



**ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA EN EL TALLER DE METALMECÁNICA  
DE LA EMPRESA MULTIPROYECTOS ELECTROMECAÑICOS LTDA.**

**FABIÁN MAURICIO MONTAÑO PUERTO**

**Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Bogotá, Colombia  
2022**



**ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA EN EL TALLER DE METALMECÁNICA  
DE LA EMPRESA MULTIPROYECTOS ELECTROMECAÑICOS LTDA.**

**FABIÁN MAURICIO MONTAÑO PUERTO**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**INGENIERO ELECTROMECAÑICO**

Director:

Ingeniero Javier Rodríguez Quintero

**Universidad Antonio Nariño**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica**  
**Bogotá, Colombia**  
**2023**

*“En primer lugar les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Siendo ejemplo de que con esfuerzo todos los proyectos son alcanzables.”*

*“A mi hija que es el motor de mi vida y que durante todo mi proceso formativo entendió que era necesario sacrificar tiempo y momentos con el fin de cumplir el objetivo.”*

*“A los docentes que han sido parte de mi camino universitario, por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí.”*

## RESUMEN

En este proyecto se describen las distorsiones que generan las señales de potencia eléctrica para un detallado estudio y monitoreo de Calidad de Energía Eléctrica del taller de la empresa donde es el mayor consumo de servicio de energía; por ello se propone una la medición y registro de los parámetros obtenidos a través del analizador de redes, relacionando con la normativa y regulación nacional e internacional vigente en Colombia. La metodología que se plantea para ser utilizada por los centros de investigación y desarrollo por La Comisión de Regulación de Energía, Gas y Combustibles (CREG por sus siglas) siendo la entidad colombiana adscrita al Ministerio de Minas y Energía encargada de regular los servicios de electricidad y gas según se establece en la ley 142 y 143 de 1994 que requieran realizar este tipo de mediciones.

Como resultado se entrega un informe del estado actual de la instalación eléctrica del taller, donde se sugieren y proponen alternativas de mitigación de los fenómenos electromagnéticos que se presentan, siempre y cuando la instalación eléctrica del taller de la empresa cumpla con la normatividad regulatoria vigente y se reduzcan los problemas encontrados y se minimicen los costos generados por la presencia de estos fenómenos.

En el presente estudio se revisa la instalación, se registra gráficamente y examina el voltaje, corriente, potencias, frecuencia, factor de potencia, forma de onda, armónicos y distorsiones en la línea; diagnosticando la principal falla de calidad de energía eléctrica e incluso su origen.

El estudio se realizó en 5 fases, en la *primera fase* se evalúa condiciones iniciales de la instalación eléctrica, en la *segunda fase* se miden las diferentes variables involucradas: niveles de tensión, corriente nominal, corriente de corto circuito, potencia activa instalada, factor de potencia y potencia reactiva; en la *tercera fase* se analiza y estudia las medidas recolectadas, en la *cuarta fase* se sugieren las posibles soluciones de mitigación y en la *quinta fase* el informe o reporte con las el diagnostico actual de la instalación eléctrica y sus posibles soluciones.

Dando como resultado que la calidad de la energía del taller de metalmecánica se está viendo afectada por diversos fenómenos eléctricos existentes en la red, siendo los más críticos la potencia reactiva inductiva y capacitiva, el factor de potencia y la distorsión de la forma de

onda. Estos fenómenos indican que las instalaciones eléctricas deben ser actualizadas y normalizadas para evitar sanciones.

### **ABSTRACT**

This project describes the disturbances that generate distortion to the electric power signals and that are taken into account in the study and monitoring of CEL Electric Power Quality; For this reason, a methodology and procedure is proposed for the measurement and recording of these parameters obtained by a network analyzer, relating the entire process with the national and international regulations and regulations in force in Colombia. This methodology is proposed to be used by research and development centers by the Energy, Gas and Fuel Regulation Commission (CREG for its acronym), being the Colombian entity attached to the Ministry of Mines and Energy in charge of regulating electricity and gas as established in Law 142 and 143 of 1994 that require this type of measurement.

As a result, a report on the current state of the electrical installation of the workshop is delivered, where alternatives for mitigation of the electromagnetic phenomena that occur are suggested and proposed, as long as the electrical installation of this area of the company complies with current regulatory regulations. and the costs generated by the presence of these phenomena are minimized.

In the present study, the installation is reviewed, the voltage, current, power, frequency, power factor, waveform, harmonics and distortions in the line are graphically recorded and examined; diagnosing the main power quality failure and even its origin.

The study was carried out in 5 phases:

1. Inspection,
2. Monitoring,
3. Analysis,
4. Recommendations and
5. Report.

In the first phase, initial conditions of the electrical installation are evaluated, in the second phase the different variables involved are measured: voltage levels, nominal current, short-circuit current, installed active power, power factor and reactive power; In the third phase, the collected measurements are analyzed and studied, in the fourth phase, possible mitigation

solutions are suggested, and in the fifth phase, the report or report with the current diagnosis of the electrical installation and its possible solutions.

As a result, the power quality of the metalworking shop is being affected by various electrical phenomena in the network, the most critical of which are inductive and capacitive reactive power, power factor and waveform distortion. These phenomena indicate that the electrical installations must be updated and standardized to avoid penalties.

**Keywords:** Power quality, harmonics, reactive power.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
3.1. Objetivo General .....	16
3.2. Objetivos Específicos .....	16
<b>4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>16</b>
<b>5. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>6. ALCANCE .....</b>	<b>18</b>
<b>7. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
7.1 Perturbaciones armónicas .....	21
7.2 Fenómenos accidentales:.....	22
7.3 Condiciones permanentes:.....	23
7.4 Calidad de energía eléctrica.....	23
7.5 Distorsión armónica.....	25
7.6 Tipos de carga .....	26
<b>Carga lineal:</b> .....	26
<b>Carga no lineal:</b> .....	26
7.7 Filtros .....	28
• Filtros pasivos .....	30
• Filtros sintonizados: .....	30
• Filtros amortiguados:.....	31
7.8 Banco de condensadores.....	32
7.9 Otras soluciones .....	33
<b>8. MARCO NORMATIVO REGULATORIO LEGAL .....</b>	<b>34</b>
8.1 Normatividad.....	34
8.2 Norma IEEE 519 .....	34
8.3 Norma Técnica colombiana (NTC 5001) .....	36
8.4 Desbalance de tensión.....	36
8.5 Límites y parámetros.....	37
8.6 IEC 61000-4-7.....	38
8.7 Estándar IEC 61000-4-30.....	38
8.8 Resolución (CREG) 015 – enero 29 de 2018 .....	38
8.9 NTC 2050.....	40
8.10 NTC 4104.....	41
<b>9. METODOLOGÍA.....</b>	<b>42</b>
9.1 Levantamiento.....	42
9.2 Procedimiento .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
9.3 Analizador de redes y esquema de conexión .....	43
9.4 Periodo y duración del registro de medida. ....	44

<b>10. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
10.1 Potencia aparente (kVA) .....	49
10.2 Potencia activa (kW) .....	50
10.3 Potencia reactiva (kVAr).....	51
✓ Penalización por reactiva inductiva .....	53
✓ Penalización por reactiva capacitiva.....	55
10.4 Factor de potencia.....	55
10.5 Perfil y comportamiento de corriente .....	57
10.6 Perfil y comportamiento de tensión .....	60
10.7 Distorsión total de demanda.....	62
10.8 Factor de cresta de la tensión .....	63
10.9 Frecuencia (HERTZ) .....	64
<b>11. CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>12. REFERENCIAS .....</b>	<b>69</b>
<b>13. ANEXOS.....</b>	<b>72</b>



---

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1, Tipos de perturbaciones armónicas .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2, Distorsión de la señal de tensión por conmutación .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3, Comportamiento y corrección de una señal empleando un filtro.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4, Diagrama esquemático para un filtro activo.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5, Gráfica y circuito esquemático para un filtro sintonizado .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 6, Gráfica y diagrama esquemático para un filtro amortiguado.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 7, Analizador MI 2892 Power Master .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 12, Penalización de Potencia Reactiva inductiva (kVAr). .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 13, Magnitud del excedente de la potencia reactiva Inductiva.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 14, Factor de Potencia. ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 15, 14Corrientes por Fase.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 16, Desbalance de Corriente entre fases. ....</b>	<b>59</b>
<b><i>Figura 17, Tensiones por fase.....</i></b>	<b>61</b>
<b>Figura 18, Porcentaje de TDD en la Corriente por fase. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 19, Factor de Cresta de Tensión. ....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 20, Frecuencia en Hertz .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Clasificación de las categorías y fenómenos electromagnéticos conducidos</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 2. Efectos y consecuencias de las distorsiones armónicas en componentes de un sistema eléctrico industrial</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 3. Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120V&lt;Vn≤69 kV</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 4. Límites de Dv y THDv</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 5. Límites y parámetros para la distorsión armónica según NTC 5001</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 6. IEX 61000</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 7. Representación del factor multiplicador para la norma CREG 199 de 2019</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 8. Esquemas de conexión del Analizador de Redes.</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 9. Periodo de registro de medida.</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 10. Valores Máximos y Mínimos de potencia Aparente.</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 11. Valores Máximos y Mínimos de Potencia Activa (kW).</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 12. Valores mínimos y máximos de potencia reactiva y capacitiva (kVAr)....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 13. Excedente de potencia reactiva (kVAr)</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 14. Leyenda figura 14.</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 15. Valores máximos y mínimos de Factor de potencia.</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 16. Valores máximos y mínimos de corrientes por fase.</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 17. Leyenda de figura 17.</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 18. Desbalance entre corrientes por fase.</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 19. Valores máximos y mínimos de Tensiones por fase.</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 20. Valores máximos y mínimos de TDD por fase.</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 21. Factor de cresta de tensión %.</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 22. Valores máximos y mínimos de Frecuencia.</b>	<b>65</b>

**LISTA DE ECUACIONES**

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1 Cálculo de $\beta$ .....	37
Ecuación 2 Cálculo de porcentaje de desbalance .....	37

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica es un indicador del nivel de que una instalación es adecuada para soportar y garantizar un buen funcionamiento de sus cargas. Una perturbación eléctrica puede afectar la tensión, la corriente o la frecuencia, originándose en las instalaciones de la empresa caída de eficiencia energética en las cargas que se tienen o la compañía eléctrica. En conclusión es cuando la energía eléctrica suministrada a los equipos y dispositivos tiene las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

La calidad de la energía eléctrica (CEL) la podemos caracterizar en cinco variables:

- ✓ La amplitud.
- ✓ La frecuencia.
- ✓ La forma de la señal.
- ✓ El balance de las fases.
- ✓ La continuidad

Los armónicos es un sistema de energía eléctrica, un armónico es un voltaje o corriente en un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos se pueden describir mejor como la forma o las características de una forma de onda de voltaje o corriente en relación con su frecuencia fundamental. Además, son componentes no sinusoidales de una señal de tensión o corriente. Estos se originan cuando la señal no es una forma de onda perfectamente sinusoidal, sino que contiene frecuencias adicionales que no son múltiplos de la frecuencia fundamental de la señal. Estos armónicos pueden ser generados por una amplia variedad de equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo inversores, motores, luces LED, cargadores, entre otros. Si los niveles de armónicos son demasiado altos, pueden afectar negativamente la operación de los equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo la reducción de la eficiencia, el aumento de la temperatura, la generación de vibraciones y la disminución de la vida útil de los equipos.

Por tanto, surge la necesidad de regularlos y limitarlos para mantener una operación estable y segura en un sistema eléctrico [1]. La deformación en la onda eléctrica puede ser causada por fenómenos transitorios como arranque de motores, conmutación de capacitores, descargas eléctricas, fallas de cortocircuito, entre otros.

También puede ser causada por armónicos de estado estable presentes en el sistema eléctrico. Niveles altos de armónicos pueden causar distorsión de la onda de tensión y corriente, resultando en pérdidas, calentamiento de motores, vibraciones, reducción de la capacidad de las máquinas y calentamiento de conductores. Para evitar efectos negativos en la operación de los equipos, los armónicos transitorios están regulados y limitados [2].

El presente estudio se desarrolla en la *evaluación de la calidad de energía* del departamento de mayor flujo eléctrico como lo es el taller de Metalmecánica de la empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda. con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento de la maquinaria y equipo, mejorando la calidad de la energía eléctrica que alimenta el taller. Este estudio aborda aspectos como:

- a) La estabilidad de la tensión,
- b) La presencia de armónicos y
- c) Otros factores que pueden afectar negativamente la calidad de energía, y, en consecuencia, la eficiencia y fiabilidad del taller.

Este trabajo de grado se enmarca en la *línea de estudio de eficiencia energética* en el Grupo de investigación Gi-Fourier, en el taller de metalmecánica de la empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda. área de mayor consumo energético. El proyecto consiste en 5 fases:

1. Inspección,
2. Monitoreo,
3. Análisis de datos,
4. Recomendaciones y
5. Reporte.

La inspección y el monitoreo consisten en hacer un levantamiento del diagnóstico eléctrico y perfil de carga, y en seleccionar y conectar un analizador de red en el punto adecuado. El análisis de datos es a través de software de Excel para procesar información e identificar fenómenos electromagnéticos contaminantes. Las recomendaciones se hacen con ayuda de un software de simulación eléctrica y el reporte incluye los resultados y soluciones de mitigación para reducir el riesgo y bajo la supervisión y cumplimiento de requerimientos de seguridad.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Para un correcto funcionamiento en taller de la empresa, se desarrolló el análisis que interactúa con cargas no lineales, compuestas por motores, variadores de velocidad y arrancadores, que producen distorsión armónica de tensión y corriente. El comportamiento de estos equipos y dispositivos afectan las formas de onda de tensión y corriente debido a la presencia de armónicos, que pueden ser de magnitud considerable en función de las características de impedancia y frecuencia, en los distintos puntos de los sistemas de potencia, lo cual nos lleva a mantener en continua medición las variables de:

- ✓ La amplitud.
- ✓ La frecuencia.
- ✓ La forma de la señal.
- ✓ El balance de las fases.
- ✓ La continuidad

Acorde con los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS, específicamente el objetivo 7 el importante que las personas accedan a una energía confiable y segura; sin embargo, los armónicos hacen que la calidad del suministro se vea afectada.

