9	23,1%	4,5	17,8	11,40	5,9	4,4
10:22:07	127,0	23,3%	4,1	18,3	11,60	5,5	3,9
10:22:09	125,8	23,4%	4,5	18,4	11,50	5,5	3,8
10:22:11	129,6	23,3%	4,1	18,2	11,40	5,7	4,1
10:22:13	125,4	23,3%	4,2	18,1	11,70	5,7	4
10:22:15	129,7	23,1%	4,4	18,2	11,40	5,3	3,8
10:22:17	125,8	23,8%	4,3	18,7	11,70	5,6	3,9
10:22:19	122,3	23,7%	5,0	18,4	11,60	5,9	4,2
10:22:21	124,5	23,7%	4,3	18,5	11,80	5,7	4
10:22:23	124,6	23,9%	4,9	18,6	11,80	5,7	4,1
10:22:25	122,8	23,7%	4,8	18,4	11,70	5,8	4,2
10:22:27	128,1	23,4%	4,3	18,3	11,70	5,8	4,1
10:22:29	124,0	23,7%	4,6	18,4	11,80	5,6	4,1
10:22:31	124,0	23,3%	4,5	18,3	11,40	5,5	3,9
10:22:33	122,6	23,5%	4,3	18,4	11,70	5,7	4,2
10:22:35	120,8	23,4%	4,6	18,2	11,50	5,7	4,3
10:22:37	130,3	21,6%	4,2	16,9	10,60	5,4	4
10:22:39	126,3	22,3%	4,6	17,4	11,00	5,4	3,6
10:22:41	126,5	22,3%	4,5	17,5	10,90	5,3	3,6
10:22:43	127,8	22,5%	4,7	17,5	11,00	5,7	4
10:22:45	126,8	22,1%	4,2	16,9	10,90	6	4,4
10:22:47	128,4	22,0%	3,9	17	10,80	5,8	4,1
10:22:49	127,7	22,3%	4,3	17,5	11,00	5,5	3,5
10:22:51	127,5	22,5%	4,3	17,7	11,00	5,5	3,7
10:22:53	126,7	22,4%	4,2	17,4	11,10	5,7	4,2
10:22:55	127,2	23,7%	4,3	18,6	11,80	5,7	4
10:22:57	128,7	23,0%	4,7	17,8	11,20	6	4,1
10:22:59	127,7	23,6%	5,0	18,4	11,70	5,8	3,8
10:23:01	127,3	23,1%	4,3	18,2	11,50	5,3	3,5
10:23:03	127,7	23,0%	4,8	18,2	11,10	5,2	3,5
10:23:05	126,7	22,7%	4,7	18	11,10	5	3,4
10:23:07	129,9	23,1%	4,5	18,1	11,40	5,2	3,5

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.6. Muestra de medición de corriente I₂

