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

Victor Ariel Miltos Caceres

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Coronel Oviedo - Paraguay
Año 2023

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

Elaborado por:

Victor Ariel Miltos Caceres

Tutor:

Ing. Moises Britez

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, como requisito para la obtención del titulo de Ingeniero en Electricidad

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2023

Página de aprobación

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero en Electricidad aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Dedicatoria:

A Dios, a mis padres, a mis hermanos, en especial a mi hermano Abg. Héctor Miltos por haberme ayudado a llegar a la meta, por la paciencia, la confianza que todos tuvieron hacia mí, para verme triunfar como profesional.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias y Tecnologías UNC@, por abrirme las puertas y formarme en el camino de la excelencia. Al Ing. Moisés Britez quien con su experiencia, conocimientos y motivación me oriento en la investigación.

Resumen

Los armónicos eléctricos son ondas no sinusoidales que aparecen en la corriente eléctrica. Estas ondas se producen cuando la corriente fluctúa de manera no lineal, lo que tiene efectos adversos en los equipos eléctricos y en la red eléctrica. Esto puede provocar diferentes problemas en elementos de la red. Este trabajo tiene como objetivo analizar estos niveles en la ciudad de Coronel Oviedo, utilizando como principal herramienta la medición directa de armónicos por medio de equipos, posteriormente se analizaron los datos recabados y se compararon con normas internacionales, encontrándose en todos los casos de corriente, que estos sobrepasan los limites indicados, en una media del 37 %. Por otra parte se evalúan dos alternativas para mitigar el fenómeno, se logró dimensionar a raíz de los datos, filtros activos, se propone finalmente la evaluación de esta alternativa como continuación de esta investigación.

Palabras claves: Armónicos, Tasa de distorsión armónica, Baja tensión, Filtros de armónicos.

Abstract

Electrical harmonics are non-sinusoidal waves that appear in electrical current. These ripples are produced when current fluctuates in a non-linear manner, which has adverse effects on electrical equipment and the power grid. This can cause different problems in network elements. This work aims to analyze these levels in the city of Coronel Oviedo, using as the main tool the direct measurement of harmonics by means of equipment, later the collected data were analyzed and compared with international standards, finding in all cases of current, that these exceed the limits indicated, by an average of 37 %. On the other hand, two alternatives are evaluated to mitigate the phenomenon, it was possible to dimension, based on the data, active filters, the evaluation of this alternative is finally proposed as a continuation of this investigation.

Key words: Harmonics, Harmonic distortion rate, Low voltage, Harmonic filters.

Índice general

1. Introducción **1**

I Revisión Bibliográfica **3**

2. Marco Teórico **5**

2.1. Definición de armónicos 5

2.2. Origen de los armónicos 5

2.3. Clasificación de los armónicos 6

2.4. Fuentes de los Armónicos 7

2.4.1. Basadas en arcos y descargas eléctricas: 7

2.4.2. Basadas en inductancias saturables 8

2.4.3. Electrónicas 8

2.5. Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos. 8

2.6. Efectos provocados por las corrientes armónicas. 10

2.7. Distorsión armónica total 11

2.7.1. Factor k 12

2.7.2. Base matemática 13

2.7.3. Origen del problema: fuentes armónicas 16

II Resumen Ejecutivo 21

3. Resumen Ejecutivo 23

3.1. Descripción del trabajo 23

3.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas 23

3.2. Justificación 24

3.3. Finalidad del proyecto 24

3.4. Metas 25

3.5. Objetivos 25

3.5.1. Objetivos generales 25

3.5.2. Objetivos específicos 25

3.6. Beneficiarios 26

3.7. Producto 26

3.8. Localización física y cobertura espacial 26

3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas 26

3.10. Recursos necesarios 27

3.10.1. Recursos humanos 27

3.10.2. Recursos materiales 27

3.11. Costos 27

III Ingeniería de Diseño **31**

4. Análisis de armónicos **33**

4.1. Mediciones de armónicos 33

4.1.1. Equipo a utilizar 33

4.1.2. Procedimiento de Medición 34

4.1.3. Lista de puntos de medición 35

4.1.4. Límites de distorsión armónica 37

4.2. Medición de Armónicos de Tensión y Corriente, análisis de resultados . . . 38

4.2.1. Primera medición 38

4.2.2. Segunda medición 43

4.2.3. Tercera medición 47

5. Analisis de alternativas para mejorar niveles de armónicos **49**

5.1. Dimensionamiento de los activos de distribución 49

5.2. Adecuaciones en las zonas de medición 52

5.2.1. PD 01 52

5.3. Filtros activos 55

5.3.1. Dimensionamiento filtro en puntos de medición 56

IV **59**

6. Resultados y Discusión **61**

7. Conclusiones **63**

8. Recomendaciones **65**

Apéndice 65

A. Apéndices **67**

A.1. Mediciones 67

A.2. Limites según IEEE 68

A.3. Primera medición 70

A.4. Dimensionamiento de filtros 70

B. Resumen ejecutivo **75**

B.1. Costos 75

Referencias 77

Lista de abreviaturas

ANDE: Administración Nacional de Electricidad.

TC: Transformador de corriente.

TP: Transformador de tensión.

THD: Tasa total de distorsión armónica.

TDD: Tasa de distorsión calculada.

PD: Puesto de distribución.

Glosario de términos

Armónicos: Armónicos de tensión y corriente son variaciones de voltaje y corriente sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema.

Índice de tablas

2.1. Clasificación de armónicos 6

2.2. Clasificación de armónicos en contracción 7

3.1. Resumen de Costos Refuerzos y Adecuaciones 28

3.2. Costo del filtro activo PD 01 28

3.3. Costo del filtro activo PD 02 28

3.4. Costo del filtro activo PD 03 29

4.1. Cantidad de transformadores de distribución de la ANDE, 2022 35

5.1. Dimensionamiento de conductores teniendo en cuenta la tasa del tercer armónico 52

5.2. Resumen de los filtros a utilizar en puntos de medición 57

B.1. Costos adecuación PD 01 76

B.2. Costos adecuación PD 02 76

B.3. Costos adecuación PD 03 76

Índice de figuras

2.1. Función periódica 14

2.2. Circuito básico de un rectificador monofásico 18

2.3. Señal de salida del circuito rectificador 19

4.1. Diseño del tablero para instalar el analizador de redes por poste 34

4.2. Cuadrantes de mayor densidad de carga kW/m^2 36

4.3. THD de tensión medición 1, en torno al valor máximo observado 39

4.4. Armónicos individuales observados en medición 1 39

4.5. TDD calculado y registros de corriente en las tres fases 40

4.6. Porcentaje por orden de armónico y registro realizado 42

4.7. THD tensión por fase 44

4.8. THD corriente por fase, medición 2 44

4.9. TDD calculado para cada registro 45

4.10. Armónicos de corriente por orden y registros, medición 2 46

4.11. TDD calculado, medición 3 47

5.1. PD 01, medición 1, adecuaciones 53

5.2. PD 02, medición 2, adecuaciones 54

5.3. PD 03, medición 3, adecuaciones 55

5.4. Conexionado del filtro activo 56

A.1. Ubicación de transformadores en el centro de Coronel Oviedo 67

A.3. Parámetros del equipo de medición en puesto 1 68

A.2. Inicio del software KEW 68

A.4. Límites de armónicos respecto a tensión y corriente 69

A.7. Segunda medición de armónicos 70

A.5. Medición 1 de armónicos 70

A.6. Armónicos de corriente THD, medición 1 70

Capítulo 1

Introducción

Los armónicos de corriente son ondas no sinusoidales que aparecen en la corriente eléctrica cuando se aplica una señal de voltaje. Estas ondas se producen cuando la corriente fluctúa de manera no lineal, lo que puede tener efectos adversos en los equipos eléctricos y en la red eléctrica. Esto puede provocar un aumento del consumo de energía, un aumento en el calentamiento de los equipos eléctricos, una reducción en la durabilidad de los equipos eléctricos y otros problemas. Por lo tanto, es importante comprender los armónicos de corriente y abordar la forma de reducir su impacto en la red eléctrica. En Paraguay la ANDE atiende a sus clientes con servicio de energía eléctrica, los armónicos juegan un papel importante en la calidad de este.

Por esa razón este trabajo tiene como objetivo analizar los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de la ANDE en la ciudad de Coronel Oviedo, proponiendo finalmente algunas formas de mitigación de este fenómeno. Para ello, se realizaron mediciones directas de la red eléctrica de baja tensión, utilizando equipos especializados de la empresa. Estos datos recabados se analizaron minuciosamente bajo la lupa de normas internacionales.

En el capítulo 2, se desarrollan las principales definiciones bibliográficas, como también se caracterizan las fuentes de este fenómeno, y los efectos que provocan. Además se desarrolla la matemática de fondo.

En el capítulo 3, se elabora el esquema de investigación abordado en el trabajo, el cual consiste en recabar directamente los datos y su procesamiento con herramientas informáticas avanzadas, finalmente en este capítulo se evalúan los costos de las alternativas mencionadas a fin de mermar los armónicos.

En el capítulo 4, se lleva a cabo el análisis de datos, el cual se representa en diferentes formas, ademas se evalúan los diferentes elementos probabilísticos que surgen a raíz de la cantidad de datos obtenidos.

En el capítulo 5, se estudian las alternativas para mejorar los niveles de armónicos en la red eléctrica de baja tensión de la ciudad, al menos en los puntos donde se realizaron estas mediciones.

Parte I

Revisión Bibliográfica

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Definición de armónicos

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos. Los armónicos son un fenómeno que causa problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. La forma de onda distorsionada puede ser descompuesta en una suma de la señal de frecuencia fundamental y sus múltiplos. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia.

2.2. Origen de los armónicos

En un sistema eléctrico, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa, así como por los clientes están diseñados para operar 60 Hertz, con una tensión

y una corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias diferentes de 50 o 60 Hertz, conocidos como armónicos, que son normalmente definidos como las distorsiones periódicas de la forma de onda de tensión y/o corrientes de un estado estable en los sistemas eléctricos.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de tensiones no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Estos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de tensión de formadas que obliga en los nodos del sistema, no lleguen tensiones puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico, más distorsionadas serán las tensiones en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa. En general, los armónicos son producidos por cargas no-lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la frecuencia). Estas cargas no-lineales a pesar de ser alimentadas con una señal sinusoidal, devuelven una señal no sinusoidal a través del neutro, y se puede considerar como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red. En la mayoría de los casos los armónicos son un disturbio en estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios.

2.3. Clasificación de los armónicos

Cada armónico está asociado con cada nombre, frecuencia y secuencia, de la siguiente forma:

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

Tabla 2.1: Clasificación de armónicos

Normalmente, las ondas que circulan por la red tienen las mismas componentes positivas que negativas (en forma simétrica), con lo cual no suelen aparecer armónicos de orden par. Así, lo habitual es encontrarse con:

Nombre	**Fundamental**	**3°**	**5°**	**7°**	**9°**	**11°**	**13°**
Frecuencia 60	60	180	300	420	540	660	780
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+

Tabla 2.2: Clasificación de armónicos en contracción

La secuencia se refiere al sentido de giro de los fasores con respecto a la fundamental, expresado en otras palabras indica el sentido en que giraría el rotor de un motor, al ser excitado por esa señal. Secuencia directa (+) indica que el sentido de giro es el horario. Secuencia inversa (-) indica un sentido de giro antihorario. Secuencia cero (0) indica que no gira.

Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

- Secuencia (+): Rotación Directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- Secuencia (-): Rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y pueden quemar los motores de inducción trifásicos.
- Secuencia (0): Los armónicos de secuencia cero (llamados normalmente triplens) se suman al neutro de la red (si ésta es de cuatro hilos) y son los causantes de sobrecalentamientos.

2.4. Fuentes de los Armónicos

Las cargas no lineales pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías; a continuación, se presenta una lista con las más importantes.

2.4.1. Basadas en arcos y descargas eléctricas:

- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.)

- Soldadores de arco.
- Hornos de arco eléctrico.

2.4.2. Basadas en inductancias saturables

- Transformadores,
- Motores.
- Reactancias para limitar los arcos de descarga.

2.4.3. Electrónicas

- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas.
- Fuentes de alimentación (aparatos electrónicos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.)
- Reguladores y recortadores (variación de velocidad de pequeños motores, ahorradores de energía para motores, reguladores de luz, compensadores estáticos de energía reactiva (SVC, TCR), reguladores para dispositivos de caldeo, etc.)
- Cargadores de baterías
- Convertidor continuo-alterno sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, transmisión de energía en corriente continua, etc.)

2.5. Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.