Es importante establecer estrategias de mitigación. En ese sentido, con este estudio de calidad de energía se busca concientizar en cómo desde cada industria se puede mitigar el impacto de los fenómenos electromagnéticos que alteran la red interconectada.

Para las grandes industrias es relevante mantener su red eléctrica con bajo contenido armónico con el fin de evitar problemas derivados de estos fenómenos. Para ello es indispensable realizar diagnóstico de la distorsión armónica en las instalaciones. Actualmente se encuentran diferentes metodologías para el análisis de distorsión armónica implementadas específicamente para el punto de acople común del consumidor industrial con el sistema de distribución. En algunas ocasiones el punto de conexión de las instalaciones eléctricas de los usuarios industriales, con altos consumos energéticos, es a través de un transformador reductor conectado al sistema de transmisión que distribuye la energía eléctrica a cada una de sus plantas. Los efectos de armónicos más representativos suelen presentarse en nodos que tienen conectadas una gran cantidad de cargas no lineales instaladas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se hace necesario para la empresa Multiproyectos electromecánicos LTDA desarrollar un diagnóstico de la calidad de energía que les permita conocer:

- ✓ Estado actual de sus instalaciones,
- ✓ Cantidad de armónicos entregados a la red,
- ✓ Factor de potencia,
- ✓ Cómo se podría mitigar el daño y/o deterioro en la maquinaria y equipo electrónico.

### 3. OBJETIVOS

#### 9.1 Objetivo General

Medir la calidad de energía en el taller de la empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda. Asegurando que todos los equipos conectados al sistema eléctrico función correcta, segura y confiablemente, cumpliendo con la normativa regulatoria que rige el sector energético del país.

#### 9.2 Objetivos Específicos

- ✓ Medir las variables del voltaje, corriente, potencia real, potencia reactiva, potencia aparente, armónicos en voltaje y corriente, espectro de la fundamental, factor de potencia, frecuencia de las instalaciones eléctricas del taller de la empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda. que estén dentro de los parámetros establecidos en la Norma nacional.
- ✓ Corregir las variables que no están dentro de los parámetros establecidos y que están alterados y que ocasionan pérdidas a la empresa Multiproyectos electromecánicos LTDA.
- ✓ Verificar las cargas instaladas que generan energía reactiva y entregan armónicos que distorsionan la red, ocasionando daños permanentes en dispositivos electrónicos y en la vida útil en las máquinas.
- ✓ Plantear soluciones de mitigación de los efectos causados por la distorsión armónica y el desplazamiento angular ( $\cos \phi$ ) existente entre la onda de corriente de una carga y su onda de tensión.
- ✓ Plasmar los resultados en un informe con las posibles formas de mitigación del análisis de calidad de energía en la empresa.
- ✓ Aplicar los límites permitidos por la resolución CREG 015 con los que realizará el estudio en el marco regulatorio nacional e internacional (NTC 5001, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30) de la calidad de energía.

### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los armónicos son componentes no deseados en la frecuencia fundamental de una red eléctrica que causa deterioro en los equipos conectados. Estos daños incluyen:

- a) disparos inoportunos de protección y control,



- b) Degradación prematura e insuficiencia de los bancos de condensadores,
- c) Mal funcionamiento de los equipos electrónicos,
- d) Deterioro de los motores asíncronos,
- e) Daño al aislamiento de los transformadores y sobrecalentamiento,
- f) Aumento de las pérdidas y reducción de la vida útil de los equipos [3].

La empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda., está dedicada a proveer servicios electromecánicos y metalmecánicos al sector industrial.

Están ubicados en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá D.C. contando con máquinas como punzonadora, cortadora, dobladora, soldadoras, entre otras.

Algunas máquinas requieren de:

- a) Transformadores elevadores para operar a su tensión nominal,
- b) Motores eléctricos y equipos de electrónica de potencia como variadores y arrancadores suaves.

En su mayoría las cargas instaladas son de carácter no lineal, generando energía reactiva y entregando armónicos que distorsionan la red, estos podrían ocasionar daños permanentes en dispositivos electrónicos, así como reducción de la vida útil en las máquinas.

Adicionalmente la normatividad regulatoria vigente del operador de red genera un cobro adicional por tener un factor de potencia inferior a 0,9 siendo necesario realizar un estudio de calidad de energía con el fin de mejorar y mantener la energía reactiva en los límites permitidos y entregar una señal de energía eléctrica en condiciones estables para las máquinas instaladas.

Con base en las problemáticas descritas anteriormente, se plantea la siguiente interrogante de investigación:

- ✓ *¿Cómo un estudio de calidad de energía puede proteger y mejorar las condiciones eléctricas y la vida útil de los dispositivos electrónicos, de las máquinas y las instalaciones del taller de la empresa Multiproyectos Electromecánicos Ltda.?*

## **5. JUSTIFICACIÓN**

En la industria, los motores de velocidad variable y los motores que utilizan arrancadores constituyen la mayor parte de las cargas, además, se utilizan varias cargas no lineales, que provocan distorsiones armónicas en tensión y corriente. Estos dispositivos y equipos, afectan las instalaciones eléctricas porque tienen armónicos que pueden ser bastante grandes en diferentes puntos de los sistemas eléctricos, dependiendo de las características de impedancia y frecuencia. Por lo tanto, se ha convertido en un pilar para que los usuarios industriales mantengan su red eléctrica con bajo contenido de armónicos sin afectar los equipos y la producción, por lo que es importante realizar un adecuado monitoreo y diagnóstico de distorsión armónica en sus instalaciones. Actualmente existen diversos métodos para analizar las distorsiones armónicas, los cuales han sido aplicados específicamente al punto común de conexión del usuario Industrial y el distribuidor en pequeñas centrales eléctricas. Sin embargo, las instalaciones eléctricas de alta motorización típicas de los usuarios industriales se conectan desde la red de transporte a un transformador reductor distribuido a través de transformadores a cada una de sus estaciones, por lo que los efectos armónicos más típicos suelen ocurrir en nodos donde muchos no lo hacen. - Se instalan cargas lineales, donde las principales distorsiones de las señales de tensión y corriente se distribuyen entre los diferentes nodos del sistema. Considerando estos aspectos, es necesario que Multiproyectos electromecánicos Ltda realice un estudio de calidad eléctrica, que les permita conocer el estado actual de estas instalaciones, la cantidad de armónicos suministrados a la red, el factor de potencia y su funcionamiento. puede mitigar estos efectos para evitar daños y/o daños a la máquina y al equipo electrónico.

## **6. ALCANCE**

El alcance del proyecto es realizar un diagnóstico de calidad de energía en el taller de metalmecánica de la empresa Multiproyectos electromecánicos S.A. el cual se realizará en 5 fases:

1. Inspección,
2. Monitoreo,
3. Análisis,
4. Recomendaciones y

## 5. Reporte.

Para desarrollar el trabajo se realizó una visita a la empresa, con el fin de:

1. Conocer las ventajas de hacer el estudio de calidad de energía,
2. Solicitar el permiso para el desarrollo, entrevista e inspección
3. Definir el alcance del estudio.

Una vez obteniendo el permiso para realizar el estudio, se inició con la visita y los procesos necesarios según el proceso del estudio y las fases.

### Primera fase: **Inspección:**

- ✓ Visita para levantamiento eléctrico y perfil de carga.
- ✓ Visita supervisada por el personal especializado de SISO.
- ✓ Visita garantizada con protección personal del personal de trabajo.

### Segunda fase: **Monitoreo:**

- ✓ Selección del punto de instalación del analizador de red.
- ✓ El punto de alimentación de la planta en el tablero de distribución principal, aguas arriba del interruptor totalizador del taller, para medir el efecto de toda la carga;
- ✓ Conexión del analizador de red (certificado)

### Tercera fase: **Análisis de datos:**

- ✓ El software Microsoft Excel se utilizó en los diferentes formatos de entrada de los datos que se exportan desde los equipos de medición.
- ✓ En el análisis el proceso: depurar, tabular y graficar
- ✓ Se identificó los fenómenos electromagnéticos que están contaminando la red
- ✓ Se comparó los límites establecidos por la normatividad colombiana.

### En la cuarta fase – **Conclusiones y recomendaciones,**

- ✓ Análisis de las diferentes propuestas de mitigación de los fenómenos encontrados,
- ✓ Se hizo uso del software de simulación eléctrica Digsilent.
- ✓ En este software se cargaron los datos de las mediciones realizadas que describen el estado actual de los fenómenos electromagnéticos presentes en el taller.
- ✓ Con la información se simuló tres alternativas de mitigación.

### En la quinta fase **Reporte:**

- ✓ Visita de presentación de los resultados de los fenómenos electromagnéticos encontrados y sus posibles soluciones de mitigación.
- ✓ Entrega de documento físico con copia electrónica al gerente del taller donde incluye toda la información del proyecto.
- ✓ Firma de carta de cierre a conformidad del proyecto.

### **Ubicación dentro de las líneas de trabajo del programa**

Dentro de los diferentes grupos de investigación con los que cuenta la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica - FIMEB este trabajo de grado se encuentra enmarcado en la línea de estudio de eficiencia energética en el Grupo de investigación Gi-Fourier, liderado por el ingeniero Rafael María Hurtado Barrera y pretende servir de material de apoyo para las materias afines con el tema.

### **Usuarios directos y formas de utilizar los resultados del proyecto**

El principal beneficiado de los resultados de este trabajo de grado es la Empresa Multiproyectos electromecánicos S.A. el gerente de la empresa podrá implementar un plan de actualización y mejora en la red eléctrica del taller con los resultados del análisis y las recomendaciones la propuesta podrá ser realidad, con el fin de mitigar los fenómenos electromagnéticos encontrados y proteger su maquinaria. Los otros actores beneficiados con los resultados obtenidos son los estudiantes y docentes de la universidad Antonio Nariño, esta información podría usarse como guía para implementar acciones que mejoren la calidad de la energía en otras empresas. Además, estos resultados se pueden convertir en insumo de procesos de investigación que requieran información de fenómenos electromagnéticos.

## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1 Perturbaciones armónicas

Las perturbaciones eléctricas son aquellos fenómenos o eventos que afectan a las características del suministro eléctrico.

- ✓ Originadas en las centrales eléctricas,
- ✓ Sistemas de distribución o
- ✓ En las propias instalaciones de los usuarios.

Las perturbaciones armónicas son un fenómeno de tipo eléctrico que se produce cuando la forma de onda de la tensión o corriente eléctrica se deforma o modifica. Este fenómeno puede ser causado por una variedad de factores, incluyendo el uso de cargas no lineales, como convertidores de frecuencia, rectificadores y otros equipos electrónicos. Estas distorsiones en la forma de onda pueden tener un impacto negativo en la calidad de la energía eléctrica y en el correcto funcionamiento de los equipos que están conectados a la red [4]. Ver tops de perturbaciones armónicas en Figura 1.

Figura 1, Tipos de perturbaciones armónicas



Fuente: AUNA Distribución, 19 09 2019 [5]

Las perturbaciones armónicas afectan la vida útil de los equipos, causan ruido en los sistemas de comunicación y aumentar el consumo de energía eléctrica. Además, interfieren en el

funcionamiento de los sistemas de protección y control, lo que puede llevar a fallas en la red eléctrica. Estos efectos negativos pueden ser mitigados utilizando filtros armónicos y otros dispositivos de corrección, que ayudan a reducir la magnitud de las perturbaciones y mejorar la calidad de la energía eléctrica [6].

Es importante que se implementen buenas prácticas en la gestión de la energía eléctrica para reducir la generación de perturbaciones armónicas y proteger los equipos y sistemas de la red eléctrica. Esto incluye:

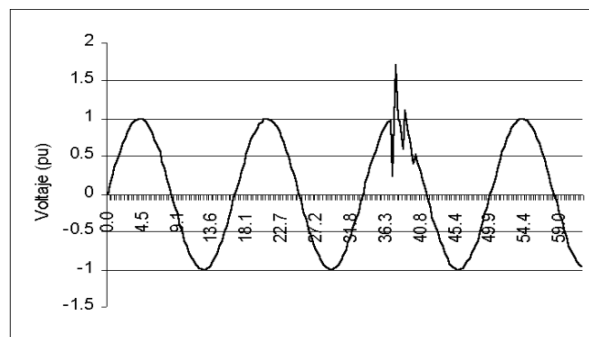
- ✓ Regular la carga
- ✓ Monitorear continuamente la calidad de la energía eléctrica,
- ✓ Evaluar y seleccionar los equipos electrónicos utilizados en la red [7].

Las perturbaciones armónicas pueden ser producidas por:

### 7.2 Fenómenos accidentales:

- ✓ Estos fenómenos suelen ocurrir en situaciones no comunes dentro de un sistema eléctrico
- ✓ Son ocasionados por fallas de cortocircuito, descargas atmosféricas, conmutación de condensadores entre otros.
- ✓ La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el comportamiento del voltaje por conmutación de condensadores, justo en el tercer periodo se evidencia como esta distorsión afecta la forma de la señal [3].