TIME	RMS (A)	THD-F	n=3	n=5	n=7	n=11	n=13
11:11:39	103,7	14,9%	5,1	9,8	4,7	4,7	4,9
11:11:41	102,9	14,8%	4,8	9,9	5	4,9	4,8
11:11:43	102,00	15,3%	4,6	10,4	5	5,3	5,1
11:11:45	102,3	14,9%	4,7	10	4,6	5	5
11:11:47	100,8	15,3%	5	10,1	5,1	5,3	5,1
11:11:49	102,9	14,9%	4,7	10,1	4,8	5,1	5
11:11:51	101,7	15,1%	5	9,8	4,9	5,1	5,1
11:11:53	98,91	15,6%	4,7	10,3	5,6	5,4	5,2
11:11:55	100,5	14,6%	4,7	9,7	4,6	4,9	4,9
11:11:57	98,55	15,0%	4,1	10	5,2	5,2	5,2
11:11:59	99,00	14,5%	3,9	9,9	4,6	5,1	4,9
11:12:01	99,66	14,0%	3,9	9,3	4,3	4,9	4,7
11:12:03	101,2	14,5%	3,8	9,7	4,8	5,2	4,9
11:12:05	103,5	14,0%	3,9	9,4	4,5	4,9	4,7
11:12:07	101,8	13,7%	3,7	9,2	4,6	4,8	4,5
11:12:09	104,1	13,2%	3,5	9	4,3	4,8	4,4
11:12:11	103,2	12,7%	3,8	8,6	3,8	4,2	4,1
11:12:13	100,8	13,9%	4	9,4	4,7	5	4,6
11:12:15	105,7	12,4%	3,7	8,4	3,7	4,3	4,1
11:12:17	104,6	13,1%	3,9	8,7	4,1	4,5	4,3
11:12:19	103,2	13,2%	4,1	8,6	4,1	4,7	4,5
11:12:21	102,3	12,9%	4,1	8,8	3,8	4,4	4
11:12:23	101,8	12,8%	4,3	8,5	3,9	4,4	4,1
11:12:25	102,0	13,5%	4,2	8,9	4,2	4,7	4,5
11:12:27	100,0	12,6%	4,2	8,5	3,4	3,9	3,9
11:12:29	98,67	13,4%	4	8,9	4,1	4,7	4,4
11:12:31	98,19	13,4%	4,3	9	3,7	4,5	4,3
11:12:33	98,49	13,6%	4	9	4,1	4,8	4,5
11:12:35	98,61	13,7%	4,2	9,2	4,3	4,5	4,6
11:12:37	97,59	13,0%	3,9	8,8	3,9	4,1	4,4
11:12:39	99,45	13,4%	4	9,2	4,1	4,5	4,5
11:12:41	99,06	14,2%	4,4	9,3	4,7	4,9	4,7
11:12:43	98,19	13,9%	4,6	9,2	4,3	4,5	4,6
11:12:45	98,76	14,4%	4,6	9,6	4,5	4,9	4,7
11:12:47	98,52	14,5%	5	9,6	4,4	4,6	4,7
11:12:49	97,59	15,2%	5,2	10,1	5	5	4,9
11:12:51	99,03	14,7%	5,3	9,5	4,5	4,6	4,8
11:12:53	97,17	14,4%	5,2	9,5	4,5	4,5	4,6

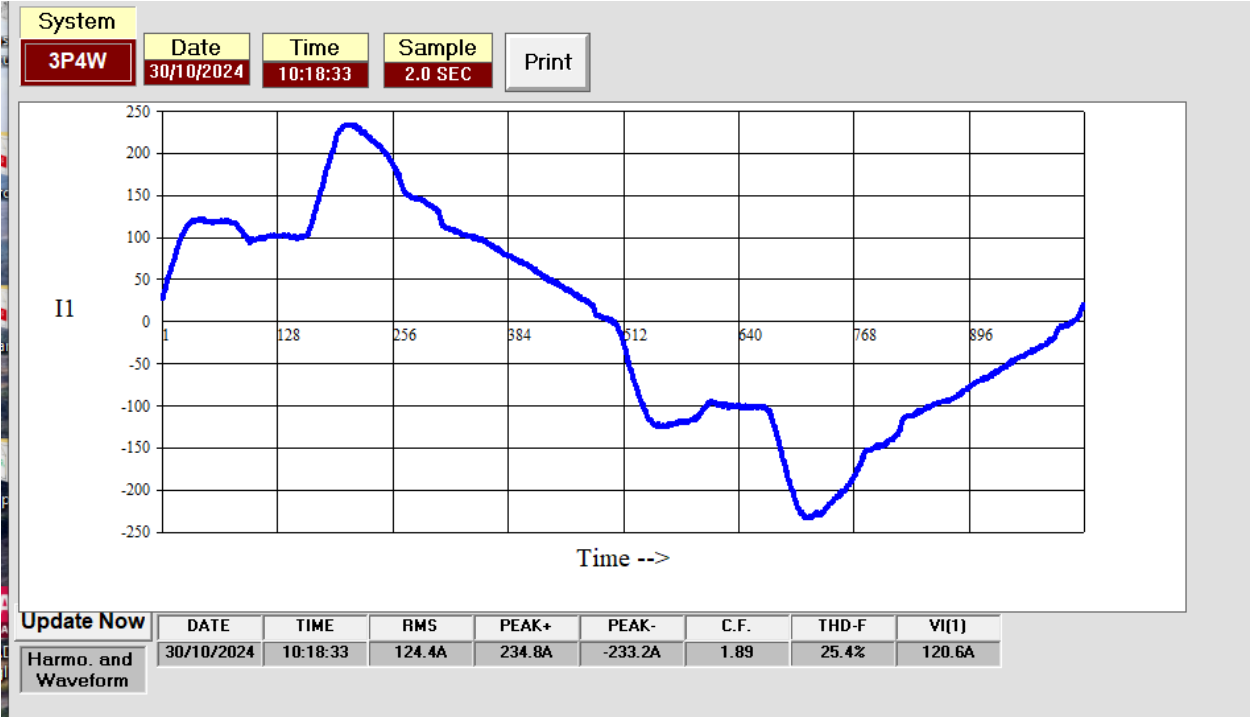
Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.7. Muestra de medición de corriente I₃