En los sistemas eléctricos, los Armónicos son a menudo usados para definir distorsiones de la onda senoidal, asociados con las amplitudes de corrientes y tensiones a frecuencias

diferentes de la onda fundamental, que tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución. Entre estos efectos, se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipo, así como la degradación de su eficiencia y mal funcionamiento de los elementos (conductores, alimentadores, transformadores, subestaciones y las cargas.) de un sistema eléctrico en general. Otras características del efecto armónico con otros dispositivos del sistema eléctrico. Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tiempo de la carga instalada como son los efectos instantáneos y a largo plazo. A continuación, describimos algunos de los principales problemas que pueden ocasionar los armónicos, en relación con el funcionamiento de los equipos eléctricos principales presentes en el sistema de distribución: Transformadores: Aumento del nivel de pérdidas eléctricas, cobre y hierro; riesgo de saturación en la presencia de armónicos pares; reducción de la vida debido al sobrecalentamiento y / o desgarro del aislamiento. Maquinas Asíncronas: Aumento del nivel de calentamiento, en particular en los dobles de jaulas. Conductor Neutro: Calentamiento por encima de lo normal debido a la presencia de armónicos de secuencia cero. Los equipos electrónicos generan importantes niveles de armónicos tercero, quinto y séptimo orden, aparecen junto con los armónicos Triplens. Teniendo en cuenta un sistema trifásico equilibrado, los Triplens son de secuencia cero y por lo tanto se suman en el conductor neutro. Controles electrónicos: La distorsión en tensión puede también afectar de manera diversa a los controles electrónicos para conversión de potencia, controles de velocidad y fuentes de potencia. Muchos de estos equipos dependen de una señal exacta que cruce por el cero para generar la sincronización para el disparo de los tiristores. Cuando la onda de tensión está significativamente distorsionada, éstas señales de sincronía son inexactas y causan funcionamiento no predecible. Condensadores de potencia: Aumento del nivel de calentamiento; petición de aislamiento; y la pérdida de la vida. Cables y Conductores Eléctricos: Aumento del nivel de pérdidas óhmicas y dieléctricas, lo que lleva a la vida reducida. Interferencia en las comunicaciones: Las armónicas, por ser ondas a una mayor frecuencia, son más fácilmente irradiadas y pueden interferir con ciertos sistemas de comunicación o con señales electrónicas. Efectos sobre otros usuarios. Aunque los efectos causados por armónicas en alguna instalación eléctrica puedan ser despreciables, son capaces de provocar problemas a otros usuarios conectados a la misma red. Es por eso que las compañías suministradoras han establecido o están

estableciendo límites máximos a los niveles de armónicas que un usuario puede inyectar a la red. Internacionalmente existe una gran cantidad de estándares para limitar los efectos de las armónicas, tanto para el funcionamiento de la red eléctrica como para la seguridad de los usuarios y sus instalaciones.

2.6. Efectos provocados por las corrientes armónicas.

Los efectos nocivos producidos por el flujo de armónicos son cada día más significativos en los sistemas eléctricos, dependiendo de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y se resumen en [8].

Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control.

Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición.

Interferencias en sistemas de comunicación y telemando.

Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc.) y el cableado de potencia con la disminución consecuente de la vida útil de los mismos, e incremento considerable de pérdidas de energía.

Fallo de capacitores de potencia. Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar accidentes eléctricos, fallas destructivas de equipos de potencia o mal funcionamiento.

En resumen, los efectos de las corrientes armónicas en un sistema eléctrico pueden ser variados. Algunos de los efectos más comunes incluyen: incremento en las pérdidas de potencia, aumento en las temperaturas de los equipos y la calidad de suministro eléctrico, incremento en los niveles de ruido, reducción de la capacidad operativa de los equipos, problemas en el sistema de control, interferencia en equipos electrónicos, etc. Además, los armónicos de corriente pueden ser la causa de fallas en el sistema eléctrico, provocando daños en los equipos y en los cables. Por ello, es necesario controlar la cantidad de

armónicos para prevenir estos problemas.

2.7. Distorsión armónica total

La Distorsión Armónica Total (THD) es una medida de cuánto se distorsiona o se cambia la forma de onda del voltaje o de la corriente de un sistema eléctrico. Está determinada por la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental [5]. Esta relación se mide para los primeros cinco armónicos, aunque algunos equipos de medición modernos pueden medir hasta los 14 primeros armónicos. La Distorsión Armónica Total (THD) se puede medir tanto en tensiones como en corrientes. Un nivel alto de THD puede provocar una disminución de la capacidad operativa de los equipos, aumentos en las pérdidas de potencia, aumento en las temperaturas de los equipos, problemas en el sistema de control, interferencia en equipos electrónicos, etc. Por ello, es importante medir el nivel de THD para prevenir estos problemas.

THD corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global). La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa. Para una señal y(t), la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación [6]:

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} {y_h}^2}{y_1} \cdot 100\,\% \tag{2.1}$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + ...}}{V_1} \cdot 100\,\% \tag{2.2}$$

Cuando hablamos de armónicos de intensidad de corriente eléctrica, la expresión se convierte en:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + ...}}{I_1} \cdot 100\,\% \tag{2.3}$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \cdot 100\,\% \tag{2.4}$$

Para armónicos individuales:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \cdot 100\,\% \tag{2.5}$$

Distorsión total de demanda

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga [6].

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + ...}}{I_{DemMax}} \cdot 100\,\% \tag{2.6}$$

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519-1992.

2.7.1. Factor k

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador presenta sobrecalentamiento aun cuando no ha alcanzado sus KVA nominales. Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el factor K el cual es aplicado a transformadores [6]. Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores,

indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$\text{Factor K} = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2 \cdot 100\,\% \tag{2.7}$$

Donde la corriente de esta expresión es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador.

Los factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.

2.7.2. Base matemática

Análisis matemático (Fourier)

En la teoría de sistemas lineales es fundamental la representación de una señal en términos de sinusoides o exponenciales complejas. Ello es debido a que una exponencial compleja es una auto función de cualquier sistema lineal e invariante con el tiempo, mientras que la respuesta a una sinusoide es otra sinusoide de la misma frecuencia, con fase y amplitud determinadas por el sistema. De este modo, la representación en frecuencia de la señal, a través de la Transformada de Fourier, resulta imprescindible para analizar las señales y los sistemas eléctricos.

Al igual que ocurre en el caso continuo, el concepto del dominio de la frecuencia es fundamental para entender las señales discretas y el comportamiento de los sistemas eléctricos. El espectro de una señal nos enseña cómo es esa señal en el dominio frecuencial, la respuesta en frecuencia de un sistema nos aporta el conocimiento de cómo se comporta ese sistema para diferentes entradas, gracias a la perspectiva que aporta el dominio de la frecuencia.

La theorie analytique de Jean Baptiste-josep Fourier introdujo los métodos sencillos para el tratamiento analítico de la conducción del calor, no siendo esta su única aplicación

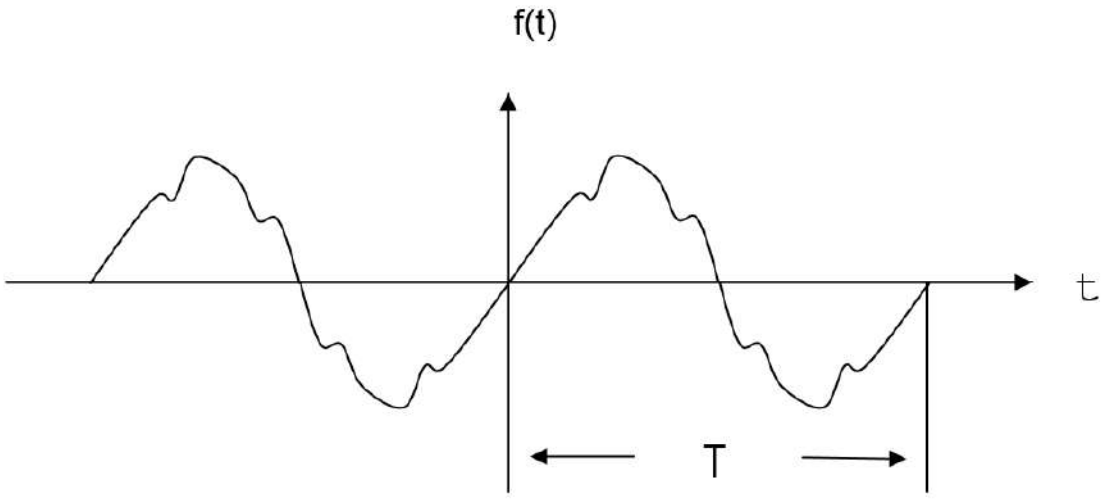


Figura 2.1: Función periódica

el análisis de Fourier, se ha extendido a muchas otras aplicaciones físicas, en efecto este análisis se ha convertido en un instrumento indispensable en el tratamiento de física moderna, teoría de comunicaciones, sistemas lineales, etc [3].

El único requisito formal para comprender el análisis de Fourier, es el conocimiento de cálculo avanzado y las matemáticas aplicadas.

Series de Fourier

El estudio de las series de Fourier es aplicable a las señales eléctricas siempre y cuando estas sean funciones periódicas. Una función periódica se puede definir como:

$$f(t) = f(t+T) \tag{2.8}$$

Donde T se llama el periodo de la función la figura muestra un ejemplo de función periódica.

La figura 2.1, muestra una función periódica $f(t)$ corresponde a una señal eléctrica sinusoidal con sus correspondientes armónicos.

$$f(t) = \frac{1}{2}a0 + a1\cos(\omega_0 t) + a2\cos(2\omega_0 t) + ... + b1\sin(\omega_0 t) + b2\sin(2\omega_0 t) \tag{2.9}$$

Que se puede resumir como:

$$f(t) = \frac{1}{2}a0 + \sum_{n=1}^{\infty}(an\cos(n\omega_0 t) + bn\sin(n\omega_0 t)) \tag{2.10}$$

La componente DC (corriente directa) de la señal ($a0$) más la sumatoria de las componentes trigonométricas de la señal y sus armónicos, desde $n = 1$ el armónico fundamental, hasta infinito.

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \tag{2.11}$$

Donde, ω_0 es la frecuencia angular expresada en rad/seg.

La serie trigonométrica de Fourier también puede ser representada.

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{infty} C_n * \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \tag{2.12}$$

donde C_0 es la componente DC de la señal, C_n es la magnitud armónica dada por:

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{2.13}$$

Y el ángulo θ_n es igual a:

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n}) \tag{2.14}$$

Según la representación en series de Fourier de una función periódica, las sumas de componentes sinusoidales tienen diferentes frecuencias.

La componente sinusoidal de frecuencia $\omega_n = n\omega_0$ se denomina la enésima armónica de la señal, la primera armónica comúnmente se conoce como la componente fundamental porque tiene el mismo periodo de la función y $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi/T$ se conoce como la frecuencia angular fundamental, los coeficientes C_n y los ángulos θ_n se conocen como amplitudes armónicas y ángulos de fase respectivamente.

Los coeficientes a_o, a_n y b_n se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$a_o = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)dt \tag{2.15}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\cos(n\omega_0 t)dt \tag{2.16}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\sin(n\omega_0 t)dt \tag{2.17}$$

Podemos concluir que la serie trigonométrica de Fourier es la superposición de señales, sobre la señal sinusoidal pura y estas señales tienen la particularidad de poseer una frecuencia, la cual es un múltiplo entero de la fundamental, para la mayoría de los casos calculables de la transformada de Fourier el coeficiente ao es igual a 0.

2.7.3. Origen del problema: fuentes armónicas

La proliferación de los dispositivos de electrónica de potencia ha influido notablemente en el aumento del nivel de armónicos en las redes eléctricas. Este aumento de la contaminación eléctrica o distorsión de las formas de onda de tensión y corriente debido a los armónicos de frecuencias distintas a la fundamental, se debe al desarrollo y perfeccionamiento de los semiconductores de potencia que ha motivado la utilización de aparatos como conversores estáticos, dada su eficiencia y fiabilidad en el control de la energía eléctrica. Así como

también hornos de arco, debido a sus características especiales para fundir metales y otros dispositivos de electrónica de potencia que tienen un comportamiento no lineal.

Los niveles de perturbación armónica de estas fuentes se pueden clasificar en dos categorías, la primera en un rango de frecuencias armónicas menores que la fundamental (60 [Hz]) y que sólo será nombrada, la segunda corresponde a las frecuencias mayores que 60 [Hz]).

Señales de frecuencias menores a 60 [Hz]

Si algún equipo produce este tipo de señal, llamados también subarmónicos, éstas podrían ocasionar parpadeos luminosos perceptibles que son molestos para el ojo humano (por Ej. Flicker, rango 0.1 a 25 [Hz]).

Señales de frecuencias mayores a 60 [Hz] (Armónicos)

El origen de las señales perturbadoras en los sistemas de distribución industrial que producen un aumento en la distorsión de voltaje y corriente del sistema se debe a los siguientes factores:

El aumento en la utilización de equipos de electrónica de potencia, los cuales tienen características de voltaje y corriente no lineales, comportándose como verdaderas fuentes que inyectan corrientes armónicas al sistema. Entre estos aparatos se encuentran los rectificadores, inversores, convertidores de frecuencias, compensadores estáticos de reactivos y cicloconversores.