Figura 2, Distorsión de la señal de tensión por conmutación



Fuente: tomada de Programa de Calidad de energía, 2019 [4]

### **7.3 Condiciones permanentes:**

- ✓ Son perturbaciones que se presentan en un estado estable,
- ✓ Generalmente no representan un peligro para los equipos eléctricos ya que estas no producen fallas en la operación de estos.
- ✓ Se debe aclarar que existen normas que fijan los parámetros permisibles de distorsión, dependiendo del voltaje de operación y su predominio sobre el sistema eléctrico [3].

### **7.4 Calidad de energía eléctrica**

La calidad de la energía eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un buen funcionamiento de sus cargas. Una perturbación eléctrica puede afectar la tensión, la corriente o la frecuencia, originándose en las instalaciones de la empresa, las cargas que se tienen o la compañía eléctrica.

El suministro de energía es cuando la energía eléctrica suministrada a los equipos y dispositivos tienen las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes (Téllez 2007).

La calidad de la energía eléctrica (CEL) la podemos caracterizar en cinco variables:

- ✓ La amplitud.
- ✓ La frecuencia.
- ✓ La forma de la señal.
- ✓ El balance de las fases.
- ✓ La continuidad

Los armónicos es un sistema de energía eléctrica, un armónico es un voltaje o corriente en un múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos se pueden describir mejor como la forma o las características de una forma de onda de voltaje o corriente en relación con su frecuencia fundamental. Además son componentes no sinusoidales de una señal de tensión o corriente. Estos se originan cuando la señal no es una forma de onda perfectamente sinusoidal, sino que contiene frecuencias adicionales que no son múltiplos de la frecuencia fundamental de la señal.

Estos armónicos pueden:

- a) Ser generados por una amplia variedad de equipos eléctricos y electrónicos,
- b) Incluyen inversores, motores, luces LED, cargadores, entre otros.
- c) Afectar negativamente la operación de los equipos eléctricos y electrónicos,
- d) Si los niveles de armónicos son demasiado altos, pueden reducir la eficiencia, el aumento de la temperatura, la generación de vibraciones y la disminución de la vida útil de los equipos.

El concepto de calidad de energía eléctrica se entiende como un indicador de las condiciones en las cuales la energía eléctrica es suministrada a los sistemas, equipos y dispositivos eléctricos. Por tanto, se puede afirmar que existe un problema de calidad de energía eléctrica en el momento que se produce una perturbación electromagnética dentro del comportamiento sinusoidal del voltaje, corriente o frecuencia.

Los requerimientos en la calidad de la energía eléctrica están determinados por distintas normas que buscan que se cumplan unos estándares de calidad para los usuarios. Por lo tanto, las características mínimas a garantizar mediante las distintas aplicaciones de la norma son calidad de energía eléctrica, continuidad y un óptimo servicio al cliente [8].

Conforme al *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, bajo la norma IEEE-1159 de 2009 existe una gran cantidad de fenómenos electromagnéticos que afectan la calidad de la energía eléctrica en un tiempo y espacio entregado en el sistema eléctrico, esta afectación ataca específicamente sus dos variables fundamentales:

1. El voltaje y
2. La corriente [9].

En la **Tabla 1** se encuentra una clasificación de estos fenómenos categorizados en función de su contenido espectral típico, duración típica y magnitud de la tensión típica, siendo uno de estos la perturbación armónica de la onda sinusoidal [10].



Tabla 1. Clasificación de las categorías y fenómenos electromagnéticos conducidos

<b>Categoría</b>	<b>Contenido espectral típico</b>	<b>Duración típica</b>	<b>Magnitud de la tensión típica</b>
<i>Transitorios</i>			
<i>Impulso</i> <i>Nanosegundos</i> <i>Microsegundos</i> <i>milisegundos</i>	5 ns de subida 1 $\mu$ s de subida 0,1ms de subida	<50 ns 50ns - 1ms >1ms	
<i>Oscilaciones</i>			
<i>Baja frecuencia</i> <i>media frecuencia</i> <i>alta frecuencia</i>	<5 kHz 5-500 kHz 0,5-5 kHz	0,3 - 50 ms 20 $\mu$ s 5 $\mu$ s	0 - 4 p.u. 0 - 8 p.u. 0 - 4 p.u.
<i>Variación de corta duración</i>			
Instantáneas Sag Swell		0,5 - 30 ciclos 0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,8 p.u.
<i>Momentánea</i>			
Interrupción Sag Swell		0,5 ciclos - 3s 30 ciclos - 3s 30 ciclos - 3s	<0,1 p.u. 0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,4 p.u.
<i>Temporales</i>			
Interrupción Sag Swell			<0,1 p.u. 0,1 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,2 p.u.
<i>Variación de larga duración</i>			
Interrupción sostenida Sub-tensión Sobre tensión		>1 min >1 min >1 min	0 - 0 p.u. 0,8 - 0,9 p.u. 1,1 - 1,2 p.u.
<i>Desbalance de tensión</i>		Estado estable	0,5 - 2%
<i>Distorsión en la forma de onda</i>			
Offset DC Armónicos Inter armónicos Muecas Ruido	0 - 100(th)h 0,6kHz  Banda ancha	Estado estable Estado estable Estado estable Estado estable Estado estable	0 - 0,1% 0 - 20% 0 - 2%  0 0 1%
Fluctuación de tensión	<25Hz	Intermitente	0,1 - 7%
Variaciones de frecuencia		<10s	

Fuente: IEEE Standars Association, 2019 [10]

## 7.5 Distorsión armónica

La forma de onda de la corriente en un sistema depende del voltaje a él aplicado, y de su característica V-I. En el caso de las redes eléctricas, la principal causa de distorsión armónica es la característica V-I no lineal de los equipos conectados al sistema [7].

## 7.6 Tipos de carga

Una carga es lineal cuando tiene una relación lineal (ecuación diferencial lineal con factores constantes) entre la corriente y la tensión.

### Carga lineal:

- ✓ Absorbe una corriente sinusoidal cuando es alimentada por una tensión seno,
- ✓ Si esta corriente está desfasada o no un ángulo  $j$  con respecto a la onda de tensión.

### Carga no lineal:

- ✓ Absorbe una corriente no seno
- ✓ Induce la presencia de corrientes armónicas cuando es alimentada por una señal de tensión sinusoidal pura.
- ✓ Un ejemplo típico de carga no lineal lo constituyen los equipos electrónicos [7].

### Efectos de los armónicos en la industria

La distorsión armónica en la red de alimentación eléctrica se produce cuando el flujo de corrientes armónicas genera caídas de voltaje no lineales de la red, aumentando así su riesgo de falla, lo que puede causar [11]:

- a) Aparatos que utilizan la tensión como referencia, ya sea para controlar algunos semiconductores o como base de tiempo para sincronizar ciertos sistemas.
- b) Disturbios debidos a los campos magnéticos generados: líneas de alimentación por las que circulan armónicos pueden inducir corrientes en líneas de transmisión de datos que se encuentren próximas; las corrientes inducidas pueden causar mal funcionamiento de los equipos a los cuales estas líneas de datos están conectadas.
- c) La circulación de corrientes armónicas en el neutro provoca una caída de tensión en este conductor, lo cual desde el punto de vista eléctrico siempre se debe evitar. Con la presencia de estas corrientes en los sistemas de tierra muchas carcasas de diversos equipos dejan de estar al mismo nivel de potencial, lo que puede interferir en la comunicación entre dispositivos inteligentes; además, la corriente circula por las estructuras metálicas de la construcción convirtiéndose ésta en una antena de campos electromagnéticos perturbadores [11].

Para observar los efectos y las consecuencias de los armónicos en la industria, a continuación, se presenta la

Tabla 2 clasificando estos problemas según sea el equipo empleado.

Tabla 2. Efectos y consecuencias de las distorsiones armónicas en componentes de un sistema eléctrico industrial

Elemento	Problema	Efecto	
Transformadores	Circulación de corriente por los devanados	Sobrecalentamiento de los devanados	
	Perdida en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault)	Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento	
			Disminución de rendimiento
			Sobredimensionamiento de transformador (crea mayor distorsión)
			Ruido audible
			Aumento de temperatura de operación
			Aumento de la temperatura en partes estructurales
	Pérdida de aislamiento por aumento de temperatura		
Conductor	Aumento de la corriente	Aumento de pérdida terminas por efecto Joule	
	Aumento de la resistencia	Falla de aislamiento debido a la presencia de resonancia	
	Aumento de pérdidas térmicas (efecto joule)	Calentamiento adicional debido al efecto piel	
	Efecto "skin"	Disparo de protecciones termomagnéticas	
	Circulación de armónicos múltiplos de 3	Aumento de la corriente que circula por el neutro	
	Retorno por el conductor de neutro	Degradación prematura	
Condensadores	Resonancia paralela con el sistema	Calentamiento adicional debido al efecto piel	
	Ampliación de armónicos	Envejecimiento prematuro	
		Destrucción de condensadores	
Motores	Circulación de corrientes armónicas por los bornes	Sobrecalentamiento de los devanados	
	Perdida en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault)	Incremento de la pérdida en el cobre y en el hierro	
	Pérdidas magnéticas	Disminución de la eficiencia	
			Reducción del par
			Ruido audible mayor en comparación con el emitido con la excitación sinusoidal
			Mayor deslizamiento
			Calentamiento del rotor
			Pérdida de la vida útil
	Pérdida de aislamiento		
	Desgaste mecánico en rodamiento y vibraciones en el eje		
Equipos de medida y control	Medidas no válidas	Error en equipos, referencia el paso por 0 de la onda	
	Errores en los procesos de control	Saturación de transformadores de media y/o protección	
	Resonancia paralela con el sistema	Valores de magnitudes incorrectas	
		Mal funcionamiento por resonancia en el sistema	
		Funcionamiento lento y/o, altos valores de arranque de los relés	
Equipos electrónicos	Interferencia	Fallas en el funcionamiento	
	Ruido inducido	Instrumentos afectados, información errónea	

Desplazamiento del cruce por cero
-----------------------------------

Fuente: Beltrán, J. R. L. y Gámez, E. V, 2019 [12]

- **Métodos de mitigación armónica**

La problemática derivada de los armónicos en la red eléctrica de empresas y/o hogares genera una serie de costos referidos al mantenimiento de equipo o sustitución de los diferentes dispositivos mencionados en la

Tabla 2.

Es necesario buscar e implementar mecanismos capaces de atenuar y corregir este fenómeno; las soluciones “más efectivas” hoy radican en establecer y utilizar componentes de tipo pasivos como: condensadores, inductancias y transformadores, los cuales hacen el trabajo de reducir los niveles de distorsión armónica asegurando la seguridad de la instalación y el debido cumplimiento la normativa [13].

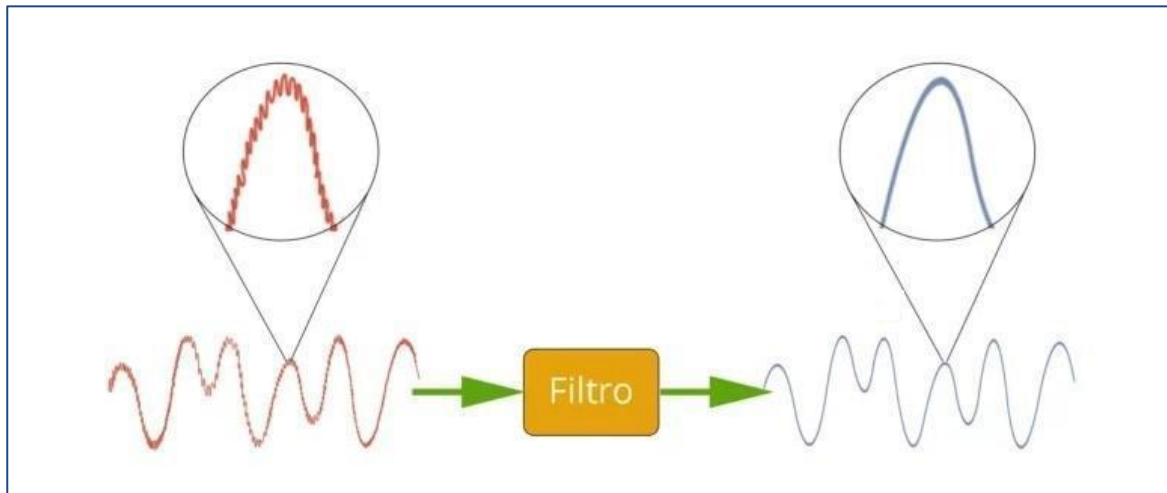
Con el propósito de encontrar una solución a los elevados niveles de perturbación armónica se sugiere:

- a) Desarrollar una simulación de la red eléctrica en la empresa,
- b) Con el resultado de dicha simulación, es posible un análisis detallado del sistema eléctrico y así establecer la ubicación y la(s) posible(s) causa(s) de las pérdidas generadoras de los altos niveles de armónicos,
- c) Con el diagnóstico realizado ya es posible verificar los problemas con acciones que se basan en la adecuación de filtros y reactancias en línea en la ubicación correcta dentro de la instalación.
- d) con todas las recomendaciones anteriores, se logran llevar los armónicos al nivel permitido obteniendo como resultado un sistema eléctrico más confiable,
- e) Se garantiza la reducción de número de fallas, las paradas de proceso y las fallas en los equipos [13].

### 7.7 Filtros

Se trata de aquellos dispositivos diseñados con componentes eléctricos y electrónicos que permiten o impiden el paso de señales con un rango de frecuencia determinado con el fin de atenuar, enmendar o denegar un rango de frecuencias dentro de cualquier clase de señal, así como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 3, este funcionamiento puede ser cambiante ya que existen gran variedad de tipos de filtros, adicional estos presentan versatilidad en sus usos [8].