TIME	RMS	THD-F	3	5	7	11	13
11:55:22	79,23	3,4%	1	1,4	1,9	1	1
11:55:24	80,07	3,4%	1,1	1,5	2	1,1	1,2
11:55:26	79,59	3,5%	1,1	1,4	2,1	1	1,2
11:55:28	79,26	3,5%	1,2	1,5	2,1	1,2	1,1
11:55:30	79,89	3,2%	1	1,3	1,9	0,9	1,2
11:55:32	79,74	3,8%	1,6	1,5	2,1	1,3	1,2
11:55:34	79,41	3,6%	1,5	1,3	2,1	0,8	1,1
11:55:36	78,87	3,4%	1,6	1	2	0,9	1,2
11:55:38	78,96	3,3%	1	1,3	2	0,9	1
11:55:40	78,42	3,4%	1,1	1,2	2,1	1,1	1,1
11:55:42	80,22	3,4%	1,1	1,3	2,2	0,9	1,2
11:55:44	80,64	3,2%	1	1	2,1	1	0,9
11:55:46	80,16	3,4%	1,2	1,2	2,3	1	1
11:55:48	79,35	3,4%	1,1	1,3	2,3	1	1
11:55:50	79,20	3,4%	0,9	1,1	2,4	1	1,1
11:55:52	78,51	3,5%	1	1	2,4	1,2	1
11:55:54	79,11	3,4%	1,1	1,1	2,2	1	1,1
11:55:56	79,59	3,5%	1,2	1	2,3	0,9	1
11:55:58	78,51	3,4%	1,1	1,1	2,2	1	1
11:56:00	80,28	3,7%	1,1	1,2	2,4	1	1,1
11:56:02	78,21	3,5%	1,1	1,2	2,4	1,1	1
11:56:04	79,08	3,4%	1,1	1,2	2,3	1	1
11:56:06	79,35	3,7%	1,1	1,2	2,6	1,1	1
11:56:08	79,14	3,6%	1,1	1,1	2,5	1,2	1
11:56:10	79,20	3,5%	1,1	1,1	2,4	1	1,1
11:56:12	79,14	3,7%	1,1	0,9	2,6	1,2	1
11:56:14	79,50	3,6%	1	1,1	2,5	1,3	1
11:56:16	79,08	3,6%	1,1	1,1	2,5	1,1	1,1
11:56:18	79,23	3,6%	1,1	0,8	2,6	1,1	0,9
11:56:20	79,35	3,5%	0,9	1	2,4	1	1
11:56:22	79,14	3,7%	0,9	1,3	2,5	1,3	1,1
11:56:24	78,93	3,4%	0,9	1	2,5	1,1	0,9
11:56:26	79,59	3,6%	1	1	2,6	1,2	1,1
11:56:28	78,75	3,8%	1	1,2	2,7	1,2	1,1
11:56:30	78,00	3,6%	0,9	0,9	2,5	1,3	1,1
11:56:32	79,08	3,7%	1,1	1,1	2,6	1,2	1,1
11:56:34	79,68	3,4%	0,9	1	2,5	1,1	0,9
11:56:36	80,76	3,8%	1,1	1,2	2,7	1,2	1,1