El incremento en la aplicación de los bancos de condensadores, ya sea para corregir factor de potencia o regulación de voltaje, los cuales pueden estar ubicados próximos a fuentes generadoras de armónicos propiciando la condición de resonancia, la cual puede amplificar el nivel de armónicos existente [3].

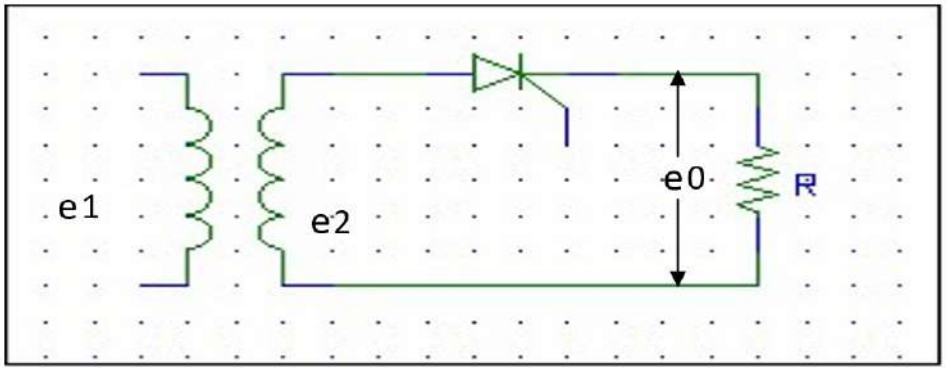


Figura 2.2: Circuito básico de un rectificador monofásico

Conversores Estáticos de Potencia

Se entenderá como conversores estáticos de potencia a los aparatos basados en dispositivos electrónicos de estado sólido (diodos y tiristores) que pueden ser equipos rectificadores, convertidores de frecuencia, inversores, ciclo conversores y compensadores estáticos de potencia reactiva.

Rectificadores trifásicos controlados

El principio de funcionamiento de los rectificadores controlados es en esencia el mismo de los circuitos rectificadores normales con diodos y por lo tanto las configuraciones del circuito son las mismas, la diferencia fundamental consiste en que la puesta en conducción de los SCR'S puede ser retardada a voluntad con respecto al punto de encendido natural. Es decir, con respecto al momento en que se iniciara la conducción de los diodos equivalentes. Obviamente el intervalo de conducción de un SCR dependerá en el caso de los diodos de que se mantengan las condiciones de polarización en sentido directo.

La figura 2.2 muestra los componentes del rectificador monofásico controlado, en donde (e1) es la tensión primaria en el transformador de alimentación del circuito, (e2) es la tensión de salida del transformador y (e0) es la tensión de salida controlada por el SCR.

La señal de salida de este circuito rectificador, es de media onda controlando el ángulo de disparo del SCR, por medio de la inyección de una pequeña corriente en la compuerta, se logra recortar el ciclo positivo de la señal.

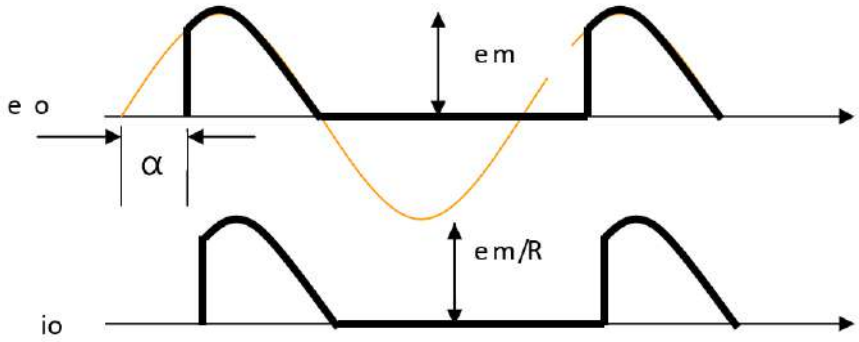


Figura 2.3: Señal de salida del circuito rectificador

Las señales de tensión y de corriente del rectificador están definidas por (α) el ángulo de disparo del SCR que oscila entre 0^o y 180^o , (em) es la tensión en la carga e (io) es la corriente en la carga, en este caso em/R, cuando se alimenta un circuito resistivo.

Los conversores de potencia están presentes en la industria en muchas formas y aplicaciones. En potencias elevadas estos conversores exhiben elevados índices de disponibilidad, confiabilidad y rendimiento a costos razonables. Su campo de aplicación cubre desde rectificación de altas corrientes (electrorefinación), hasta accionamiento de grandes máquinas en continua o alterna (cicloconversores).

Todos estos equipos tienen una característica común que es requerir o absorber corriente del sistema que es no sinusoidal. Por lo tanto, todos ellos son gobernados por las mismas de leyes básicas que permiten un análisis su comportamiento. Durante el funcionamiento normal de estos equipos, aparecen armónicos de tensión y/o corrientes en las redes. Para el caso de los rectificadores, por ejemplo, se generan armónicos tanto en el lado de continua como en el alterno, donde las del lado continuo son del orden:

$$h = k * p \tag{2.18}$$

y las del lado alterno son del orden:

$$h = k * p \pm 1 \tag{2.19}$$

siendo:

h : orden del armónico

p : número de pulsos del rectificador

k : un número entero positivo 1,2,3 ...

Luego, se tienen que por cada armónico en el lado continuo existen dos en el lado alterno, siendo los del lado alterno los más perjudiciales para el sistema.

Para un análisis más detallado se analizarán los siguientes casos:

- Rectificador de 6 pulsos
- Rectificador de 12 pulsos
- Convertidores de frecuencia
- Contaminantes de potencia pequeña

Parte II

Resumen Ejecutivo

Capítulo 3

Resumen Ejecutivo

3.1. Descripción del trabajo

En la presente investigación se realiza un análisis de datos registrados de la red de distribución ANDE. De estos registros se evalúan las condiciones actuales respecto a armónicos de corriente y tensión eléctrica, escogiéndose lugares específicos donde se realizan dichas mediciones, posteriormente se proponen procesos para la disminución de este fenómeno en la red.

3.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas

Este trabajo de investigación es de carácter tipo descriptivo porque busca determinar de los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de la ciudad de Coronel Oviedo. De enfoque cuali-cuantitativa porque se trata de determinar los niveles de armónicos en la ciudad y exponer sus características. De diseño no experimental porque no se manipulan deliberadamente variables del fenómeno en estudio.

Se utilizó la técnica de mediciones directas en distintos puntos de la ciudad de Coronel Oviedo y realizando de esta manera un registro de mediciones de distintos fenómenos asociados a perturbaciones armónicas. Y se realizaron análisis estadísticos mediante la

utilización de software informáticos para evaluar los datos obtenidos, para la recolección de datos se utilizó un analizador de armónicos Kyoritsu 6310.

3.2. Justificación

En un sistema eléctrico de distribución ideal, la energía eléctrica debe ser suministrada a una frecuencia y tensión constante libres de perturbaciones. Sin embargo, ninguna de estas condiciones se cumple en la práctica, es más se incrementan las perturbaciones tales como los armónicos.

En los últimos años en la Ciudad de Coronel Oviedo se ha reflejado en el crecimiento sustancial de los dispositivos electrónicos, destinados a equipar las instalaciones, ha dado lugar a un cambio significativo de los tipos de cargas conectadas al sistema de distribución eléctrico. Estas cargas de tipo no lineales, representa un perjuicio para los clientes conectados a la misma red que requieren una energía puramente sinusoidal y de buena calidad para la utilización de los equipos electrónicos entre otros.

Con la implementación de este proyecto de fin de grado se podrá contar con un análisis de la situación actual en cuantos los niveles armónicos existentes en la Ciudad de Coronel Oviedo. De esta forma, los principales beneficiarios con este proyecto serán la empresa prestadora de servicio eléctrico (ANDE) y los clientes que son los principales afectados en el caso de grandes perturbaciones en la red eléctrica.

3.3. Finalidad del proyecto

Con el desarrollo de este Proyecto se busca conocer los valores asociados de armónicos a la red de distribución en baja tensión de la ANDE en Coronel Oviedo.

La finalidad principal de conocer los armónicos de tensión y corriente es entender cómo estas variaciones en los niveles de voltaje y corriente afectan la calidad de la energía eléctrica y pueden ocasionar riesgos para los equipos eléctricos y electrónicos. Por esa

razón, se plantean procesos para la disminución de este fenómeno.

3.4. Metas

Analizar al menos tres zonas de puestos de distribución.

3.5. Objetivos

3.5.1. Objetivos generales

Analizar los niveles de armónicos en la red de distribución de baja tensión de la Ciudad de Coronel Oviedo y proponer medidas de mitigación de los mismos

3.5.2. Objetivos específicos

- Elaborar la muestra de puntos de consumo en baja tensión en tres puntos específicos de la Ciudad de Coronel Oviedo con el nivel de confianza esperado.
- Realizar revisión normativa para adoptar la que mejor se adecua al alcance del trabajo
- Realizar la medición de variables eléctricas en cada punto seleccionado
- Reconocer y clasificar los fenómenos de la distorsión armónica presentes en el sistema eléctrico de baja tensión en la Ciudad de Coronel Oviedo.
- Analizar posibles soluciones para atenuar el impacto de la distorsión armónica existente en el sistema de distribución en baja tensión de la Ciudad de Coronel Oviedo.

3.6. Beneficiarios

El beneficiario principal de esta investigación es la empresa ANDE. Indirectamente los usuarios, pues se proponen mejoras para la calidad de la energía suministrada.

3.7. Producto

Conocimiento sobre la incidencia de armónicos de tensión y corriente en la red de baja tensión de la ANDE.

3.8. Localización física y cobertura espacial

Este proyecto se lleva a cabo en la ciudad de Coronel Oviedo, departamento de Caaguazú. Específicamente en los barrios Centro, Cruce y San Isidro.

3.9. Especificaciones de actividades y tareas realizadas

En este Proyecto Final de Grado se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Relevamiento de datos, mediciones con el equipoaAnalizador de armónicos Kyoritsu 6310.
- Revisión de normas técnicas y elección de las normas a ser adoptadas.
- Análisis de los datos obtenidos, y sus representaciones probabilísticas.
- Análisis de posibles soluciones para atenuar el impacto de la distorsión armónica.
- Realización de estrategia para la mitigación de los mismos.

3.10. Recursos necesarios

3.10.1. Recursos humanos

Se utilizaron los siguientes recursos humanos:

- Universitario proyectista.
- Tutores.
- Personal de la empresa ANDE.

3.10.2. Recursos materiales

Para la ejecución del presente proyecto final de grado fueron necesarios los siguientes materiales:

- Biblioteca virtual.
- Normas y especificaciones técnicas.
- Computadora.
- Analizador de armónicos Kyoritsu 6310.
- Escalera.
- Cinturón de seguridad.
- Guante aislado.

3.11. Costos

En la tabla 3.1 se aprecian los costos de la primera alternativa este ronda, ciento sesenta y ocho millones ciento veinte mil cuatrocientos noventa y siete guaraníes. Los cálculos

Descripción	Costo (G)
PD01	54.903.350
PD02	38.966.910
PD03	73.400.237
Total (G)	168.120.497

Tabla 3.1: Resumen de Costos Refuerzos y Adecuaciones

descriptivos se aprecian en la sección B.1.

Descripción	Costo (G)
Filtro Activo de 20 A	10.412.500
Tablero, soportes, TC's	6.768.125
HHP - Instalación (G)	1.980.000
Total	**19.160.625**

Tabla 3.2: Costo del filtro activo PD 01

En cuanto a la alternativa de filtros activos el PD01, requiere de un filtro activo de 20 A, el costo del mismo y su instalación se especifican en la tabla 3.2.

Descripción	Costo (G)
Filtro Activo de 20 A	10.412.500
Tablero, soportes, TC's	6.768.125
HHP - Instalación (G)	1.980.000
Total	**19.160.625**

Tabla 3.3: Costo del filtro activo PD 02

Descripción	Costo (G)
Filtro Activo de 30A	12.250.000
Tablero, soportes, TC's	7.962.500
HHP - Instalación (G)	1.980.000
Total	**22.192.500**

Tabla 3.4: Costo del filtro activo PD 03

Parte III

Ingeniería de Diseño

Capítulo 4

Análisis de armónicos

4.1. Mediciones de armónicos

La medición se realizó en el lado de baja tensión del Puestos de Distribución – PD, público de la Administración Nacional de Electricidad – ANDE ubicados en zonas comerciales y zonas de oficinas de la ciudad de Coronel Oviedo.

La norma de referencia utilizada es la IEEE 519-2014 para procedimiento de medición y de análisis de las distorsiones armónicas, como también así valores límites de la Tasa de Distorsión Armónica – THD, porcentaje de distorsión de tensión y corriente.

4.1.1. Equipo a utilizar

Analizador KYORITSU KEW6310, el equipo de medida es de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. El instrumento de medición es de propiedad de la ANDE.

Prever la instalación de este equipo dentro de una caja o tablero para intemperie. La caja debe contar con un sistema de fijación para su instalación por poste de hormigón armado , en la figura 4.1 se muestran las dimensiones mínimas y diseño propuesto del tablero.