Figura 3, Comportamiento y corrección de una señal empleando un filtro



**Fuente:** Mecafenix, Ingeniería, 2022, [8].

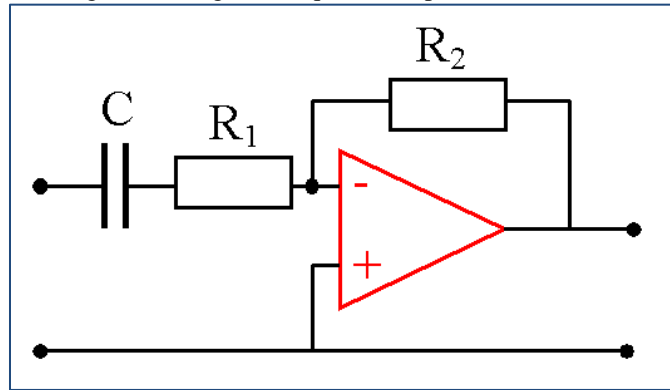
- **Filtros activos**

El filtro activo tienen como compartimiento principal supeditarse al uso de semiconductores IGBT, están asociados directamente con la electrónica de potencia y utilizan transformadores de corriente para registrar la intensidad de secuencia negativa que exista, esto con el fin de determinar la cantidad de armónicos presentes en la red y así poder suministrar corriente negativa inversa para lograr un equilibrio de corrientes en el sistema, además poseen la cualidad de corregir el factor de potencia.

Sus principales aplicaciones son en instalaciones eléctricas que requieran una fuerte corrección de perturbaciones armónicas en la red [14].

En la [Figura 4](#), se observa el diagrama esquemático para un filtro activo en función de un amplificador operacional paso alto, sus componentes son: resistencia, condensador y amplificador.

Figura 4, Diagrama esquemático para un filtro activo



Fuente: J. C. Cerecedo Márquez, 2010 [14]

- **Filtros pasivos**

Los filtros pasivos son utilizados especialmente por los usuarios en las industrias por a su bajo costo, están compuestos por resistencias, bobinas y condensadores, generalmente su instalación se realiza de forma que quede en paralelo con la carga no lineal, para así ajustar los niveles de armónicos que se van a atenuar.

La función de este tipo de filtro consta de suministrar una ruta de baja impedancia para que por ahí circulen las corrientes eléctricas armónicas, de esta forma pasan primero por el filtro y no por la fuente, es por tanto que estos filtros se construyen para una operación condicionada bajo un orden o jerarquía de armónicos

Una de sus características o ventajas importantes es tener facultades para la corrección del factor de potencia y también para la atenuación de distorsión en la onda de la corriente.

Entre su desventaja tenemos que al implementar este filtro se puede presentar un cálculo no preciso de sus componentes lo cual tiene como consecuencia la generación de resonancias paralelas con la red amplificadas por las corrientes armónicas [15].

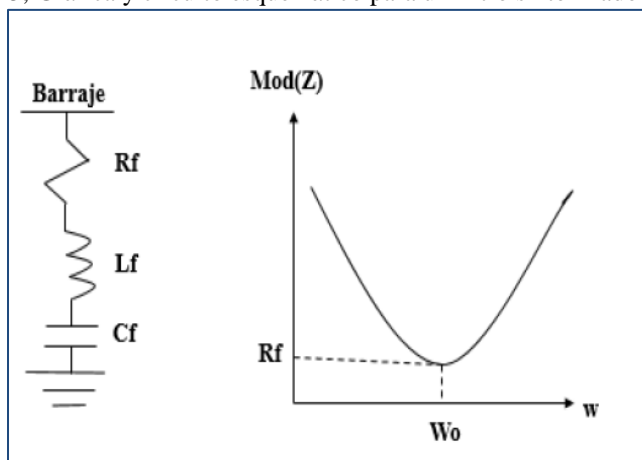
Los filtros pasivos tienen dos tipos de clases:

- **Filtros sintonizados:**

Los filtros sintonizados se disponen en paralelo con la carga no lineal y se componen de los siguientes elementos: resistencia, inductancia y capacitor, tal como se enseña en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 5, estos filtros se utilizan principalmente para

quitar armónicos de órdenes menores, de esta manera se comportan como sumideros del factor armónico a la que fueron creados.

Figura 5, Gráfica y circuito esquemático para un filtro sintonizado

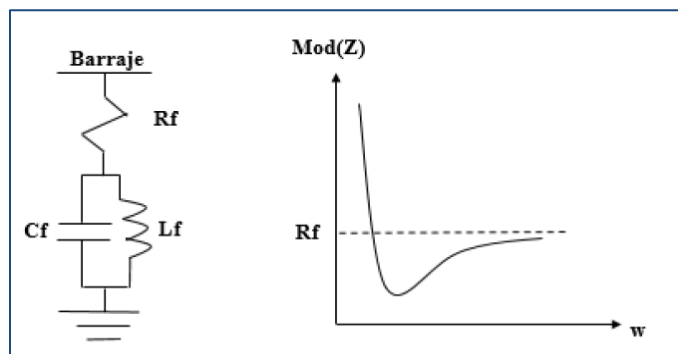


Fuente: Segura Wilches & Merchán Rojas, 2017 [13]

- **Filtros amortiguados:**

Estos se disponen de forma que el condensador se encuentre en paralelo a la inductancia y a su vez esta configuración se coloca en serie con la resistencia, así como lo podemos observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 6**, este filtro, se sintoniza a alguna frecuencia específica; pero por su característica amortiguada producto de la Resistencia en paralelo con la inductancia, presenta una baja impedancia para las frecuencias desde una sintonía establecida en adelante.

Figura 6, Gráfica y diagrama esquemático para un filtro amortiguado



Fuente: Segura Wilches & Merchán Rojas, 2017 [13]

### 7.8 Banco de condensadores

El mejoramiento del índice de factor de potencia mediante banco de condensadores se hace con:

- a) La finalidad de usar un sistema más confiable,
- b) Equilibrar las cargas reactivas,
- c) Evitar sanciones económicas por parte de los proveedores de la energía eléctrica (En Colombia, el regulador de energía eléctrica, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).
- d) Establece que los usuarios deben mantener un factor de potencia mínimo de 0,9, a partir del cual se pueden aplicar sanciones económicas por parte de los proveedores de energía eléctrica.
- e) Este valor puede variar dependiendo del tipo de usuario y del contrato de suministro de energía),
- f) Optimizar la red o instalación eléctrica.
- g) Implementando esta tecnología se consigue llevar a niveles más bajos y menos recurrentes las caídas de tensión,
- h) Aumenta la capacidad de emisión de potencia activa y
- i) Disminución significativa en las pérdidas de energía eléctrica útil [16].

Estos equipos son diseñados para ser fijos y automáticos, esto depende de: el esquema de carga de energía reactiva, los niveles de voltaje de la red eléctrica, características propias de la carga y de la potencia a equilibrar [16].

Los bancos de condensadores se elaboran bajo especificaciones óptimas para ser instalados tanto en condiciones tipo interior o intemperie; según sea el caso estos dispositivos suelen ser modulares y auto soportados, ya que generalmente son fabricados con planchas de hierro que van de 1mm a 3mm e calibre. Cuentan con un grado de protección de estándar de IP20 el cual puede según el requerimiento alcanzar el nivel IP55, esto para protegerlo de polvo excesivo y de posibles contactos fuertes con agua en cualquiera de sus superficies [16].

A continuación, se presentan algunas de las principales ventajas a la hora de implementar un banco de condensadores:



- ✓ Su mantenimiento es fácil y no tiene un costo económico elevado [17]
- ✓ Mitigan las caídas de tensión [3]
- ✓ Reducen las pérdidas en la red eléctrica derivadas del calentamiento de sus componentes [16]
- ✓ Evitan castigos por generación de energía reactiva [16]
- ✓ Reducen el costo de la factura de energía eléctrica [15]
- ✓ Se le alarga la vida útil de los equipos y en ocasiones aumenta el desempeño de estos [3]
- ✓ Su diseño y materiales de fabricación generan confianza y evitan el peligro para el usuario en caso de una falla en el sistema eléctrico [16].

### **7.9 Otras soluciones**

Existen otras alternativas para mitigar el problema de armónicos en la red, estas soluciones en algunas ocasiones son implementadas desde el interior de la instalación eléctrica, por ejemplo:

- ✓ Duplicar el calibre del neutro cuando exista el problema de flujo de armónicos circulando por el neutro
- ✓ Con los transformadores se puede realizar una conexión delta estrella capaz de bloquear el flujo de armónicos por el neutro, esta solución es efectiva siempre y cuando las cargas no lineales estén equilibradas [3]

## 8. MARCO NORMATIVO REGULATORIO LEGAL

Para ejecutar un estudio de calidad de energía, se hace necesario conocer las normas y directrices que rigen estos procedimientos. Por lo tanto, en este capítulo se presenta una recopilación de las normas implicadas en el desarrollo de este proyecto, las normas presentadas brindan un soporte con respecto a los lineamientos y límites que se necesitan para realizar el análisis y medición de la perturbación armónica, igualmente para el caso de los equipos a utilizar y en general para todas las técnicas a emplear en este trabajo.

### 8.1 Normatividad

El sector eléctrico mundial a lo largo del tiempo ha venido implementado una serie de reformas y resoluciones con el fin de lograr una estandarización para todos los procedimientos concernientes a los estudios de calidad de energía y demás, en la gran variedad de instituciones y organizaciones que existen como:

- ✓ *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* normalización americana y también la *International Electrotechnical Commission (IEC)*, normalización europea.
- ✓ Para un estudio de calidad de energía las normas relevantes en la actualidad son: IEEE519, IEEE1159 e IEC61000.

Ahora bien, para el caso colombiano tenemos la la Norma Técnica Colombiana (NTC), ésta es la norma regulatoria para el sistema eléctrico en todo el territorio nacional, es de obligatorio cumplimiento y en efecto presenta penalidades para los usuarios que no la cumplan, dentro de la norma encontramos la NTC 5001, encargada de regular los límites y medidas de un estudio de calidad de energía, en general la NTC toma muchos principios normativos de normas internacionales como los son la IEEE y la IEC [3]

### 8.2 Norma IEEE 519

La norma estandarizada IEEE 519 Define Los criterios de armónicos en tensión y corriente para el diseño de sistemas eléctricos. Está normativa establece las metas para el diseño de sistemas eléctricos que contienen cargas lineales y no lineales. Este reglamento es periódicamente actualizado desde su introducción en 1981, la última actualización es la de 2014.

Además, se establece que los operadores de red de energía eléctrica deben ser capaces de brindar un óptimo nivel de tensión y forma de onda, la norma IEEE 519 no solo se enfoca en determinar el nivel absoluto de armónicos, igualmente, precisa la magnitud referente a la red de abastecimiento [18].

Uno de los propósitos principales de esta norma es el de recomendar límite en la perturbación armónica a partir del problema generado por la inyección desmesurada de corriente armónica o distorsión de voltaje. Para estos casos es obligatorio que tanto el operador de red y el usuario resuelvan estas dificultades con base en dos parámetros fundamentales descritos a continuación [18]:

- ✓ Cuando se presente una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar a la red de distribución eléctrica. (IEEE Std 519, 1992)
- ✓ Se establece un límite en el nivel de tensión armónico que una compañía operadora de red puede brindar al usuario [19].

Asimismo, mediante esta norma se detectan los niveles completos de distorsión armónica, estos valores como lo son los de la perturbación en la corriente se obtienen a partir de la máxima corriente de carga demandada, se conoce mediante el termino comúnmente conocido como THD o TDD, con el fin de comprender estos límites y como opera esta norma sobre un estudio de calidad de energía eléctrica, se presenta la Tabla 3 correspondiente a los límites de corriente para componentes armónicas propias, del mismo modo se asocia la distorsión armónica total [18].

Tabla 3. Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución  $120V < V_n \leq 69$  kV

<b>Relación <math>I_{sc}/I_L</math></b>	<b>&lt;11</b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>35 \leq</math></b>	<b>TDD</b>
<b>&lt;20</b>	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
<b>20&lt;50</b>	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
<b>50&lt;100</b>	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
<b>100&lt;1000</b>	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
<b>&gt;1000</b>	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fuente: Cespedes Molano, L. E. y Saad Gómez, J. A, 2007 [18].

Se resalta que la norma IEEE 519 presenta lineamientos adicionales para los límites de distorsión de tensión, estos límites armónicos de tensión sugeridos se disponen con el fin de

que sean niveles bajos para que no altere la operatividad y el buen funcionamiento de los equipos que pueda tener el usuario.

En la Tabla 4 se describen los límites para las dos componentes referidas a la distorsión armónica de voltaje.

Tabla 4. Límites de Dv y THDv

<i>Rango de tensión</i>	<i>Distorsión armónica individual (%)</i>	<i>Distorsión armónica total - THDv (%)</i>
<i>1kV &lt; Vn ≤ 69 kV</i>	3,0	5,0
<i>69kV &lt; Vn ≤ 161 kV</i>	1,5	2,5
<i>Vn ≥ 161 kV</i>	1,0	1,5

Fuente: Cespedes Molano, L. E. y Saad Gómez, J. A, 2007 [18].

### 8.3 Norma Técnica colombiana (NTC 5001)

Es la norma técnica colombiana de calidad de potencia eléctrica [11]. Su propósito es establecer los límites y la metodología de evaluación en un punto de conexión común; es una norma que contiene aspectos similares a la norma IEEE 1159.