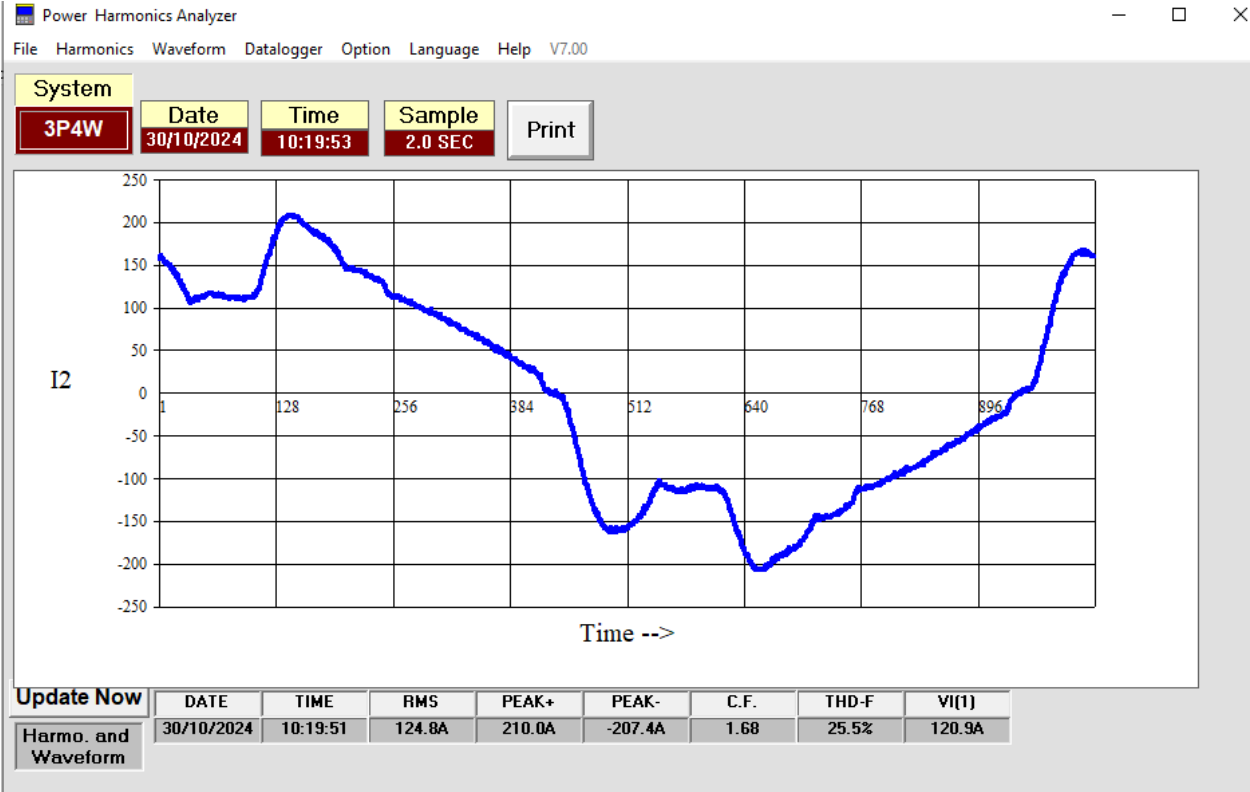
Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.8. Oscilografía de corriente I₁