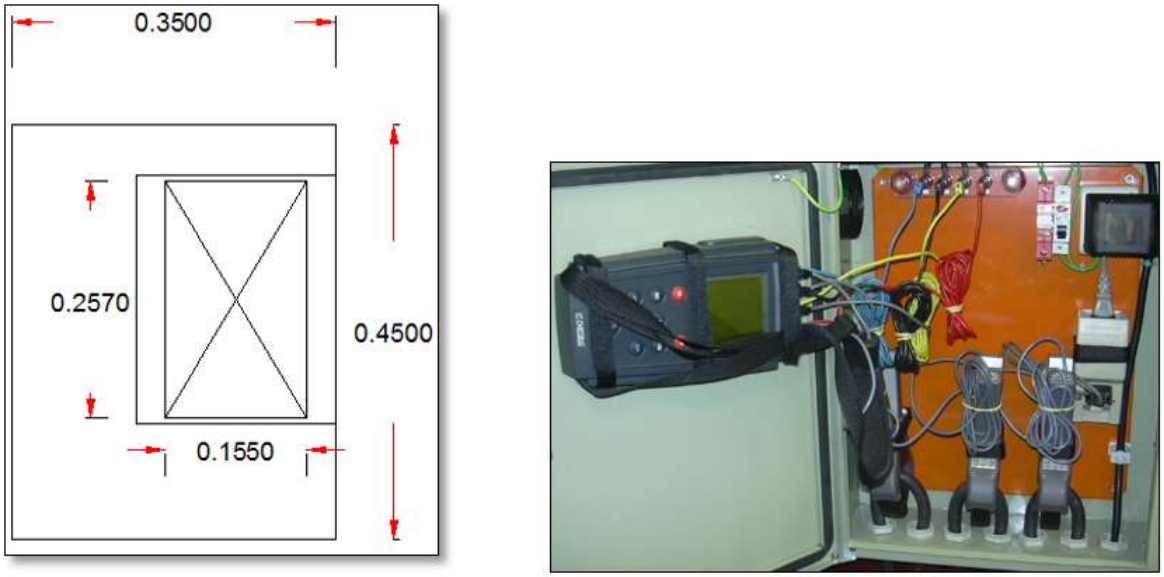


Figura 4.1: Diseño del tablero para instalar el analizador de redes por poste

4.1.2. Procedimiento de Medición

Lo siguiente son transcripciones de la IEEE 519-2014.

Mediciones armónicas de tiempo muy corto: Los valores armónicos de tiempo muy corto se evalúan en un intervalo de 3 segundos en base a una agregación de 15 ventanas consecutivas de 10 ciclos para sistemas de potencia 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.

En función a la capacidad de memoria disponible del analizador se opta por el método de medición de armónicos de corta duración. Intervalo de medición de 15 segundos por aproximadamente 36 horas totalizando un total de 8640 mediciones.

Magnitudes a medir y analizar:

1. Tensión en las tres fases (V1; V2; V3)
2. Intensidad de Corriente de carga en las tres fases (I1; I2; I3)
3. 63 componentes armónicas de tensión (V1; V2; V3), incluido la fundamental.

4. 63 Componentes armónicas de corriente (I1; I2; I3), incluido la fundamental.

5. Tasa de distorsión armónica THD, Tensión fases (V1; V2; V3)

6. Tasa de distorsión armónica THD, Corriente fases (I1; I2; I3)

4.1.3. Lista de puntos de medición

Las mediciones tienen que ser representativas y por ello se realizaron en zonas de mayor densidad de carga, identificando los Puestos de Distribución Publico de la ANDE con mayor demanda de potencia en zonas predominantemente comerciales e industrial en Baja Tensión donde sea probable la existencia de cargas no lineales.

Clientes de ANDE como comercios, bancos, financieras, oficinas, clínicas, colegios, universidades y facultades con suministro de energía en baja tensión podrían ser generadores de distorsión armónica por la carga no lineal que disponen.

Según los datos presentados, en la tabla 4.1 se puede observar la cantidad de Puestos de Distribución de la ANDE en la zona urbana de la ciudad de Coronel Oviedo.

SISTEMA	Alimentador	Cantidad		TOTAL
		Trifásico	Monofásico	
CENTRO	COV2	47	77	124
CENTRO	COV3	85	6	91
CENTRO	COV5	51	34	85
CENTRO	COV6	100	86	186
TOTAL		283	203	486

Tabla 4.1: Cantidad de transformadores de distribución de la ANDE, 2022

En la figura A.1 se observa la distribución de estos transformadores en la ciudad de Coronel Oviedo, correspondiente a los alimentadores citados.

Con la finalidad de que las mediciones sean representativas se trazan tres cuadrantes como se muestra en la figura 4.2. Donde en el primer cuadrante se dispone de 40 puestos de distribución (desde aquí PD), en el segundo cuadrante de 16 PD y en el cuadrante tercero se dispone de 9 PD.

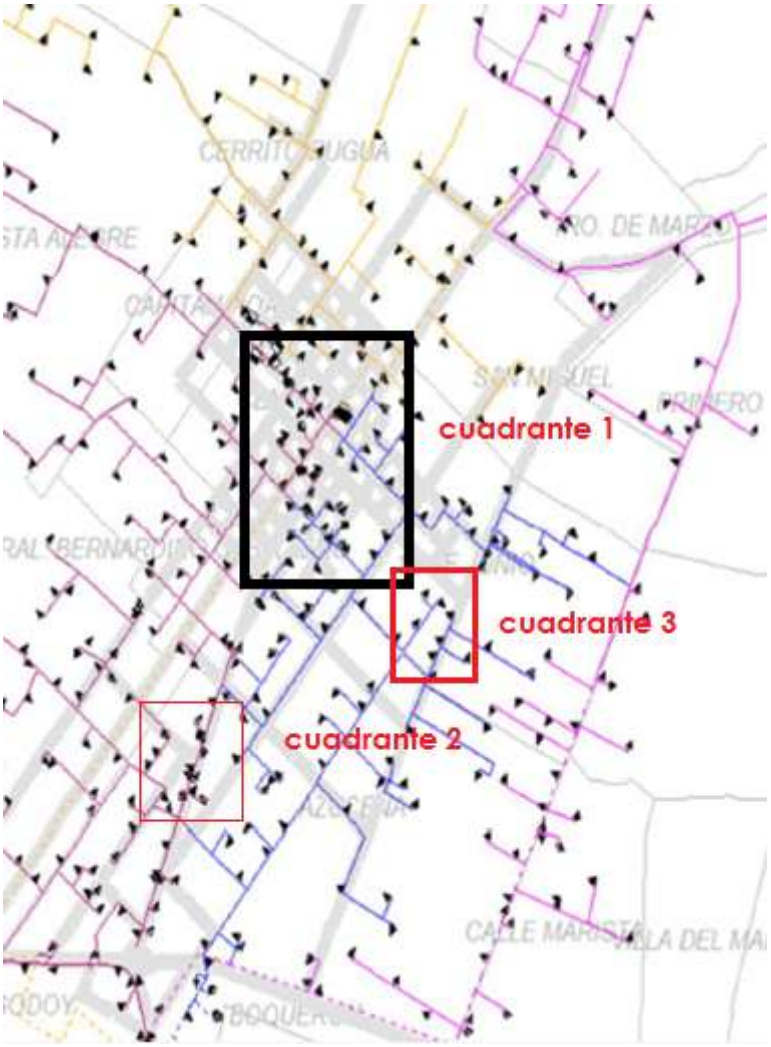


Figura 4.2: Cuadrantes de mayor densidad de carga kW/m^2

Cantidad de equipos a medir:

- Cuadrante 1: Medición de Armónicos de tensión y corriente en 01 PD
- Cuadrante 2: Medición de Armónicos de tensión y corriente en 01 PD
- Cuadrante 3: Medición de Armónicos de tensión y corriente en 01 PD
- Cantidad de PD's a evaluar: 03

Se tuvieron en cuenta las siguientes sugerencias entorno a la medición y colecta de datos:

- Realizar prácticas con el instrumento previo a su instalación, verificando todos los parámetros de interés, conexionado, capacidad de memoria y descarga de los datos.
- Tener especial cuidado en el proceso de instalación, debe hacerlo un técnico de la ANDE debidamente equipado.
- Se debe solicitar la autorización correspondiente a la ANDE, para la instalación del equipo de medición a sus redes.
- La caja debe ser para uso a la intemperie, con porta candado, y sistema de ventilación.
- El tablero debe ser instalado por el Poste del PD lo más alto y seguro posible.

En cuanto al análisis el Software es suministrado con el equipo, el KEW PQA Master. Se puede analizar los componentes armónicos de tensión y corriente en cada intervalo de medición. El valor de la Tasa de Distorsión Armónica - THDF de tensión y corriente (Calcula THD en función a la Fundamental) en las tres fases y obtener graficas de todos los armónicos y sus magnitudes o porcentaje de la fundamental, como también así el ángulo de fase entre componentes, figura A.2.

4.1.4. Límites de distorsión armónica

Armónicos de Tensión: Se establecen los limites de distorsión armónica (%) Individual y THD en función al nivel de tensión.

Según la norma IEE 519-14 [2], se tiene en cuenta el voltaje del bus en el PCC (Point of Common Coupling) es el voltaje en el punto donde se conectan el cliente y la red pública. Este voltaje suele ser más alto que el voltaje de distribución del cliente y suele estar entre 380 y 420 voltios. El voltaje en el PCC se usa como referencia para monitorear y controlar la red del cliente.

IEEE 519-14 es un estándar publicado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) que proporciona prácticas y requisitos recomendados para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica [1]. Está diseñado para ayudar a garantizar que los

niveles de armónicos se mantengan dentro de los límites aceptables y para reducir el potencial de interferencia con otros equipos electrónicos. El estándar cubre temas como los niveles de distorsión armónica permisibles, el desequilibrio máximo de tensión armónica y los límites de distorsión armónica de tensión.

En la figura A.4a se aprecia estos límites de armónicos en tensión de servicio, de lo cual se tiene que los limites para armónicos individuales será del 5 % y para los THD total será del 8 %. Mientras que la figura A.4b, muestra los límites de armónicos en corrientes.

Para los límites de distorsión en corriente para sistemas de 120V a 69kV según IEEE 519-14. Se requiere el valor de I_sc a fin de poder establecer los límites de distorsión armónica en función al cociente (I_{sc}/I_L), donde:

I_{sc}: Corriente máxima de cortocircuito en baja tensión del transformador o PCC. Este valor fue requerido para cada Puesto de Distribución donde se realizaron la mediciones, dato suministrado por la ANDE.

I_L: Demanda máxima de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental), en el PCC (Punto de acoplamiento común) en condiciones normales de funcionamiento con carga – dato recabado en las mediciones.

4.2. Medición de Armónicos de Tensión y Corriente, análisis de resultados

4.2.1. Primera medición

Puesto de distribución ANDE: COV270

- Fecha de Medición: Iniciando el 30/08/22 y finalizando el 01/09/22
- Potencia del Transformador: 100 kVA
- N° del transformador: 41.789