La norma técnica colombiana 5001 es la norma encargada de abordar el tema de la calidad de potencia, su intención es determinar los límites y metodología para el análisis en punto de conexión común para diferentes niveles de tensión bajo condiciones naturales de operación. Por otro lado, en ella se establecen las categorías del tipo de medida y en qué casos es aplicable esta norma nacional conforme a dos clases estipuladas:

- **Clase A:** Se aplica cuando se necesita la medición precisa para efectos de aplicaciones contractuales o dentro de un marco legal, también, para solucionar contiendas entre operador de red y usuario, todo lo anterior es basado en una verificación y comprobación de valores estandarizados por la norma [3]
- **Clase B:** Se aplica para los casos que no se requieren mediciones de tan alta precisión o comprobación, usualmente es usada para casos en donde se desarrollan investigaciones estadísticas o análisis de diagnósticos en instalaciones eléctricas [3]

### 8.4 Desbalance de tensión

Se define como la relación entre la magnitud de la componente con secuencia negativa en contra de la parte positiva la cual se encuentra definida en porcentaje, a continuación, se enseña en Ecuación 1 y Ecuación 2, bajo estas expresiones matemáticas se calcula la variable, para la NTC 5001 el desbalance de voltaje debe ser menor a 2%.

**Ecuación 1: Cálculo de  $\beta$** 

$$\beta = \frac{|Vab|^4 + |Vbc|^4 + |Vca|^4}{(|Vab|^2 + |Vbc|^2 + |Vca|^2)^2}$$

$\beta = \text{desvalance de tensión}$

V= Voltaje

a= fase 1

b= fase 2

c= fase 3

**Ecuación 2: Cálculo de porcentaje de desbalance**

$$\%desbalance = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100$$

$\beta = \text{desvalance de tensión}$

**8.5 Límites y parámetros**

Para el estudio de calidad de energía eléctrica es importante conocer los límites de las diferentes distorsiones que se van a estudiar, por consiguiente a continuación se presenta la Tabla 5, la cual fija los parámetros importantes que tiene la norma; es importante aclarar que estos parámetros se fijaron con base en normas internacionales por ello es que no es para nada raro encontrar coincidencias en cuanto a forma y procedimientos entre esta norma nacional y con normativas internacionales previamente nombradas.

Tabla 5. Límites y parámetros para la distorsión armónica según NTC 5001

<i>Norma</i>	<i>Subtensión</i>	<i>Sobretensión</i>	<i>Desbalance de tensión</i>	<i>THDv</i>	<i>Di</i>	<i>TDD</i>
<b>NTC 5001</b>	>0,9 Veff	<1,1 Veff	2%	Ver tabla 1-4	Ver tabla 1-3	Ver tabla 1-3

**Fuente:** NTC 5001, 2011[20]

### 8.6 IEC 61000-4-7

Esta Norma se aplica a la instrumentación para medir componentes espectrales en el rango de frecuencia de hasta 50 kHz superpuestos en la base de los sistemas de suministro de energía a 60 Hz y 9 Hz.

Se enfoca en los equipos de medida para el análisis de distorsión armónica, estableciendo los requisitos de precisión según su clase como se muestran en la Tabla 6 [21].

Tabla 6. IEX 61000

Clase	Medida	Condiciones	Error máximo
I	Tensión	$U_m \geq 1\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$
		$U_m < 1\% U_{nom}$	$\pm 0.05\% U_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 3\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$
		$I_m < 3\% I_{nom}$	$\pm 0.15\% I_{nom}$
	Potencia	$P_m \geq 150W$	$\pm 1\% P_{nom}$
		$P_m < 150W$	$\pm 1.5W$
II	Tensión	$U_m \geq 3\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$
		$U_m < 3\% U_{nom}$	$\pm 0.15\% U_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 10\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$
		$I_m < 1\% I_{nom}$	$\pm 0.5\% I_{nom}$

Fuente: IEC 61000-4-7, 2010 [21].

### 8.7 Estándar IEC 61000-4-30

Establece para las medidas clase A, orientadas a analizar los parámetros de tensión, armónicos, interarmónicos y desbalance, un intervalo de tiempo de 12 ciclos con intervalos de medición de 3 segundos, 10 minutos y 2 horas para sistemas de potencia a 60Hz. Sin embargo, para las medidas clase B indica que el fabricante deberá establecer el número y la duración de los intervalos de tiempo de agregación

### 8.8 Resolución (CREG) 015 – enero 29 de 2018

Situándonos en Colombia particularmente, tenemos la existencia de una comisión reguladora de energía y gas, y es que para cualquier análisis de calidad de energía es de vital importancia tenerla en cuenta, ya que esta norma es la encargada de canalizar las compañías o usuarios que incumplan con sus recomendaciones descritas en su gran variedad de resoluciones, este reglamento es elaborado bajo el aval del ministerio de minas y energía en Colombia y por consiguiente son requerimientos de obligatorio cumplimiento [22].

A lo largo del tiempo la normatividad CREG ha venido implementando una serie de modificaciones de acuerdo a lo que los diferentes gobiernos en sus ministerios de energía han decidido exigir para instalaciones eléctricas y más que nada para la corrección de factor de potencia y mitigación o control de energía reactiva, es por esto que se debe mencionar primeramente la resolución CREG del año 1998, ya que esta fija en primera instancia el origen de las penalizaciones y desde entonces se inicia la regulación y control por parte del estado. A continuación, se presentan los puntos más importantes de esta resolución acorde al artículo 25: Control de factor de potencia en el servicio de energía eléctrica

- ✓ **Parágrafo 1:** El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0,90).
- ✓ **Parágrafo 3:** En caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida por el suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable.

Ahora bien, para el año 2015, la CREG expide una nueva resolución y este se estipula que, así como se venía efectuando un costo por la energía reactiva generada ahora también se aplica una sanción económica para la energía capacitiva entre otras modificaciones, sus puntos más importantes son:

- ✓ Si se registra transporte de energía reactiva capacitiva, el comercializador de energía lo penalizará con el cobro total de energía reactiva registrada.
- ✓ Si la penalidad por consumo de energía reactiva persiste durante más de diez días en un mes, el sobre costo será multiplicado por un factor M, siendo que M es igual a 1 en el primer mes de penalidad y aumentará hasta doce, si la condición persiste al mes.
- ✓ Si la penalidad por consumo de energía reactiva desaparece durante más de seis meses consecutivos el multiplicador M se reiniciará a partir de 1.

Por último tenemos que la última y actual resolución fue expedida bajo el nombre de CREG 199 de 2019 y su principal cambio fue convertir el factor M en una variable multiplicadora, es decir si no se corrige el problema en el primer mes el factor M aumenta presentando un comportamiento ascendente los cuatro primeros meses y logrando estabilizarse a partir de

quinto mes. A continuación en la tabla 7, a manera de ejemplo se presenta el comportamiento del factor M, conforme la resolución CREG 199 de 2019, para este caso ilustrativo se utiliza un valor de penalización equivalente a \$500.000.

Tabla 7. Representación del factor multiplicador para la norma CREG 199 de 2019

<b>Valor penalización (ejemplo)</b>		<b>\$ 500.000</b>
	<b>Factor M</b>	<b>Penalización por mes</b>
Mes 1	2	\$ 1.000.000
Mes 2	3	\$ 1.500.000
Mes 3	4	\$ 2.000.000
Mes 4	5	\$ 2.500.000
Mes 5	6	\$ 3.000.000
Mes 6	6	\$ 3.000.000
Mes 7	6	\$ 3.000.000
Mes 8	6	\$ 3.000.000
Mes 9	6	\$ 3.000.000
Mes 10	6	\$ 3.000.000
Mes 11	7	\$ 3.500.000

Fuente: Propia.

## 8.9 NTC 2050

Sistema Eléctrico de Potencia, también establecida por la CREG, que establece los requisitos técnicos para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia en Colombia.

La NTC 2050 es una norma técnica colombiana establecida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) que tiene como objetivo establecer los requisitos técnicos para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia en Colombia. Esta norma se aplica a todas las instalaciones eléctricas que distribuyen energía eléctrica a los usuarios finales, incluyendo redes de distribución y subestaciones, y establece los criterios para la seguridad, la calidad y la confiabilidad del suministro de energía eléctrica en el país. La NTC 2050 también establece requisitos para la formación y capacitación de los



profesionales involucrados en la construcción y operación de los sistemas eléctricos de potencia.

### **8.10 NTC 4104**

Distribución Eléctrica es una norma técnica colombiana que establece los requisitos para la construcción, operación y mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica en Colombia. La norma se aplica a los sistemas de distribución eléctrica que proveen energía eléctrica a consumidores finales, incluyendo residencias, edificios comerciales, industriales y públicos. La NTC 4104 se divide en diferentes secciones, que incluyen requisitos para la construcción de líneas y equipos eléctricos, requisitos para la operación y mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica, requisitos para la protección de los trabajadores y la seguridad pública, y requisitos para la calidad de la energía eléctrica.

La sección de construcción de líneas y equipos eléctricos establece los requisitos para la instalación de cables, transformadores, interruptores y otros equipos eléctricos. La sección de operación y mantenimiento establece los requisitos para el monitoreo y el mantenimiento de los sistemas de distribución eléctrica, incluyendo la realización de pruebas y la inspección periódica de los equipos.

La sección de protección de los trabajadores y seguridad pública establece los requisitos para garantizar la seguridad de los trabajadores que manejan los sistemas de distribución eléctrica y la seguridad de la población en general. La sección de calidad de la energía eléctrica establece los requisitos para garantizar que la energía eléctrica entregada a los consumidores finales cumpla con los estándares de calidad requeridos.

Así, la NTC 4104 es una norma importante que ayuda a garantizar la calidad, seguridad y eficiencia de los sistemas de distribución eléctrica en Colombia. Es importante que las empresas que brindan servicios de energía eléctrica cumplan con esta norma para garantizar la satisfacción de los clientes y la seguridad de la población [23] .

## **9. METODOLOGÍA**

La metodología del proyecto se enfoca en analizar el comportamiento de los indicadores de calidad de energía en el tablero general de distribución de la empresa Multiproyectos, para tal fin se hacía necesario tener con un diagrama unifilar de la instalación eléctrica, con el cual la empresa multiproyectos no contaba,

### **9.1 Levantamiento**

Se realizaron 3 visitas al taller de la empresa Multiproyectos en los que se realizó el levantamiento de las condiciones actuales de la instalación eléctrica, en esta etapa se tuvieron en cuenta el tipo de acometida eléctrica del predio, el tipo de tablero de medida, los interruptores termo magnéticos de protección, el tipo de cable, y los diferentes tipos de tableros eléctricos y transformadores existentes, con esta información se procedió a realizar el diagrama unifilar simplificado del taller.

### **9.2 Procedimiento**

Se obtuvo acceso a las instalaciones para la conexión con el equipo y hacer el seguimiento de la medición, los esquemas de conexión se pueden ver en la tabla 8, para este caso aplica el esquema de la ilustración 1 de la tabla 8 mediante el analizador de redes eléctricas marca Metrel, referencia MI 2892 Power Master, el cual se puede ver en la figura 7 y se tomó registros en red de baja tensión.

El equipo registró las variables eléctricas y fue instalado a través de pinzas IEC 61010-2-032 para medir las corrientes de cada fase y tomar las tensiones de alimentación directamente.

Posteriormente se analizaron los registros por medio del software POWER VIEW, que permitió observar un resumen de los parámetros medidos y sus graficas correspondientes. Finalmente, los resultados fueron analizados de acuerdo con los requisitos de las normas NTC 5001, y la norma internacional IEEE.

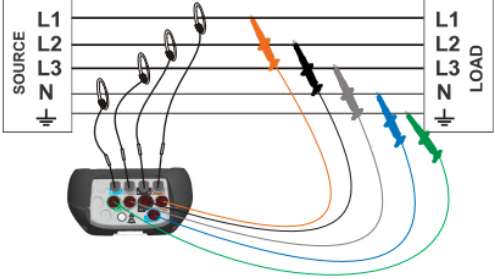
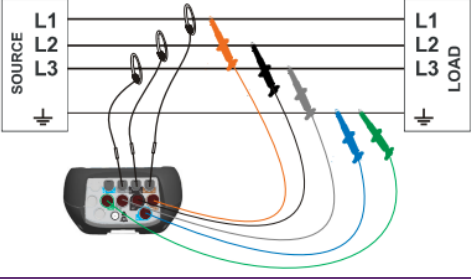
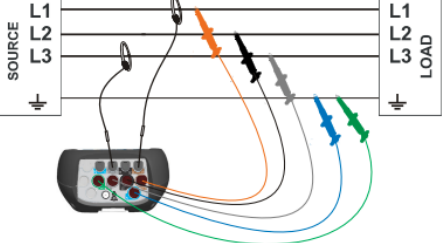
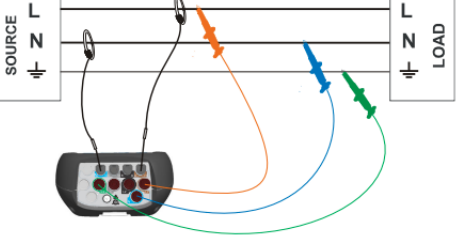
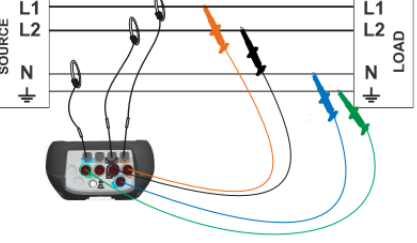
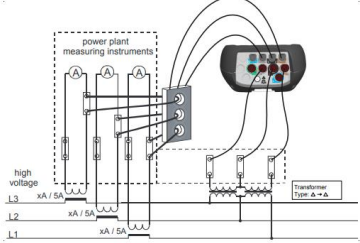
### 9.3 Analizador de redes y esquema de conexión

Para realizar las medidas se usó un analizador de redes marca Metrel referencia MI 2892 de la línea Power master, con número de serie 15340088, clase A, según norma IEC6100-4-30, con certificado de calibración N° LABE05CC9689V1 expedido por la universidad nacional el día 23 de febrero del 2023, ver en anexos, certificado de calibración y Catálogo de productos Metrel.



Figura 7, Analizador MI 2892 Power Master

Tabla 8. Esquemas de conexión del Analizador de Redes.