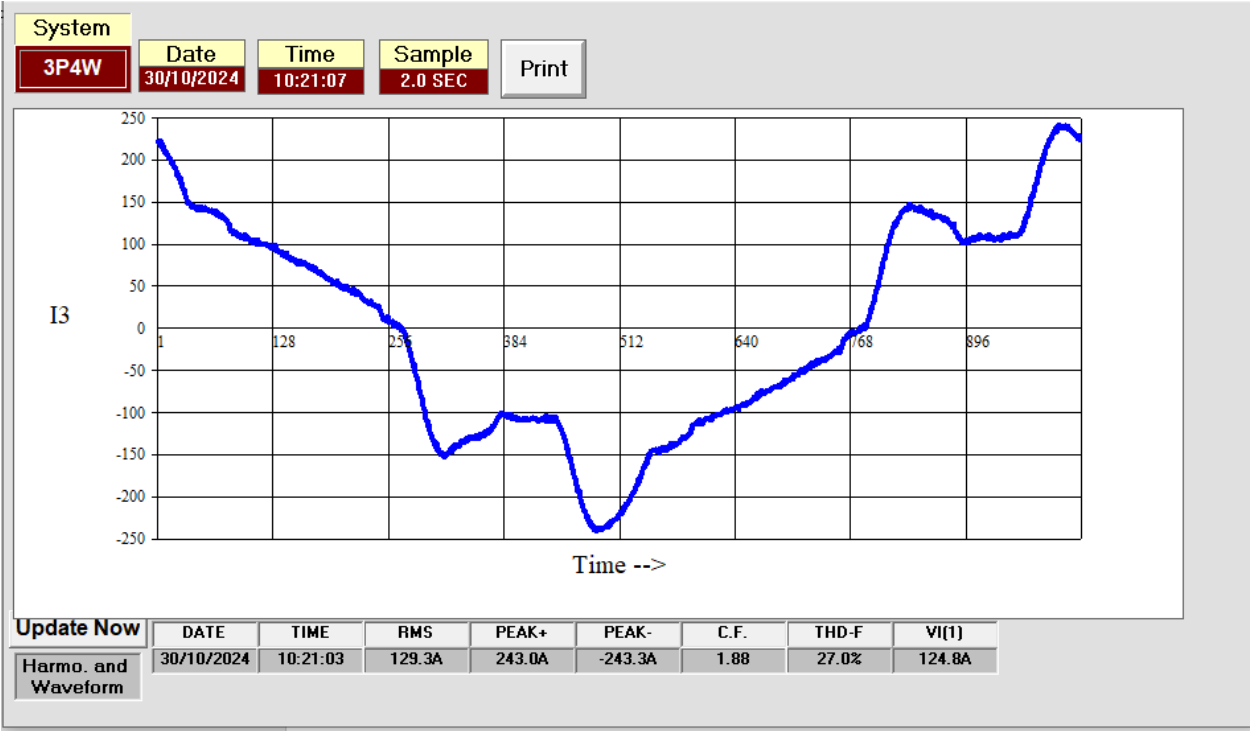
Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.9. Oscilografía de corriente I₂