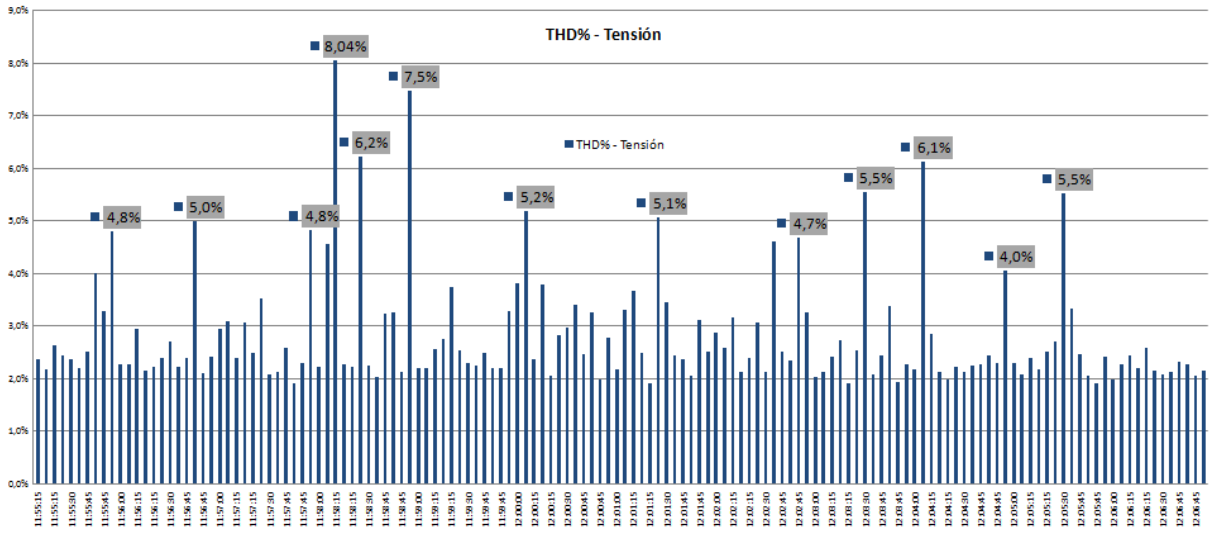


Figura 4.3: THD de tensión medición 1, en torno al valor máximo observado

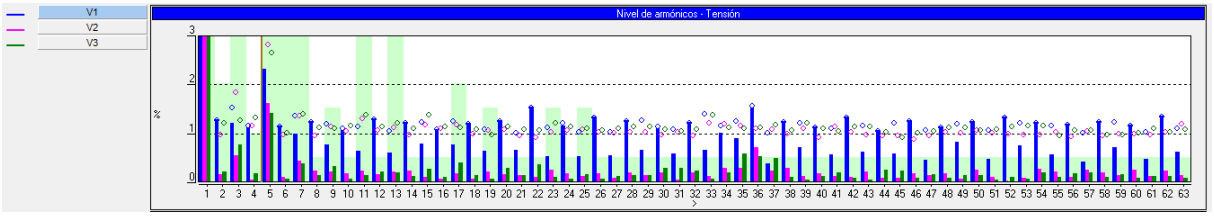


Figura 4.4: Armónicos individuales observados en medición 1

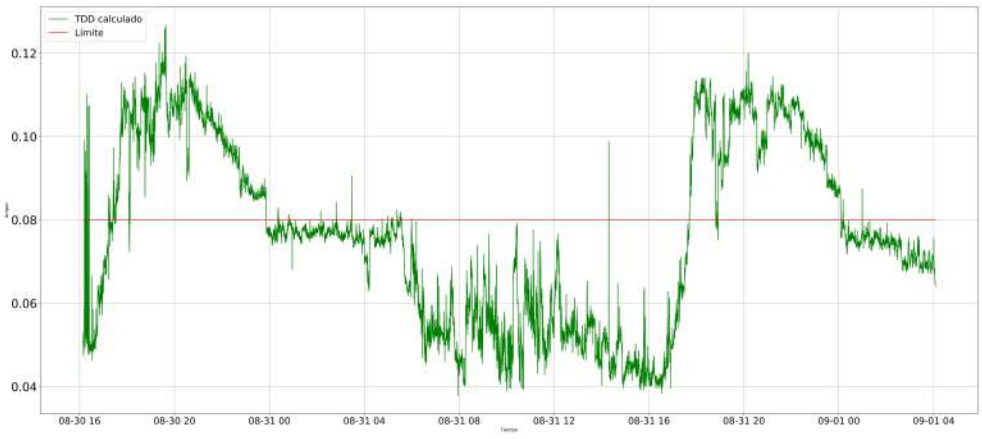
- Ciudad: Coronel Oviedo
- Dirección: Ruta N°8 (Cerca de la Quinta Che Jazmín)

En la figura A.3 se observan los parámetros cargados en el equipo de medición para su proceso. Parte de los valores obtenidos se observan en la figura A.5, captura del software utilizado.

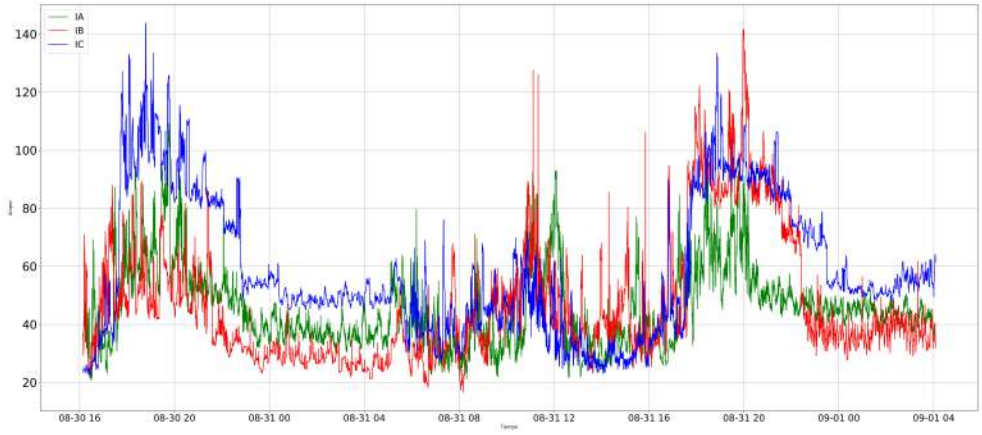
Valor máximo registrado de THD = 8 %, en el step (31/08/22 – 11:58:15) sobre la Fase 1, Este se encuentra en el límite según la norma de referencia, figura 4.3.

Analizando los armónicos individuales, estos no superan el límite establecido por la norma de referencia, figura 4.4.

En cuanto a los armónicos de corriente, se registraron algunos picos, figura A.6. El máximo valor de THD encontrado es de 35,7 %, registrado el 30/08/22 a las 16:21:30.



(a) TDD calculado a partir de registros de medición 1



(b) Corriente de las tres fases, medición 1

Figura 4.5: TDD calculado y registros de corriente en las tres fases

Según datos de la ANDE la I_{SC}= 3,77 kA (Corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común). Según los datos obtenidos I_L = 143 A (Demanda máxima de corriente de carga – Componente fundamental), por ende calculando:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 26,4$$

De A.4b, tenemos que el límite de la Distorsión de Demanda Total (TDDMAX) es igual la 8 %, para este caso.

TDD, Se define como la relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresados como por ciento de la máxima demanda de corriente.

$$TDD = \frac{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}}{Id_{max}} \tag{4.1}$$

En la expresión 4.1, se tiene $h_n = THD_n \cdot I_n$, e Id_{max} es la máxima demanda de carga. Se crea un nuevo campo dentro del data-set donde se calcula este TDD para cada registro, figura 4.5a. Además, se aprecia en la figura 4.5b como es totalmente relacional la carga con el TDD, se sobrepasa el límite establecido en tiempo continuo, notando ciclismo en este fenómeno.

En cuanto a la medición por orden de armónicos, se tiene según A.4b, los siguientes rangos:

1. $3 \leq h < 11$ - 7 %
2. $11 \leq h < 17$ - 3,5 %
3. $17 \leq h < 23$ - 2,5 %
4. $23 \leq h < 35$ - 1 %
5. $35 \leq h \leq 50$ - 0,5 %

El porcentaje del orden de un armónico se refiere a la amplitud de la onda armónica de una determinada frecuencia en relación con la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si una señal contiene una onda armónica de orden 3 con una amplitud de 1 voltio, el porcentaje del orden de ese armónico será del 33,3 %, ya que esta onda armónica es un tercio de la amplitud de la frecuencia fundamental [5].

Ahora bien, se evalúan los rangos citados, en la figura 4.6 se aprecian los porcentajes de armónicos por orden, en total 63 orden y 8625 registros sobre la fase 3, con mayor niveles. Se toman los rangos y se evalúan la cantidad de registros que pasan los límites, encontrándose los siguiente:

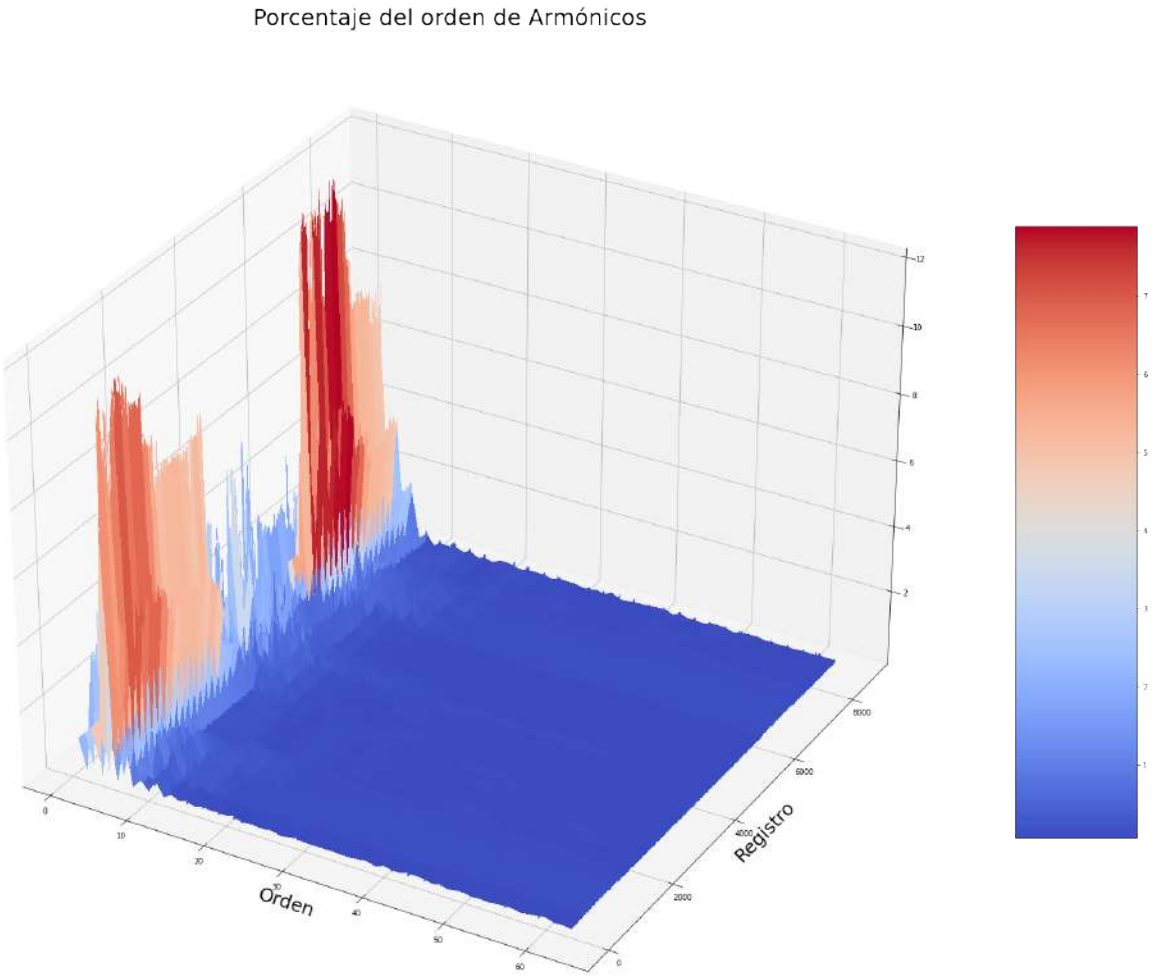


Figura 4.6: Porcentaje por orden de armónico y registro realizado

1. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.88821
2. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9569
3. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9548
4. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9920
5. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9964

En todos los casos se tienen registros fuera de los límites admisibles en este trabajo.

4.2.2. Segunda medición

Puesto de distribución ANDE: S/N

- Fecha de Medición: Iniciando el 14/10/22 y finalizando el 17/10/22
- Potencia del Transformador: 100 kVA
- N° del transformador: Sin registro
- Ciudad: Coronel Oviedo
- Dirección: Pdte. Stroessner c/ Dr. Ignacio A. Pane

nuevamente se hace referencia A.4a, la taza de distorsión armónica no supera los 4,5 % en el intervalo de medición de tensión. Los resultados se aprecian en la figura 4.7.

En cuanto a armonicos de corriente, el máximo valor de THD encontrado es de 49,4 %, registrado el 16/10/22 a las 12:25:15.

ISC= 3,7kA (Corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común). IL = 110 A (Demanda máxima de corriente de carga – Componente fundamental)

Por lo que ISC/IL=33,6, por ende se mantienen los rangos adoptados en la medición anterior.