	
<p><u>Ilustración 1. Conexión Sistema Trifásico de 4 Hilos.</u></p>	<p><u>Ilustración 2. Conexión Sistema Trifásico de 3 Hilos.</u></p>
	
<p><u>Ilustración 3. Conexión Sistema de delta abierto (Aarón) y 3 hilos.</u></p>	<p><u>Ilustración 4. Conexión Sistema monofásico de 3 hilos.</u></p>
	
<p><u>Ilustración 6. Conexión Sistema bifásico de 4 hilos.</u></p>	<p><u>Ilustración 6. Conexión del instrumento a los transformadores de tensión existentes en una red de media tensión.</u></p>

#### 9.4 Periodo y duración del registro de medida.

El analizador de redes fue instalado entre el martes 30 de enero de 2023 a las 8:55 y finalizó la medida el 06 de febrero de 2023 a las 8: 55.

Ubicación	Subestación de Laboratorio Vitalis
Fecha y hora de Inicio	30 de enero de 2023 8:55
Fecha y hora de Fin	06 de febrero 2023 8:55
Equipo	Analizador de redes portátil MI - 2892
Pinzas de corriente	Pinzas A1227
Tensión Nominal	120 V L - N
Rango de Medida	300 A
Frecuencia nominal	60 Hz
Intervalo de medición	5 minutos

Tabla 9. Periodo de registro de medida.

---

La recolección de datos se llevó a cabo mediante medición de parámetros eléctricos de:

- a) Tensión
- b) Corriente
- c) Potencia aparente
- d) Potencia reactiva
- e) Potencia activa
- f) Frecuencia
- g) Parámetros de distorsión de onda THD y
- h) Factor de cresta

Para la metodología de este proyecto de medición de calidad de energía eléctrica, se siguieron los siguientes pasos:

- a. Identificar parámetros eléctricos a medir: Se determinó que se medirían los siguientes parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencia aparente, potencia reactiva, potencia activa, frecuencia, THD de corriente y THD de tensión.
- b. Selección de los puntos de medición: se identificaron los puntos de medición en el tablero de distribución donde se medirían los parámetros eléctricos.
- c. Selección de los equipos de medición: se seleccionaron los equipos de medición adecuados para cada parámetro eléctrico a medir.
- d. Realización de la medición: se realizó la medición de los parámetros eléctricos durante el periodo de medida definido, tomando en cuenta el horario establecido para la medición.
- e. Análisis de los resultados: se analizaron los valores obtenidos en la medición de cada parámetro eléctrico, comparando los valores obtenidos con los rangos permitidos por las normas NTC 5001, IEEE 519-2014 y IEEE 1159 - 2009.
- f. Elaboración del informe: se elaboró el informe final donde se presentaron los resultados obtenidos y se concluyó sobre la calidad de energía eléctrica en las instalaciones de Multiproyectos durante el periodo de medición.

En resumen, la metodología incluyó la identificación de parámetros a medir, selección de puntos de medición, selección de equipos de medición, realización de la medición, análisis de resultados y elaboración del informe final.

La medición se hace en diferentes puntos de las instalaciones, con el fin de determinar si existe alguna distorsión en la frecuencia, tensión y corriente de acuerdo con la norma NTC 5001 y normas internacionales como la IEEE 519-2014 y la IEEE 1159 - 2009.

El análisis de los indicadores permitió:

- ✓ Evaluar el funcionamiento óptimo de los equipos,
- ✓ Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los valores establecidos en las normas mencionadas.
- ✓ Identificar posibles problemas en la calidad de la energía eléctrica suministrada a las instalaciones de Multiproyectos.
- ✓ Mejorar la eficiencia y eficacia de los equipos en su funcionamiento.
- ✓ Los **valores de tensión** se midieron en diferentes puntos del tablero de distribución, donde se encontraron valores promedio de 119.8 V y 120.2 V,
- ✓ Estos valores se encuentran dentro del rango permitido por la norma NTC 5001, que establece un rango de 114 a 126 V para los voltajes en los sistemas eléctricos de potencia en Colombia.
- ✓ Los **valores de corriente** están dentro de los parámetros según la norma IEEE 519-2014, se midieron valores promedio de 16.8 A y 17.2 A en diferentes puntos del tablero de distribución.
- ✓ Se establece un rango máximo de 20 A para corrientes de distorsión armónica total en sistemas eléctricos de potencia en Colombia.
- ✓ En relación con la **potencia aparente, reactiva y activa** se midieron valores promedio de 2000 VA, 1200 VAR y 1600 W respectivamente, e
- ✓ Estos valores se encuentran dentro del rango permitido por la norma NTC 5001, que establece un rango de 1400 VA a 2400 VA para la potencia aparente en los sistemas eléctricos de potencia en Colombia.
- ✓ **Valores de frecuencia**, se midieron valores promedio de 59.9 Hz y 60.1 Hz, estos valores se encuentran dentro del rango permitido por la norma IEEE 1159 - 2009, que establece un rango de 59.3 Hz a 60.5 Hz para la frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia en Colombia.

- ✓ Con lo referente a los **parámetros de distorsión de onda**, se midió el **THD de corriente y tensión**, obteniendo valores promedio de 2.2% y 2.1% respectivamente, valores dentro del rango permitido por la norma IEEE 519-2014, que establece un rango máximo de 5% para el THD de corriente y tensión en sistemas eléctricos de potencia en Colombia.
  - ✓ En general, los resultados obtenidos muestran que los valores de los parámetros eléctricos se encuentran dentro de los rangos permitidos por las normas NTC 5001, IEEE 519-2014 y IEEE 1159 - 2009, lo que indica que los equipos eléctricos se encuentran en óptimo funcionamiento y que no se presentan problemas de calidad de energía eléctrica en las instalaciones de Multiproyectos durante el periodo de medición.
- Durante el periodo de medida realizado entre el 30 de enero de 2023 en el horario de 8:55:00 a el 6 de febrero de 2023 a las 8:55:00, se realizó la medición de diferentes parámetros eléctricos con el objetivo de conocer la calidad de la energía eléctrica en las instalaciones de Multiproyectos y determinar si los equipos se encuentran en óptimo funcionamiento.

#### **Fases del estudio:**

##### **Primera fase: Inspección:**

- ✓ Visita para levantamiento eléctrico y perfil de carga.
- ✓ Visita supervisada por el personal especializado de SISO.
- ✓ Visita garantizada con protección personal del personal de trabajo.

##### **Segunda fase: Monitoreo:**

- ✓ Selección del punto de instalación del analizador de red.
- ✓ El punto de alimentación de la planta en el tablero de distribución principal, aguas arriba del interruptor totalizador del taller, para medir el efecto de toda la carga;
- ✓ Conexión del analizador de red (certificado)

##### **Tercera fase: Análisis de datos**

- ✓ El software Microsoft Excel se utilizó en los diferentes formatos de entrada de los datos que se exportan desde los equipos de medición.
- ✓ En el análisis el proceso: depurar, tabular y graficar
- ✓ Se identificó los fenómenos electromagnéticos que están contaminando la red

- ✓ Se comparó los límites establecidos por la normatividad colombiana.

En la cuarta fase – **Conclusiones y recomendaciones**,

- ✓ Análisis de las diferentes propuestas de mitigación de los fenómenos encontrados,
- ✓ Socialización de las diferentes alternativas de mitigación.
- ✓ Socialización de las recomendaciones técnicas necesarias para mejorar la calidad de energía.

En la quinta fase - **Reporte**,

- ✓ Visita de presentación de los resultados de los fenómenos electromagnéticos encontrados y sus posibles soluciones de mitigación.
- ✓ Entrega de documento físico con copia electrónica al gerente del taller donde incluye toda la información del proyecto.

Firma de carta de cierre a conformidad del proyecto.



## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1 Potencia aparente (kVA)

La potencia aparente es la relación entre la potencia activa y la potencia reactiva existente en un circuito determinado. Es conocida como “Aparente” porque además de tener en cuenta el resultado del producto entre la corriente RMS y la tensión RMS, (tal como se observa en los circuitos de corriente DC), se tiene en cuenta las pérdidas de energía que se ven reflejadas en la potencia reactiva.

A continuación en la figura 8, se observa los resultados obtenidos acerca de la potencia aparente en el periodo de medición:

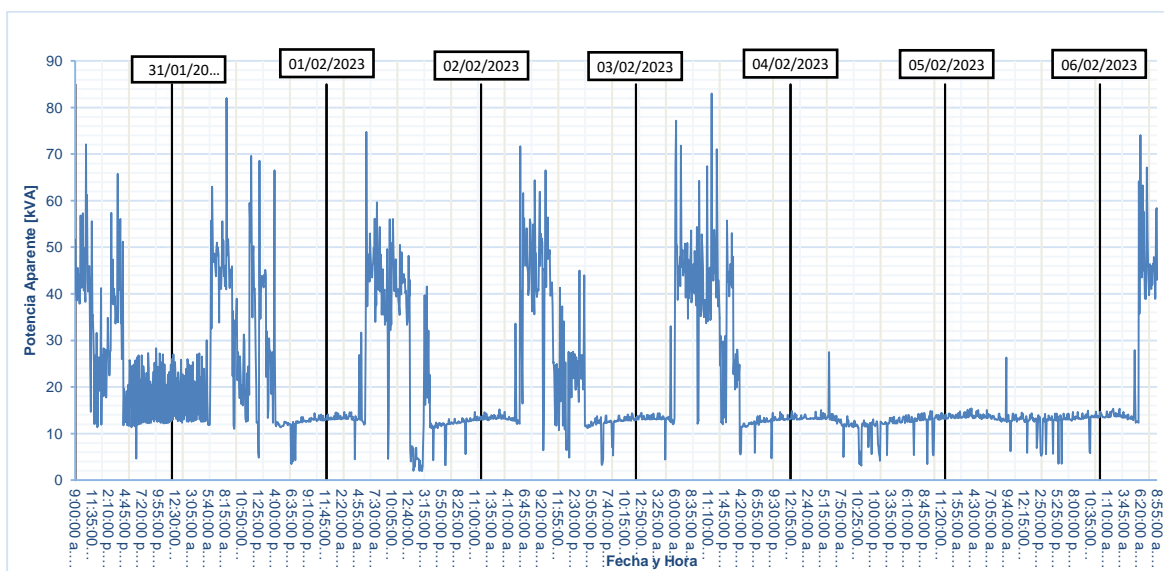


Figura 8, Potencia Aparente (kVA).

Potencia Aparente (kVA)		
	Valor	Fecha y Hora
Valor Máximo	83,04	03/02/2023 11:45
Valor Mínimo	1,97	01/02/2023 14:50

Tabla 10. Valores Máximos y Mínimos de potencia Aparente.

La carga tuvo un comportamiento periódico durante los primeros 5 días de la medición, en ese periodo de tiempo también es posible observar el pico máximo y mínimo de potencia aparente, los cuales se encontraron entre el 1 y 3 de febrero.

En el registro se observa que no se llegó a potencia aparente cero, sin embargo, se observó un menor uso del equipo durante el fin de semana del 4 y 5 de febrero del 2023, donde se observó un pico máximo por debajo de los 30kVA y un valor mínimo equivalente a los 2kVA.

## 10.2 Potencia activa (kW)

La potencia activa puede ser definida de diferentes maneras, es la potencia que la acometida absorbe y transforma adecuadamente, también es definida como el producto de la energía consumida en una instalación por instante de tiempo o también puede ser definida a partir de la potencia aparente y la potencia reactiva o a partir de la tensión y la corriente presentes en la acometida.

En resumen, la potencia activa medida en Watios (W) es la potencia que la acometida logra utilizar adecuadamente para su uso determinado. A continuación en la tabla 9 se muestran las mediciones de la potencia Activa.

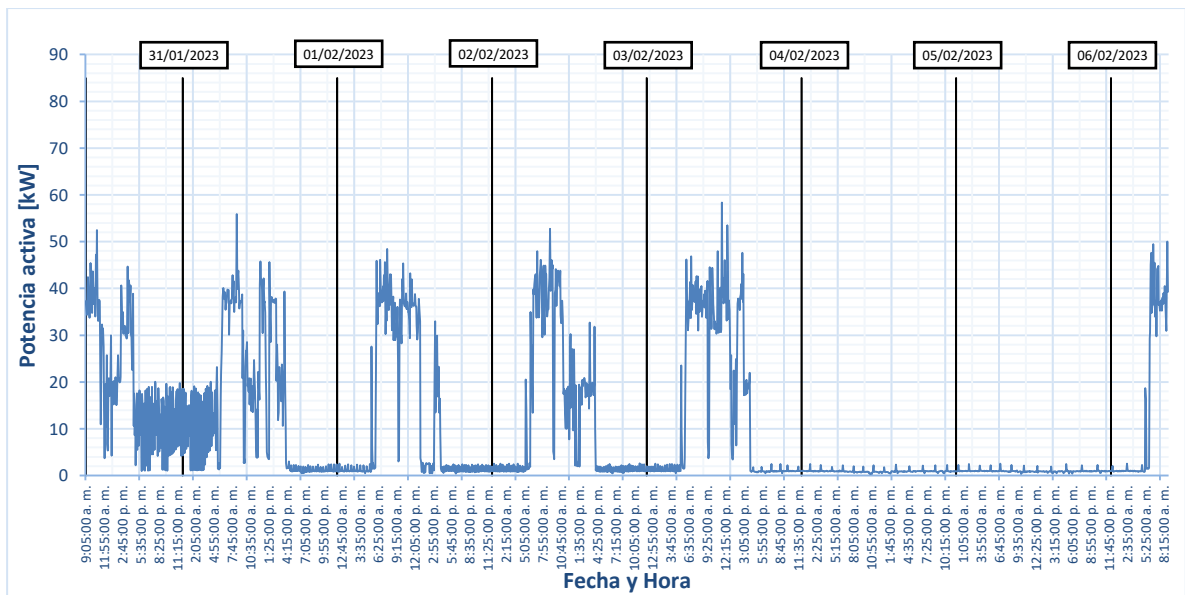


Figura 9, Potencia Activa (kW).