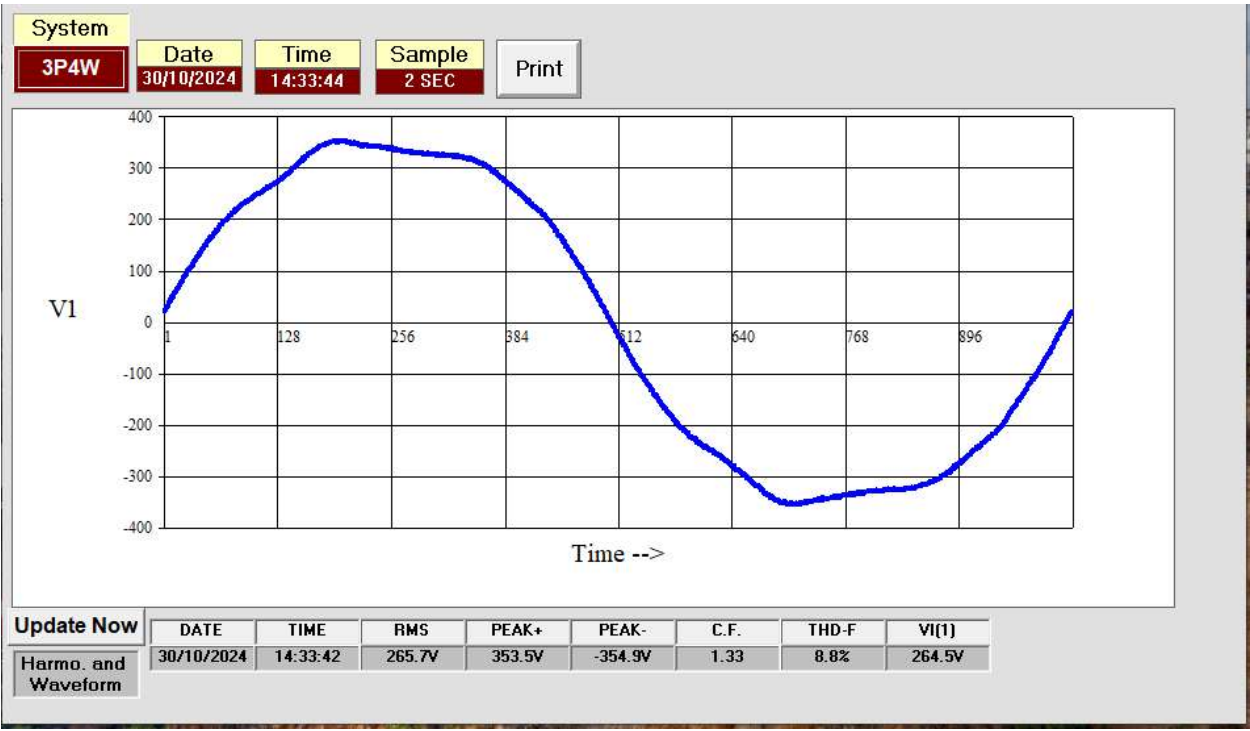


Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.10. Oscilografía de corriente I₃