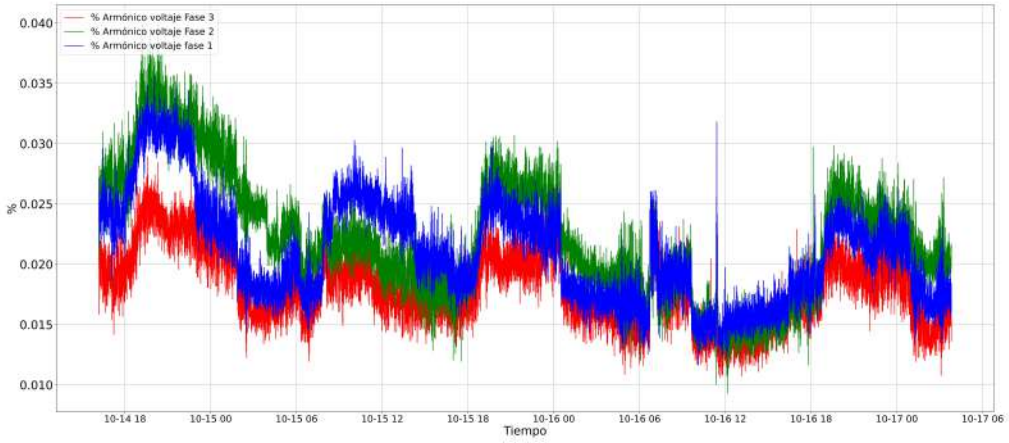


Figura 4.7: THD tensión por fase, medición 2

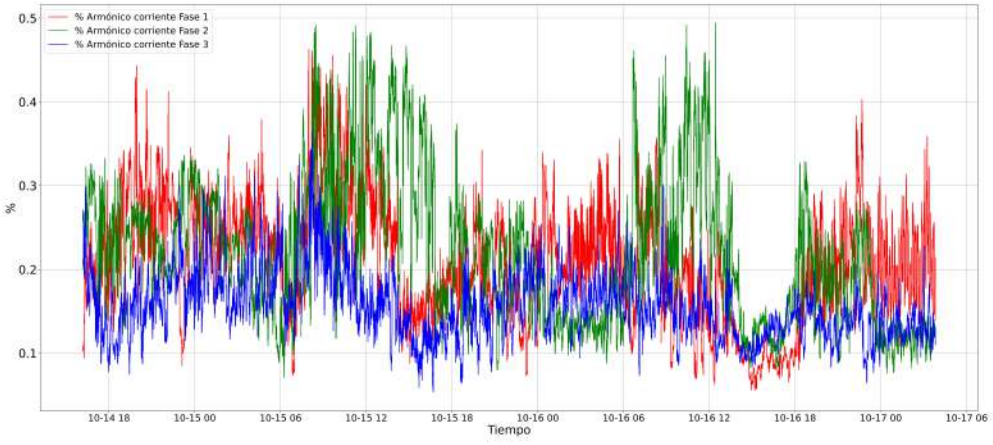


Figura 4.8: THD corriente por fase, medición 2

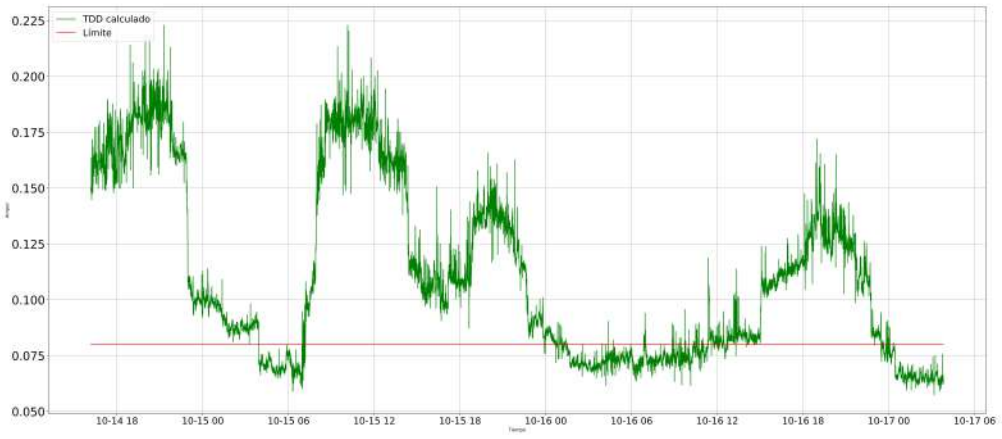


Figura 4.9: TDD calculado para cada registro, medición 2

La mayor presencia de armónicos es sobre la fase dos, esto se aprecia en la figura 4.8, es por eso que se toma dicha fase para los cálculos de TDD.

Se aprecia en la figura 4.9, que el 70 % de los registros superan los límites establecidos por normas.

En cuantos a los armónicos individuales de corriente se evalúan en el mismo rango de la medición anterior, en este caso:

1. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.8551
2. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9257
3. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9505
4. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9894
5. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9953

En la figura 4.10 se aprecian las mediciones por orden y registros de armónicos de corriente sobre la fase 3, en este caso la fase mas cargada de este fenómeno.

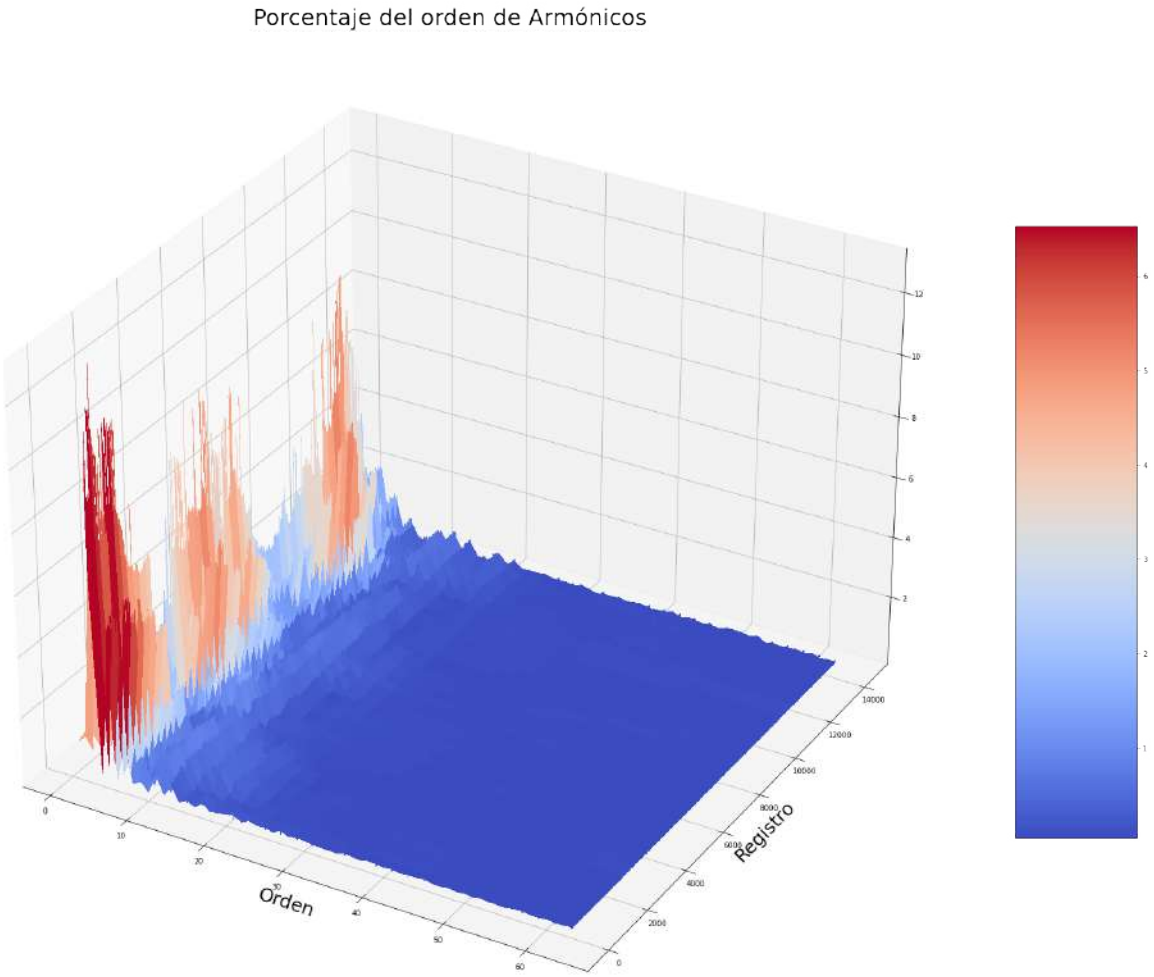


Figura 4.10: Armónicos de corriente por orden y registros, medición 2

4.2.3. Tercera medición

Puesto de distribución ANDE: S/N

- Fecha de Medición: Iniciando el 03/11/22 y finalizando el 06/11/22
- Potencia del Transformador: 100 kVA
- N° del transformador: 129729
- Ciudad: Coronel Oviedo
- Dirección: Fabián Ojeda e/ Residentas y Gral. Patricio Escobar

En esta medición se tienen resultados similares a los anteriores, los armónicos de tensión no superan el 4 %, dentro de los rangos admitidos.

En cuanto a corriente se calcula directamente el TDD, el cual se muestra en la figura 4.11. el 0.16 % de los registros se encuentran por encima del 8 % establecido.

El máximo valor de THD encontrado es de 41,20 %, registrado el 05/11/22 a las 18:19:15. Los cálculos de TDD se realizan para este intervalo de tiempo. ISC= ,56 kA (Corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común). IL = 207,7 A (Demanda máxima de corriente de carga – Componente fundamental) por lo que, ISC/IL= 21,95.

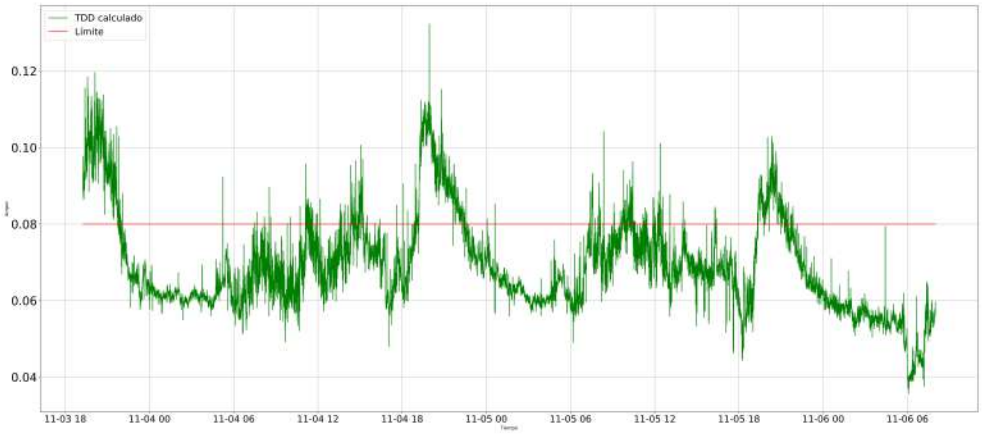


Figura 4.11: TDD calculado, medición 3

Con respecto a los armónicos individuales de corriente se evalúan en el mismo rango de las mediciones anteriores, debido al valor obtenido de ISC/IL, entonces:

1. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9019
2. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9583
3. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9661
4. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9937
5. Rango, la relación de registros fuera de rangos respeto al total: 0.9967

Capítulo 5

Analisis de alternativas para mejorar niveles de armónicos

En este capítulo se realiza un análisis de alternativas para atenuar el impacto de la distorsión armónica existente en el sistema de distribución en baja tensión de la Ciudad de Coronel Oviedo.

5.1. Dimensionamiento de los activos de distribución

De la medición periódica de la demanda máxima (Irms) de los Puestos de Distribución se puede verificar el estado de carga de los transformadores, esto sin tener en cuenta la tasa de distorsión armónica THDV y THDI y mucho menos su compensación o eliminación, más bien con miras a plantear refuerzos de los componentes del sistema de distribución a fin de aumentar su tolerancia ante los efectos de los armónicos.

Se plantean las siguientes acciones de refuerzo a fin de hacer frente a los efectos de cargas no lineales generadoras de armónicos:

Medición de carga en los puestos de distribución (PD)

La medición de carga debe realizarse en épocas de mayor demanda y en el horario apropiado donde las mediciones sean representativas. En zonas comerciales y oficinas el horario de mayor demanda se presenta entre las 14:00 y las 16:00, en zonas residenciales el horario de mayor demanda se da entre las 20:00 y las 22:00. Las mediciones pueden realizarse mediante un analizador de redes o realizando por lo menos tres mediciones de corriente mediante un amperímetro RMS en dicho intervalo de tiempo.

Medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra de protección y servicio

Mejoramiento del mismo de constatarse una resistencia de puesta a tierra superior a 5Ω (Rt ¿5 Ω) Un sistema correctamente aterrado minimiza los efectos de los armónicos, una mala puesta a tierra como así también cargas muy desbalanceadas empeora sus efectos y contribuyen a problemas de calidad de energía.

Aumento de potencia del Puesto de Distribución, en el caso de constatarse sobrecarga del mismo

De las mediciones de carga (Irms) será constatada la necesidad del reemplazo del transformador del Puesto de Distribución por otro de mayor potencia o en efecto el montaje de un nuevo puesto de distribución y adecuación de la red de baja tensión para el alivio de carga del PD existente.

Verificar que las protecciones se encuentren correctamente dimensionadas al nominal del transformador

Las protecciones del PD deben estar dimensionadas para limitar la corriente de carga y proteger el transformador y los conductores de fase. Normalmente el conductor de neutro no cuenta con dispositivo de protección por lo que su sección deberá ser mínimamente

igual o mayor a la sección de los conductores de fase.

Adecuar la red de baja tensión del PD

Implementando el anillando del mismo, y debe instalarse puesta a tierra en puntos equidistantes de su recorrido.

A fin de mejorar la calidad de energía, nivel de tensión y la distribución de corriente de fases, se plantea el anillado de la red de baja tensión, esto permitirá una distribución normal de las corrientes de carga y de esta forma los conductores serán menos exigidos pudiendo hacer frente a las sobre intensidades generadas por la contaminación armónica.