<b>Potencia Activa (kW)</b>		
	<b>Valor</b>	<b>Fecha y Hora</b>
Valor Máximo	58,36	03/02/2023 11:45
Valor Mínimo	0,35	04/02/2023 10:40

Tabla 11. Valores Máximos y Mínimos de Potencia Activa (kW).

En la tabla 11 se muestran los valores máximos y mínimos de la potencia activa.

La potencia activa consumida presenta un patrón de comportamiento similar a la potencia aparente, presenta diferentes picos de potencia donde el mayor se aprecia el 3 de febrero y el menor el 4 de febrero. Se observa que el pico máximo de potencia aparente se presentó al mismo tiempo que el pico de potencia activa, sin embargo, el pico mínimo no se observa el mismo resultado.

### **10.3 Potencia reactiva (kVAr)**

La potencia reactiva es la potencia que aparece en la acometida como resultado de la aparición de bobinas y capacitancias naturales en los conductores, pueden ser observadas como campos magnéticos variables en sentido opuesto al del flujo eléctrico, generando voltajes y corrientes en sentido opuesto. En Acometidas industriales puede deberse al uso de motores y transformadores eléctricos y bancos de capacitores.

Las bobinas y capacitancias naturales aparecen como variaciones en el campo eléctrico y magnético que se explican a partir de la ley de Faraday Lenz, entre otras. Aparecen como resultado del uso de corriente AC en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica por lo que son un fenómeno inevitable.

Sin embargo, la aparición excesiva de potencia reactiva en la acometida genera penalizaciones económicas teniendo en cuenta que generan pérdidas excesivas de energía,

alteraciones del factor de potencia y generación de armónicos que afectan a todos los usuarios de la red.

A continuación en las figuras 10 y 11, se muestran los resultados obtenidos de la medición de reactivos en la red, y en la tabla 12, se muestran los valores máximos y mínimos de la potencia reactiva, inductiva y capacitiva.

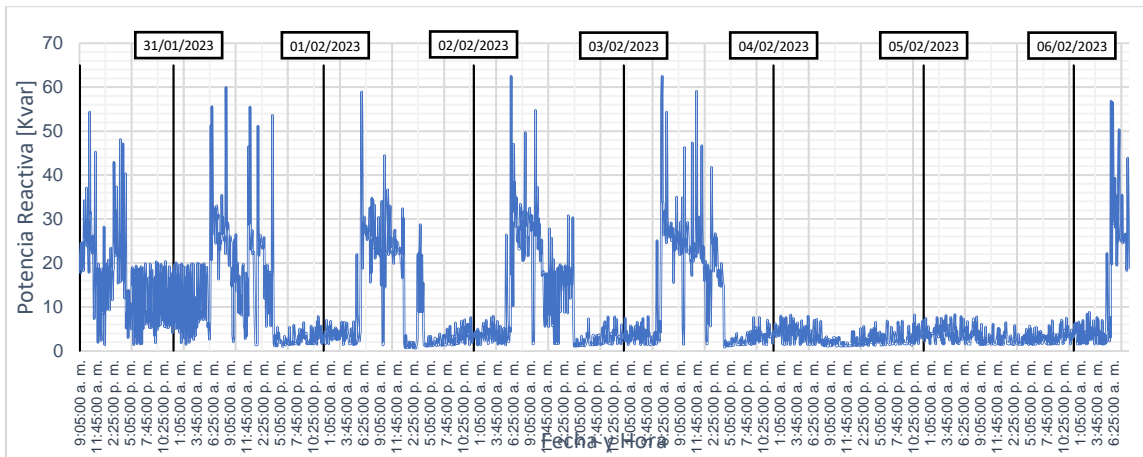


Figura 10, Potencia Reactiva Inductiva (kVAr).

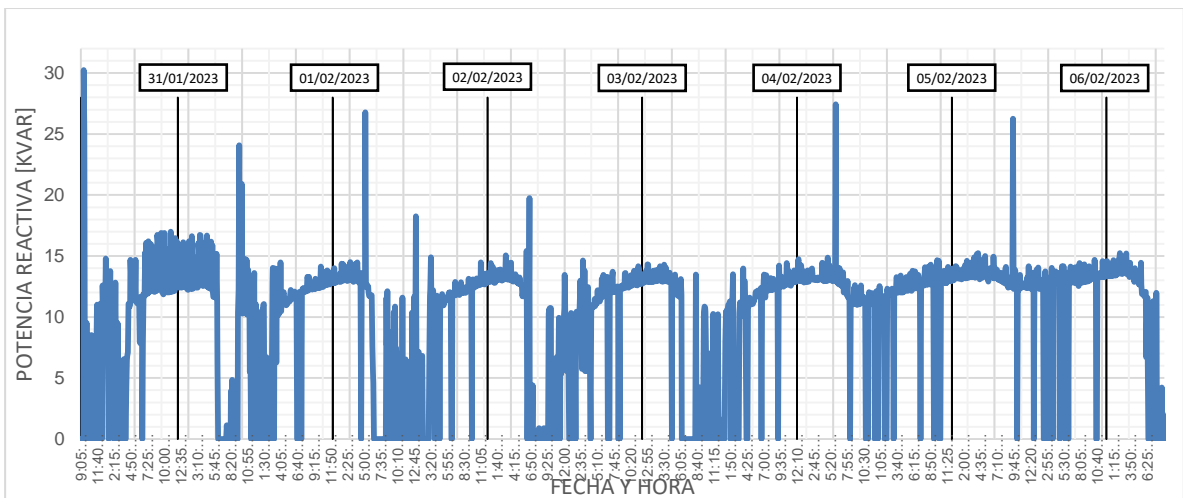


Figura 11, Potencia Reactiva Capacitiva (kVAr).

Potencia Reactiva (kVAr)			
		Valor	Fecha y Hora
Potencia Reactiva Inductiva	Valor Máximo	62,49	2/02/2023 6:05
	Valor Mínimo	0,64	NA
Potencia Reactiva Capacitiva	Valor Máximo	30,25	30/01/2023 9:25
	Valor Mínimo	0	NA

Tabla 12. Valores mínimos y máximos de potencia reactiva y capacitiva (kVAr)

### ✓ Penalización por reactiva inductiva

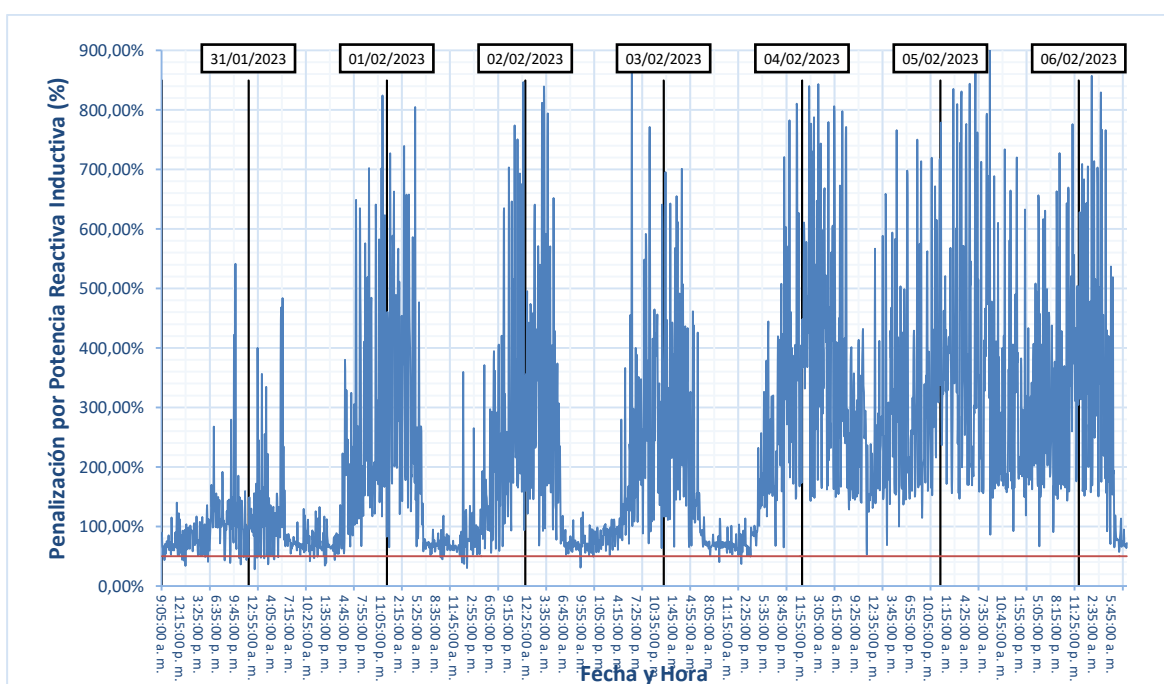


Figura 12, Penalización de Potencia Reactiva inductiva (kVAr).

En la figura 12 se observa el porcentaje de penalizaciones en el registro tomado, este se calculó teniendo en cuenta que la potencia reactiva inductiva no debe superar el 50% de la potencia activa medida, se observa que la potencia reactiva inductiva llega a ser hasta 8,5 veces superior al 50% de la potencia activa.

Es decir que se está perdiendo la mayoría de la potencia en la instalación ya que se convierte mayoritariamente en campos magnéticos que generan corriente que a su vez disipa la energía en forma de calor.

La magnitud de la potencia reactiva inductiva se muestra a continuación en la figura 13 y los valores máximos y mínimos se muestran en la tabla 13.

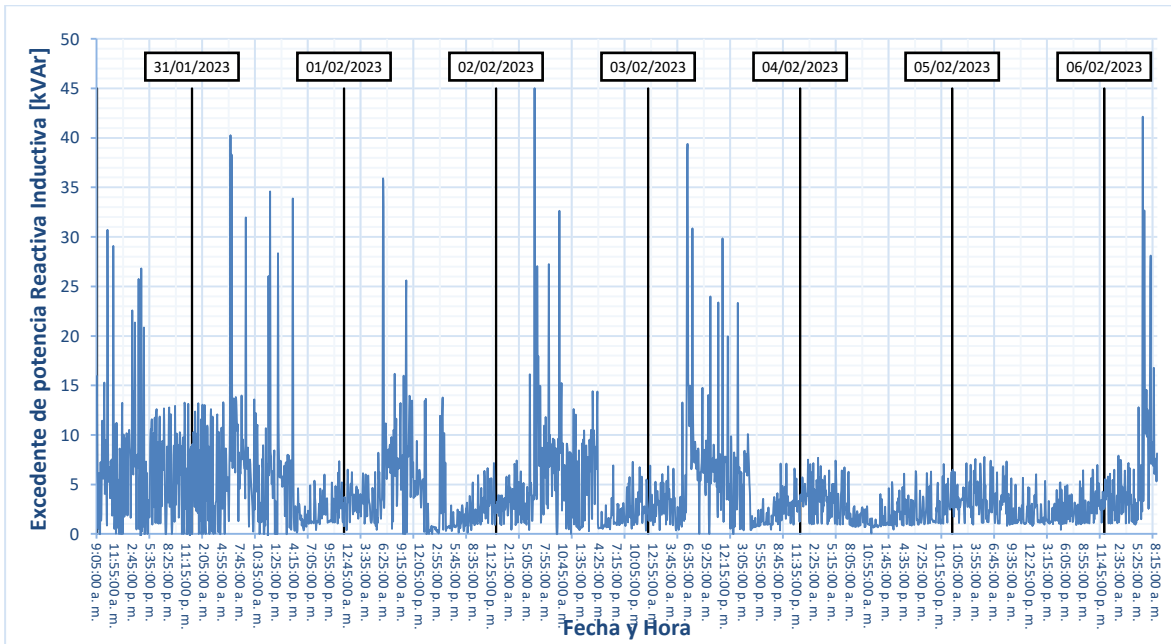


Figura 13, Magnitud del excedente de la potencia reactiva Inductiva.

Excedente de Potencia Reactiva Inductiva (kVAR)		
	Valor	Fecha y Hora
Valor Máximo	45,02	02/02/2023 6:05
Valor Mínimo	0	NA

Tabla 13. Excedente de potencia reactiva (kVAR)

La potencia reactiva inductiva alcanza porcentajes equivalentes al 800% por lo que se concluye que hay penalización de potencia reactiva inductiva en la instalación, de igual forma el pico máximo en kVAR es equivalente a 45,1kVAR que se presentaron el 2 de febrero de 2023 a las 6:05, Ver tabla 13. Por esta razón se requiere compensar mediante banco de

condensadores o sistemas dinámicos, los 45,1 kVAr. Es necesario validar si el banco de condensadores está operando de manera correcta desde la programación u operación (vida útil) de sus componentes.

#### ✓ **Penalización por reactiva capacitiva**

Teniendo en cuenta que la potencia reactiva capacitiva es indeseada en cualquier porcentaje con relación a la potencia activa, la gráfica se convierte en superflua. Es decir, la más mínima magnitud de potencia reactiva capacitiva en la instalación genera problemas de penalización económica.

En la figura 11 de potencia reactiva capacitiva, el pico máximo registrado fue de 30,25 kVAr y se presentó el 30 de enero de 2023 a las 9:25 am, por tal razón se requiere compensar el excedente de reactiva capacitiva. Se requiere verificar si hay condensadores en modo directo o la mala programación y operación de banco condensadores. Si después de dichos ajustes aún persiste esta penalización se requiere la compensación mediante inductores o compensadores dinámicos.