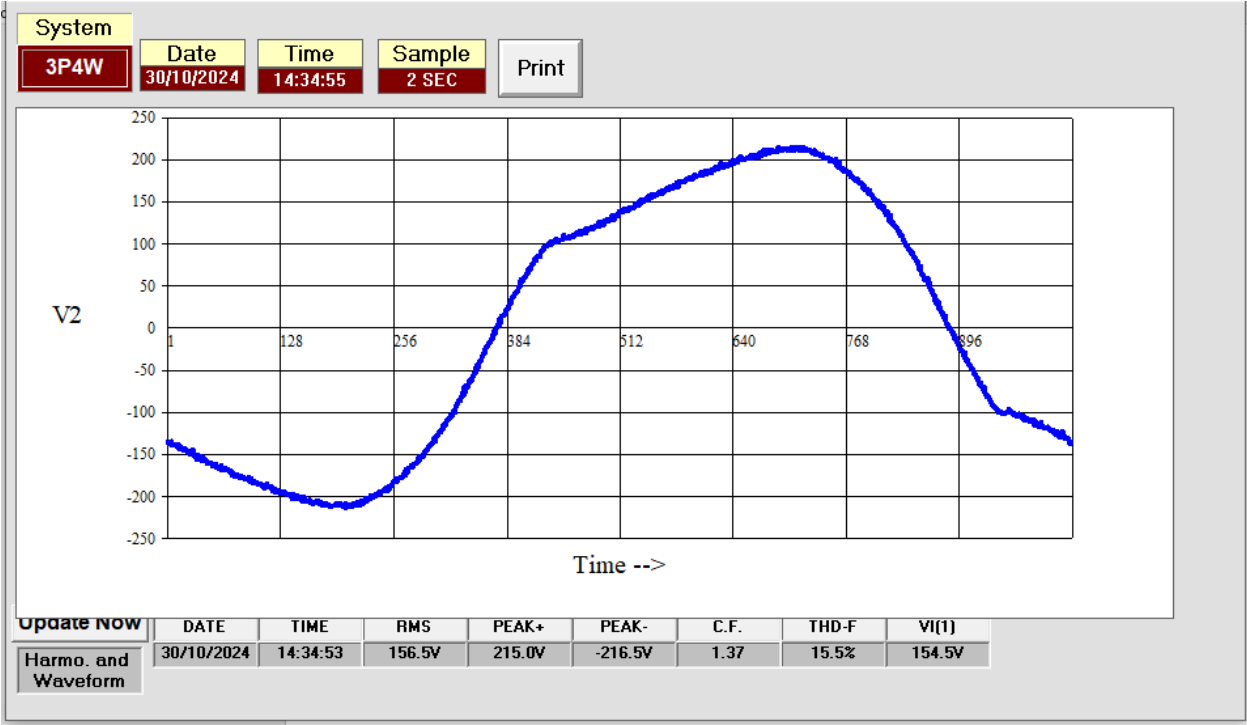


A.3.11. Oscilografía de Voltaje V₁

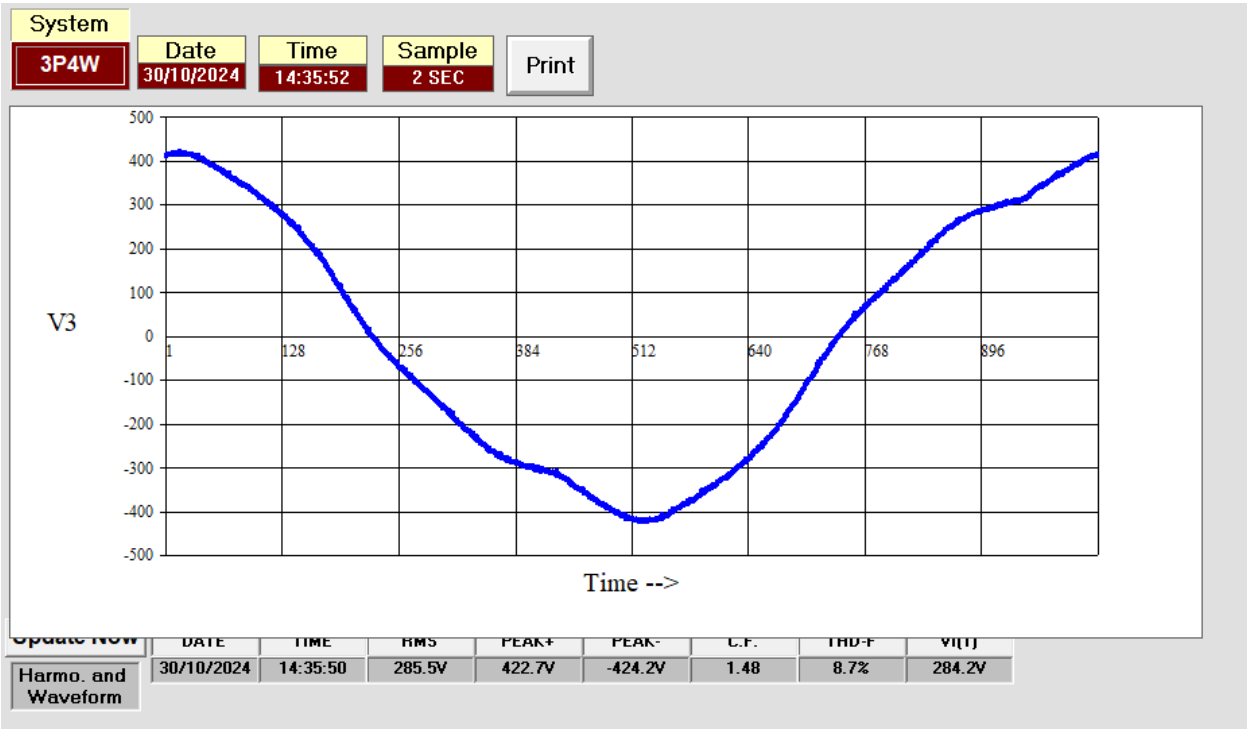


Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024

A.3.12. Oscilografía de Voltaje V₂



A.3.13. Oscilografía de Voltaje V₃



ANEXO 4

A.1. Registro fotográfico de la visita técnica



Figura 24. Imagen del tablero con las sondas de medición instaladas.

Propuesta de mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en cuanto a los niveles de armónicos en la instalación eléctrica de la empresa PARALEVA S.A. en el distrito de Tebicuary departamento de Guairá - ANEXO
MARCELO ELÍAS CAMPOS BENÍTEZ – 2024



Figura 25. Unidades de transformadores de la marca WEG de 1500 kVA que alimentan la empresa PARALEVA.



Figura 26. Interruptor caja moldeada de Filtro y Empaque.