El Conductor troncal del Puesto de Distribución debe estar dimensionado a la carga nominal de transformador y teniendo en cuenta la distorsión armónica.

La Capacidad de conducción de corriente de los conductores debe ser igual o superior a la corriente de proyecto del circuito, incluyendo los componentes armónicos Si la tasa del tercer armónico y sus múltiplos fueran superiores a 15 %, hasta el 33 %, la sección del conductor de neutro no debe ser inferior a los conductores de fase. En caso de que la tasa del tercer armónico y sus múltiplos fuera superior a 33 %, puede ser necesario un conductor de neutro con sección superior a los conductores de fase (Norma Paraguaya de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión – NP2 028 96) y deberá ser dimensionado utilizando la siguiente formula.

$$I_N = F_h.I_B$$

Donde: I_N = Corriente en el Neutro F_h = Factor de sobrecarga Tabla F1 – Anexo F (NP2 028 96 – Pag 227/244) I_B = Corriente del proyecto del circuito.

Suponiendo un PD con un transformador de 150kVA con su red de baja tensión en anillo por lo cual se supone que las corrientes se distribuyen uniformemente. Inominal = 220 A, I_B = 110 A

Entonces el dimensionamiento del troncal y anillado de cada PD teniendo en cuenta la tasa del tercer armónico se muestra en la tabla 5.1. Se opta por conductores tipo preensamblado con aislación XLPE.

PD N°	I proyecto (A)	3er h %	Fh	IN	Sección (mm2)	Aislación
PD 01	110	29,6	1,15	126,5	4x70	XLPE
PD 02	110	38,06	1.24	136,4	4x70	XLPE
PD 03	110	23,64	1,15	126,5	4x70	XLPE

Tabla 5.1: Dimensionamiento de conductores teniendo en cuenta la tasa del tercer armónico

Prever la instalación de PRBT

Descargadores de baja tensión en la salida BT del Transformador. Es un Dispositivo de Protección contra Sobretensiones eléctricas (DPS) para uso en redes de distribución de energía eléctrica de baja tensión hasta 440 volt. Debido a que las cargas no lineales que originan la distorsión armónica te tensión y corriente originan la reducción de la vida útil del equipamiento, degradando el aislamiento y su eficiencia, se recomienda la instalación de DPS a fin de evitar un efecto combinado con las sobretensiones que pudieran presentarse en el sistema de distribución.

5.2. Adecuaciones en las zonas de medición

En esta alternativa se consolidan las diferentes propuestas de mejoras para cada zona de pd medida, como modelos a ser llevados a cabo para la atenuación de armónicos.

5.2.1. PD 01

En la figura 5.1 se observa el primer punto de medición y las adecuaciones propuestas, las cuales son:

- Montaje de un nuevo PD de 100kVA y construcción de la línea troncal 145 m de 4x70mm2 tipo preensamblado con aislación XLPE.

- Adecuación BT para sectorizar ambos PD's.

- Verificación y Mejora del Sistema de puesta a tierra, $R_t <= 5\Omega$.

Figura 5.1: PD 01, medición 1, adecuaciones

En la figura 5.2 se observa el segundo punto de medición y las adecuaciones propuestas, las cuales son:

- Construcción del anillado de la red de baja tensión del PD incluyendo el troncal del transformador, 450 m de línea de baja tensión trifásica 4x70mm2 (tipo preensamblado, aislación XLPE)

- Verificación y Mejora del Sistema de puesta a tierra, $R_t <= 5\Omega$.

Figura 5.2: PD 02, medición 2, adecuaciones

En la medición 3, figura 5.3, se tienen las siguientes adecuaciones:

- Aumento de potencia del PD de 100 a 150kVA
- Anillado del PD, Construcción de 122m de línea de baja tensión trifásica 4x70mm2 tipo preensamblado con aislación XLPE,
- Cambio del troncal y línea BT trifásica del anillado baja tensión trifásica por preensamblado de 4x70mm2, aislación XLPE, 375m
- Verificación y Mejora del Sistema de puesta a tierra, $R_t <= 5\Omega$.

Figura 5.3: PD 03, medición 3, adecuaciones

5.3. Filtros activos

Como segunda alternativa de mitigación de los efectos de la distorsión armónica en el Sistema de Distribución de la ciudad de Coronel Oviedo se plantea la eliminación de armónicos en el puesto de distribución mediante la instalación de filtros activos en el lado de baja tensión del Puesto de Distribución.

«Los filtros activos son equipos que tienen como función principal la compensación de corrientes armónicas. La compensación se consigue mediante la inyección en contrafase de corrientes armónicas iguales a las existentes en la instalación. Esto permite que, aguas arriba del punto de conexión del filtro, la señal no presente práctica¬mente distorsión armónica [4].»

Los filtros se basan en el siguiente principio:

$$Ifiltro = Ired - Icarga$$

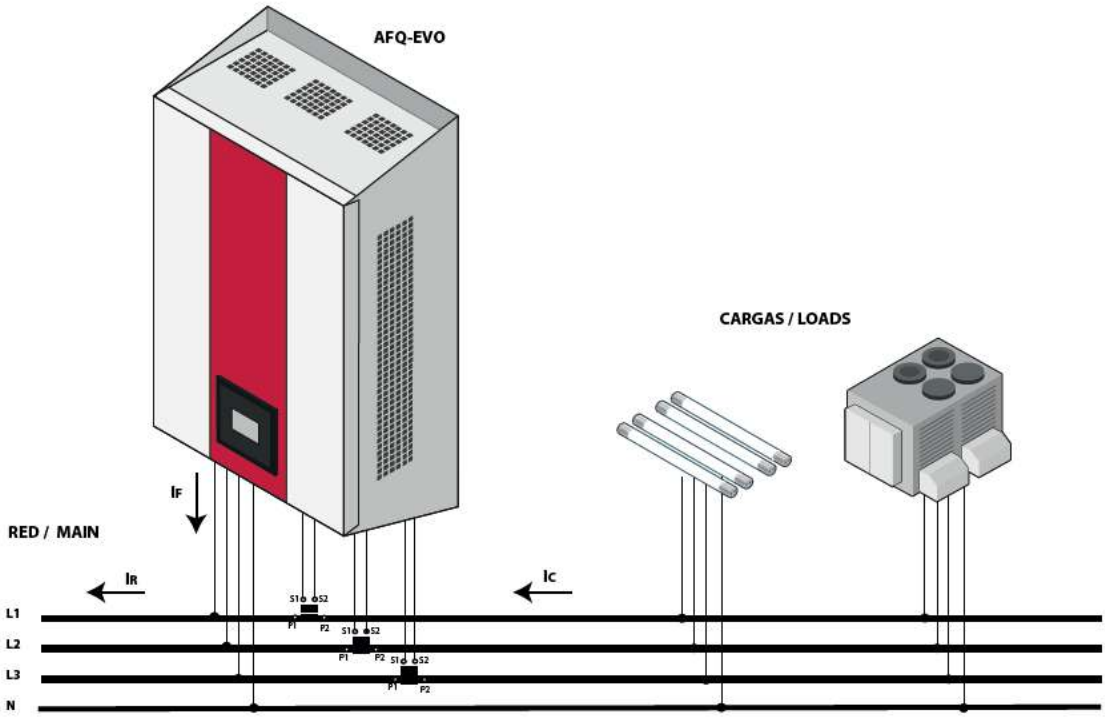


Figura 5.4: Conexionado del filtro activo

Ired : Onda senoidal de corriente deseada

Icarga : Onda de corriente deformada por efecto de los armónicos

Ifiltro : Corriente de filtro a inyectar

El dimensionamiento del filtro, viene dada por la siguiente formula:

$$Ifiltro = Irms \times \frac{THDI}{100} \times (1 + \frac{THDv}{10})[A/fase] \tag{5.1}$$

5.3.1. Dimensionamiento filtro en puntos de medición

En el primer punto de medición, para dimensionar la corriente del filtro activo debe tenerse en cuenta el máximo valor del producto $IRMS \times THDI$ y no precisamente la demanda máxima. La Ifiltro requerida es de 18,14 A, entonces para el PD N°01 de 100 kVA, el filtro activo debe ser de 20 A (véase sección A.4.

En el segundo punto, la Ifiltro requerida es de 27,06 A, entonces para el PD N°02 de 100

kVA, el filtro activo debe ser de 30 A.

En el tercer punto, la Ifiltro requerido es de 30,48 A, entonces para el PD N°03 de 100 kVA, el filtro activo debe ser de 40 A.

PD N	**Puesto de Distribución**	**Potencia KVA**	**TDD adoptada**	**TDD Limite**	**Corriente residual IR=Itotal-Ifundamental**	**IRMS x Filtro THDI**	
PD01	N°41789	100	10,76	8	54	14,4	20
PD02	S/N	100	9,58	8	26	21,6	30
PD03	N°129729	100	5,46	8	82	22,74	40

Tabla 5.2: Resumen de los filtros a utilizar en puntos de medición

Parte IV

Capítulo 6

Resultados y Discusión

Se realizaron mediciones en tres puntos seleccionados de la ciudad de Coronel Oviedo sobre tres alimentadores diferentes COV-01, COV-05 y COV-06, estos alimentadores son del tipo residencial o atienden preferentemente cargas residenciales en la primera y tercera medición se realizaron sobre transformadores de tipo trifásico en cambio el segundo transformador seleccionado es de tipo banco trifásico conectado en Y-Y y no D-Y como los anteriores. Según [7], este tipo de conexiones de devanado actúa como filtro para no sobrepasar agua arriba este fenómeno.

Se evaluaron principalmente la tasa de distorsión de tensión, corriente y órdenes de armónicos de corriente bajo la norma IEEE, se encontró en el caso de armónicos de tensión que estos en ninguna medición sobrepasaron los límites indicados, en cuanto a corriente el promedio distorsión corresponde a 32 % de media entre los máximos encontrados entre las tres mediciones lo cual supera la norma internacional, la cantidad de registro por sobre los límites se promedio en un 40 % por lo que se puede verificar y asegurar que existe periodicidad en la presencia armónicos en la red de baja tensión. Se calculó el TDD para todos los registros, éste posee características también periódicas, se encontró alta mitigación con el alineamiento de cargas de baja tensión.

Se evaluaron rápidamente dos alternativas que consisten en alivio de carga y adecuaciones de la red de baja tensión y la utilización de filtros activos, se encontró que el costo del

filtro activo corresponde al 57 % del costo de alivio y adecuaciones, sin embargo, no existe un parámetro para su mejor comparación.

Capítulo 7

Conclusiones

Se escogieron efectivamente tres puntos de medición en la ciudad de Coronel Oviedo, con diferentes tipos de consumo residenciales.

Se revisaron normas internacionales escogiéndose la IEEE como base de análisis en este trabajo.

Se logró medir eficazmente los parámetros en los puntos seleccionados.

Se analizaron todos los datos recabados clasificando los fenómenos de manera gráfica, de esta manera se pudo observar el comportamiento de este fenómeno.

Finalmente se valuaron posibles soluciones a esta problemática, encontrando mejor costo en la aplicación de filtros activos.

Capítulo 8

Recomendaciones

Realizando todos estos estudios se proponen las siguientes recomendaciones:

- Realizar este mismo estudio a nivel de 23 kV para apreciar el comportamiento armónico en red de media tensión.
- Realizar un análisis para averiguar la conveniencia de aplicar filtros en la red de baja tensión.
- Realizar un estudio armónico similar en clientes industriales de la ciudad de Coronel Oviedo.
- Utilizar este análisis como modelo en otras ciudades y otros tipos de categorías de consumos.

Apéndice A

Apéndices

A.1. Mediciones

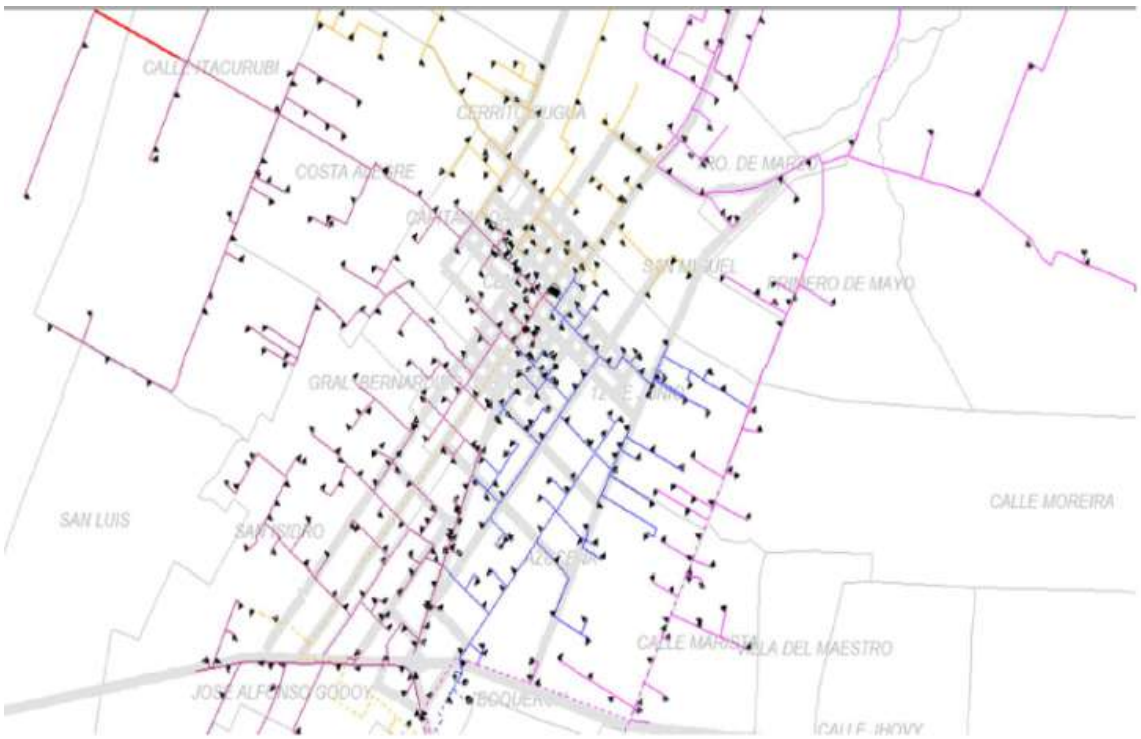


Figura A.1: Ubicación de transformadores en el centro de Coronel Oviedo

Detalles de cabecera

Elemento	CH1	CH2	CH3	CH4
ID del fichero	'6310-06			
Versión	'2_10			
Numero de ID	00-001			
CONEXIONADO	3P4W*1			
MARGEN DE TENSIÓN	600V			
RELACIÓN VT	1.00			
TIPO DE SENSOR	8129	8129	8129	
MARGEN DE INTENSIDAD	300A	300A	300A	
RELACIÓN CT	1.00	1.00	1.00	
FRECUENCIA	50Hz			
INTERVALO	15 sec.			
INICIO	2022/08/30 16:08:00			

Figura A.3: Parámetros del equipo de medición en puesto 1

Figura A.2: Inicio del software KEW

A.2. Limites según IEEE

A continuación se transcribe parte de la IEE, que habla sobre los limites de armónicos permisibles en la red eléctrica.

Table 1—Voltage distortion limits

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

[a]High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

(a) Límites de armónicos en tensión relativos a norma IEEE 519-14

Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

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

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

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

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

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

(b) Límites de armónicos en corrientes relativos a norma IEEE 519-14

Figura A.4: Límites de armónicos respecto a tensión y corriente

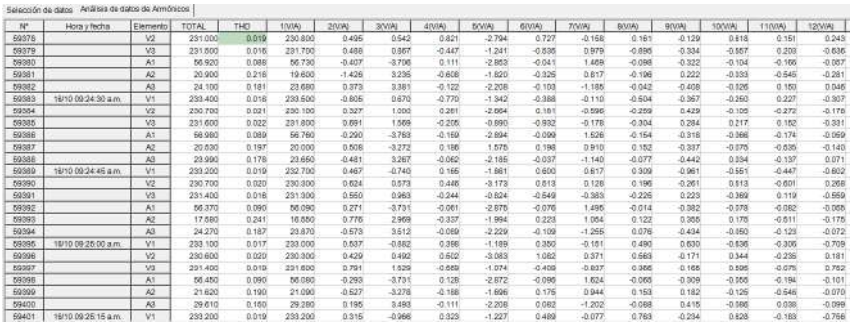


Figura A.7

A.3. Primera medición

Nº	Hora y fecha	Elemento	TOTAL	THD	1(V/A)	2(V/A)	3(V/A)	4(V/A)	5(V/A)	6(V/A)	7(V/A)
319	30/08 04:21:30 p.m.	V1	233.600	0.024	233.800	-0.340	0.783	-0.408	-4.445	-0.636	0.315
320		V2	233.700	0.022	233.600	0.165	-0.925	-0.515	-4.386	-0.428	-0.160
321		V3	230.300	0.022	230.100	-0.326	0.896	-0.312	-3.871	-0.433	0.713
322		A1	39.650	0.356	37.330	-0.533	11.060	0.252	-6.653	0.110	-2.107
323		A2	26.010	0.165	25.640	-0.163	3.329	-0.112	-2.384	-0.116	-0.723
324		A3	24.570	0.180	24.170	0.090	3.550	0.058	1.765	-0.068	-1.616
325	30/08 04:21:45 p.m.	V1	233.500	0.022	233.400	-0.300	0.868	-0.573	-4.082	-0.284	0.482
326		V2	233.700	0.021	233.600	-0.192	-1.152	-0.075	-3.988	0.192	0.740
327		V3	230.300	0.021	230.100	-0.267	1.013	-0.347	-3.824	-0.110	0.644
328		A1	38.100	0.119	28.010	-0.127	2.137	-0.131	-2.152	0.036	-0.526
329		A2	25.990	0.161	25.650	-0.108	3.239	-0.077	-2.323	-0.029	-0.667
330		A3	22.730	0.200	22.270	-0.186	3.583	0.080	1.844	-0.079	-1.708
331	30/08 04:22:00 p.m.	V1	233.400	0.023	233.400	-0.262	0.510	-0.332	-4.281	0.038	0.335
332		V2	233.700	0.022	233.800	-0.101	-1.488	-0.209	-4.196	-0.296	0.486
333		V3	230.300	0.023	230.200	-0.267	0.512	-0.222	-3.724	-0.561	0.901
334		A1	28.340	0.123	28.070	-0.368	2.306	-0.101	-2.119	0.002	-0.538
335		A2	23.550	0.167	25.600	0.142	3.404	-0.049	-2.353	-0.088	-0.701
336		A3	24.410	0.181	24.010	0.123	3.462	-0.057	1.790	-0.032	-1.683
337	30/08 04:22:15 p.m.	V1	233.400	0.023	233.500	0.439	0.804	-0.437	-4.370	-0.050	0.500
338		V2	233.800	0.022	233.800	-0.593	-1.154	-0.184	-4.211	0.503	0.575
339		V3	230.100	0.023	229.900	-0.296	1.072	-0.702	-3.738	-0.231	0.966
340		A1	28.210	0.124	28.000	0.188	2.247	-0.028	-2.251	0.045	-0.500
341		A2	23.670	0.182	23.220	0.074	3.428	-0.084	-2.257	-0.089	-0.714
342		A3	24.610	0.176	24.200	-0.102	3.476	0.116	1.714	-0.073	-1.577
343	30/08 04:22:30 p.m.	V1	233.800	0.023	233.700	-0.368	0.639	-0.593	-4.268	-0.254	0.481
344		V2	233.500	0.023	233.600	-0.477	-1.336	0.249	-3.993	-0.180	0.677

Figura A.5: Medición 1 de armónicos

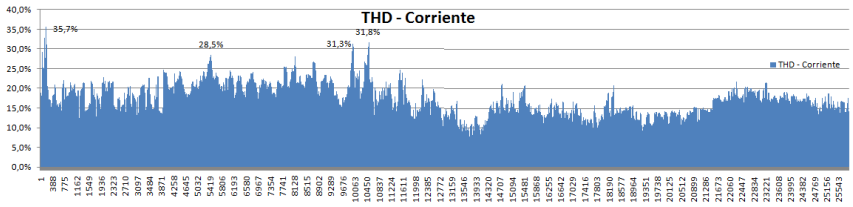


Figura A.6: Armónicos de corriente THD, medición 1

A.4. Dimensionamiento de filtros

Dimensionamiento del primer filtro:

```
Puesto de Distribución ANDE { PD01: COV270
```

Fecha de Medición: Iniciando el 30/08/22 y finalizando el 01/09/22

Potencia del Transformador: 100 kVA

Corriente Nominal: 144 A

N° del transformador: 41.789

Demanda máxima de carga: 143,8 A medido en fecha 30/08/22 { 18:47:45

Corriente residual: se define como la diferencia entre la corriente fundamental y la t

Teniendo en cuenta la demanda máxima

IRMS= 143,8 A

THDI= 3.7%

THDV = 2,7%

IRMS x THDI= 143,8 A x 0,037

IRMS x THDI= 5,32 A

Ifiltro = IRMS x THDI x FS

Ifiltro = 143.8 x 0.037 x (1 + 2,7%/10)

Ifiltro = 6,75 A, Teniendo en cuenta la demanda máxima

Teniendo en cuenta el valor máximo del producto IRMS x THDI en el intervalo de medici

IRMS= 43,94 A (FASE N°1)

THDI= 32,8%

THDV= 2,6%

IRMSX THDI (máximo) = 43,940 x 0.328

IRMSX THDI (máximo) = 14,4

Calculo del Factor de seguridad:

Fs= (1 + THDV/10)

Fs = 1 + 2.6/10

Fs =1,26

Ifiltro =14,4 x 1,26

Ifiltro = 18,14 A

Dimensionamiento del segundo filtro:

IRMS= 51,320 A (FASE N°1)

THDI= 42,2%

THDV= 2,5%

IRMSX THDI (máximo)= 51,320 x 0,422

IRMSX THDI (máximo)= 21,65

Calculo del Factor de seguridad:

Fs= (1 + THDV/10)

Fs = 1 + 2.5/10

Fs =1,25

Ifiltro =21,65 x 1,25

Ifiltro = 27,06 A

Dimensionamiento del tercer filtro:

IRMS= 86,83 A (FASE N°1)

THDI= 26,2%

THDV= 3,4%

IRMSx THDI (máximo)= 86,83 x 0,262

IRMSx THDI (máximo)= 22,74

Calculo del Factor de seguridad:

Fs= (1 + THDV/10)

Fs = 1 + 3,4/10

Fs =1,34

Ifiltro =22,74 x 1,34

Ifiltro = 30,47 A

Apéndice B

Resumen ejecutivo

B.1. Costos

Alternativa 1 – Refuerzo y Adecuación

Como ya fue explicado en el apartado correspondiente de alternativas para la mitigación de los efectos de armónicos en el sistema de distribución, se pueden citar las siguientes tareas que forman parte de los costos.

- Medición de carga en los puestos de distribución (PD)
- Verificación y mejoramiento del Sistema de Puesta (Rt ¿5 Ω)
- Aumento de potencia del Puesto de Distribución
- Montaje de nuevo puesto de distribución
- Adecuación de la red de baja tensión del PD

Costos asociados al refuerzo del sistema de distribución para los casos de estudio:

PD 01:

PD 02:

Descripción	Costo
Medición de carga en el puesto de Distribución (G)	850.000
Verificar y Mejorar SPAT (G) - Del PD existente	3.864.710
Montaje de un nuevo PD de 100kVA y construcción de la línea troncal 145 m de 4x70mm2 tipo preensamblado con aislación XLPE. (G)	38.801.820
Adecuación BT Para el PD existente (cambio de troncal) (G)	12.236.820
Total Adecuaciones de refuerzo PD01 (G)	**54.903.350**

Tabla B.1: Costos adecuación PD 01

Descripción	Costos
Medición de carga en el puesto de Distribución	850.000
Verificar y Mejorar SPAT	3.864.710
Construcción del anillado de la red de baja tensión del PD incluyendo el troncal del transformador, 450 m de línea de baja tensión trifásica 4x70mm2 (tipo preensamblado, aislación XLPE)	34.252.200
Total Adecuaciones de refuerzo PD02 (G)	**38.966.910**

Tabla B.2: Costos adecuación PD 02

PD 03:

Descripción	Costo
Medición de carga en el puesto de Distribución (G)	850.000
Verificar y Mejorar SPAT (G)	3.864.710
Aumento de potencia del PD de 100 a 150 kVA (G)	38.255.875
Anillado del PD, Construcción de 122m de línea de baja tensión trifásica 4x70mm2 tipo preensamblado con aislación XLPE	9.286.152
Cambio del troncal y línea BT trifásica del anillado de baja tensión trifásica por preensamblado de 4x70mm2, aislación XLPE, 375m (G)	28.543.500
Sub Total (G)	80.800.237
Devolución (G) - Transformador de 100 kVA (40 % del costo de uno nuevo)	7.400.000
Total (G)	**73.400.237**

Tabla B.3: Costos adecuación PD 03

Bibliografía

[1] "Wind energy electrical power generation system."

[2] IEE, "Ieee 519-14," 2014.

[3] T. J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*. Pearson Educación, 2006.

[4] A. Qevo, "Manual de instruccion del filtro paralelo multifuncion."

[5] E. T. Ramirez, "Distorsión armónica." *APyC*, 2010.

[6] C. G. Rubio Alulema, "Análisis armónico en la red de distribución eléctrica para determinar los efectos de la inclusión de vehículos eléctricos usando transformada de wavelet y hilbert huang," B.S. thesis, 2019.

[7] F. H. M. Sarmiento *et al.*, "El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas," *Tecnura*, vol. 5, no. 9, pp. 46–54, 2001.

[8] T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. CRC press, 2018.