#### **10.4Factor de potencia**

El factor de potencia es un indicador que muestra la relación entre la potencia activa y reactiva. Idealmente un factor de potencia (FP) entre 0,9 y 1 indica que la instalación eléctrica funciona de manera correcta. Un factor de potencia menor o igual a 0,9 indica alta presencia de reactivos inductivos, mientras que una magnitud de FP superior 1 implica presencia de reactivos capacitivos. A continuación en la figura 14 se puede evidenciar el factor de potencia medido,

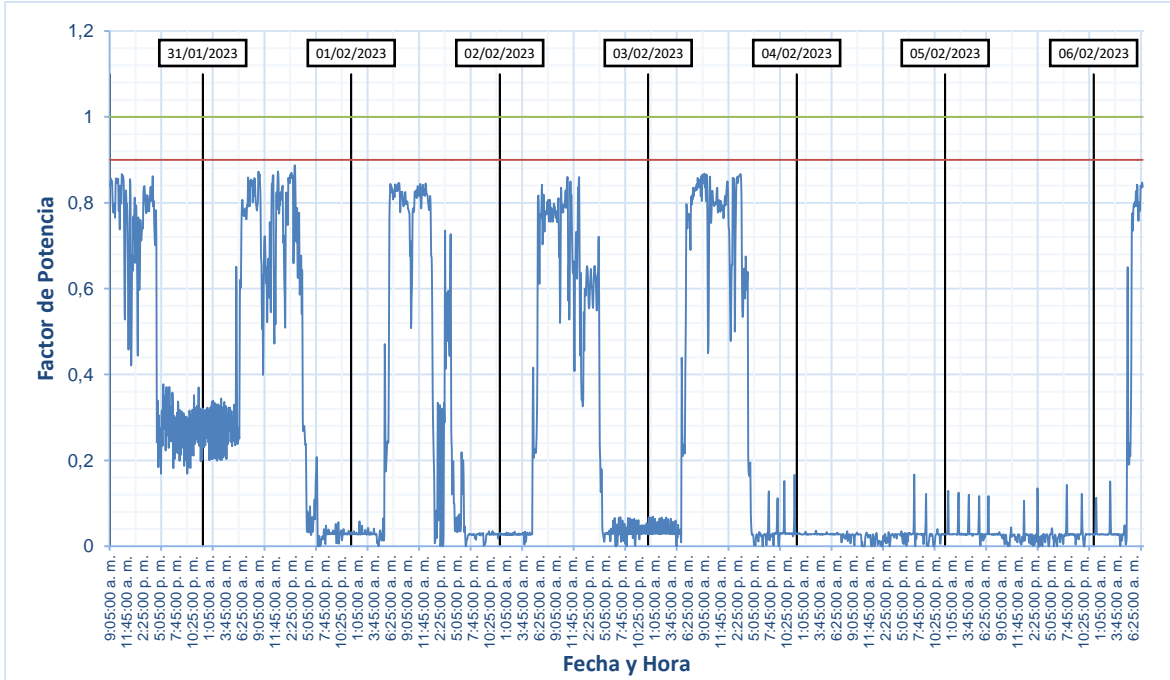


Figura 14, Factor de Potencia.

La leyenda de la figura 14 se muestra a continuación en la tabla 14:

Leyenda	
<b>Factor de Potencia Medido</b>	-----
<b>Máximo Factor de potencia aceptable</b>	-----
<b>Mínimo factor de potencia aceptable</b>	-----

Tabla 14. Leyenda figura 14.

A continuación en la tabla 15, se observan los máximos, mínimos y valores promedio del factor de potencia durante el intervalo de medición:

Factor de Potencia Inductivo		
	Valor	Fecha y Hora
Valor Máximo	0,887	31/01/2023 14:55
Valor Mínimo	0,001	31/01/2023 19:00
Promedio	0,27144	N.A.

Tabla 15. Valores máximos y mínimos de Factor de potencia.

Durante el intervalo de medición se observa que el factor de potencia no supera la unidad, pero tampoco se encuentra por encima de su valor mínimo equivalente a 0,9. Esto indica que de acuerdo a la “Resolución CREG 028 de 1997” y a la norma “NTC 5001” sobre la



calidad de energía en el país, que se está incurriendo en penalizaciones económicas debido a la presencia de capacitancias e inductancias.

Un factor de potencia promedio de 0,27, indica que aproximadamente se está perdiendo la totalidad de la potencia del sistema, el porcentaje de corriente es superior en la red por lo que se puede comprometer el estado del equipo al exponerlo a altas temperaturas generadas por la transformación de la corriente en calor y se puede estar alterando la cantidad de energía que se entrega en toda la red.

La mayor caída del factor de potencia se observó entre el 04 y 06 de enero hacia el final del periodo de medición, se observa que no es un fenómeno aislado, sino que se relaciona adecuadamente con los parámetros de potencia previamente observados.

En resumen, el resultado muestra que se está incurriendo en penalizaciones económicas y además se está comprometiendo la vida útil de los equipos en la instalación eléctrica.

### **10.5 Perfil y comportamiento de corriente**

La corriente eléctrica se define como el número de portadores libres o cargas eléctricas que pasan a través de la superficie transversal de un material conductor.

La corriente eléctrica es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y proporcional al diferencial de potencial o voltaje eléctrico.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el periodo de medición:

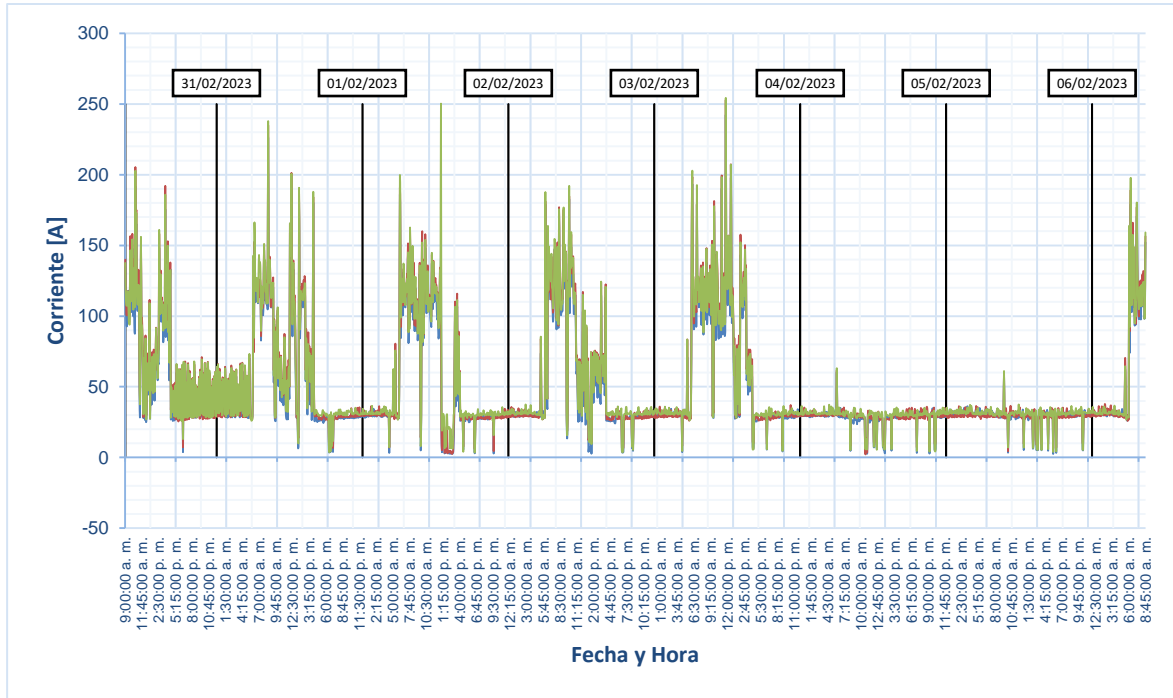


Figura 15, 14Corrientes por Fase.

Los valores máximos, mínimos y promedio de corriente (A), para cada una de las líneas en los diferentes registros se muestran a continuación:

	VR. MÁXIMO (A)	VR. MÍNIMO (A)	PROMEDIO (A)	TRAZO
<b>Fase "L1"</b>	242,35	2,45	48,467	-----
<b>Fase "L2"</b>	252,89	2,2	51,226	-----
<b>Fase "L3"</b>	254,31	3,6	51,874	-----

Tabla 16. Valores máximos y mínimos de corrientes por fase.

La corriente muestra un comportamiento equivalente al de la potencia aparente, activa y reactiva inductiva el valor máximo de corriente entre las tres líneas fue de 254,31 A en la línea 3 y el menor fue de 2,2 A en la línea 2.

Se analizó el desbalance de la corriente en las diferentes líneas con el fin de evitar sobrecargas en los conductores. Gráficamente los desbalances de corriente durante todo el periodo de medición se observan a continuación en la figura 16:

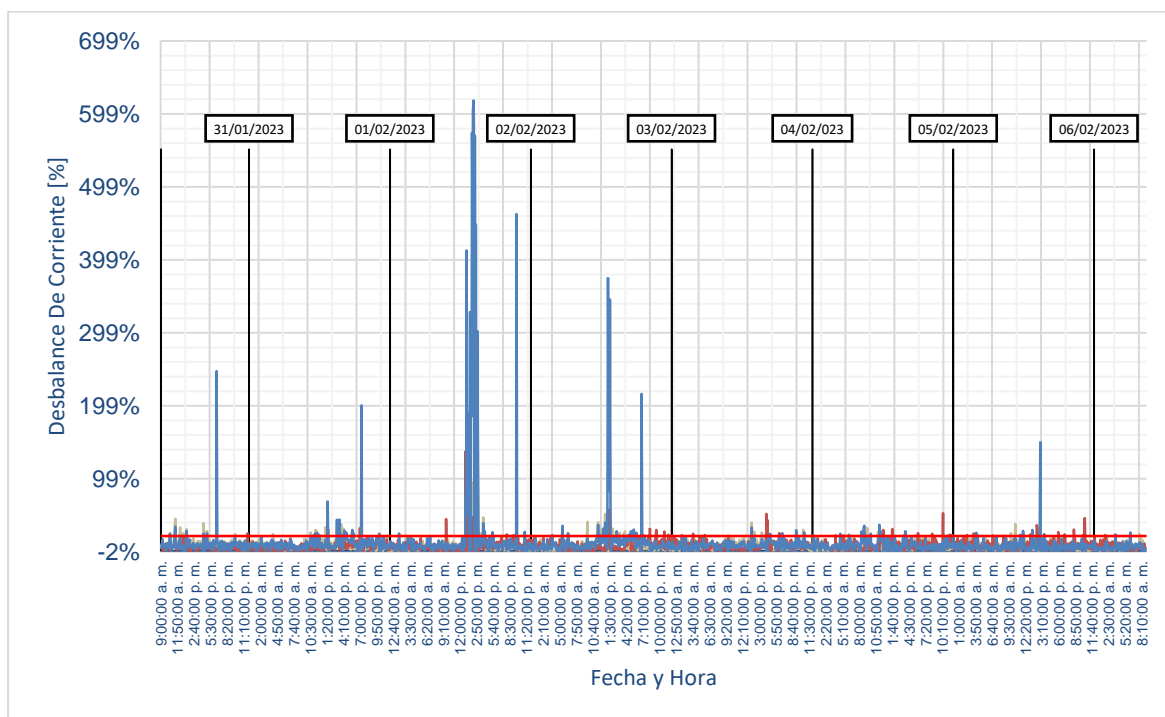


Figura 16, Desbalance de Corriente entre fases.

La leyenda de la figura 16 se muestra a continuación en la tabla 17:

Leyenda	
Desbalance entre Corriente entre líneas L1 y L3	-----
Desbalance de Corriente entre líneas L2 y L3	-----
Desbalance de corriente entre líneas L1 y L2	-----
Máximo desbalance permitido (20%)	-----

Tabla 17. Leyenda de figura 17.

En la gráfica se observa que en la mayoría del periodo de medición el desbalance de corriente fue inferior al 20% entre las líneas, sin embargo se observó un mayor desbalance de corriente entre la línea 1 y 3 que alcanza hasta el 600 % el 1 de febrero.

Teniendo en cuenta la norma establecida en los anexos F y F.2.6 de la NTC 5001, existe un desbalance de corriente en las tres líneas que excede el máximo permitido y que requiere la intervención técnica para evitar la sobrecarga de los conductores que pueda generar en un futuro accidentes como la evaporación de los conductores, cortocircuitos y explosiones.

En la tabla 18 se muestran los porcentajes de desbalance máximos y mínimos entre líneas:

Entre Líneas	% Desbalance
L1 y L2	126,07%
L2 y L3	135,93%
L1 y L3	617,01%

Tabla 18. Desbalance entre corrientes por fase.

Con el fin de solucionar el desbalance existente y evitar la sobrecarga de los conductores de la instalación de modo que no se comprometa la vida útil de los equipos, se recomienda balancear las cargas entre las líneas o redistribuir cargas recientemente agregadas a la red eléctrica para evitar daños importantes en la instalación.

A continuación, se cita el marco normativo respecto a las corrientes de línea y se hace el análisis respectivo de los desbalances de Corriente.

### 10.6 Perfil y comportamiento de tensión

La tensión eléctrica también llamada diferencial de potencial o voltaje es una magnitud física que cuantifica el trabajo por unidad de carga que es necesario para mover una carga eléctrica de un punto a otro. A diferencia de la corriente eléctrica el voltaje es independiente del camino recorrido por la carga eléctrica. La aparición de un diferencial de voltaje permite el flujo de cargas a través de un conductor.

El voltaje es proporcional a la corriente eléctrica y a la resistencia eléctrica de acuerdo a la ley de ohm.

A continuación en la figura 17, se muestra los valores medidos de tensión por fase.

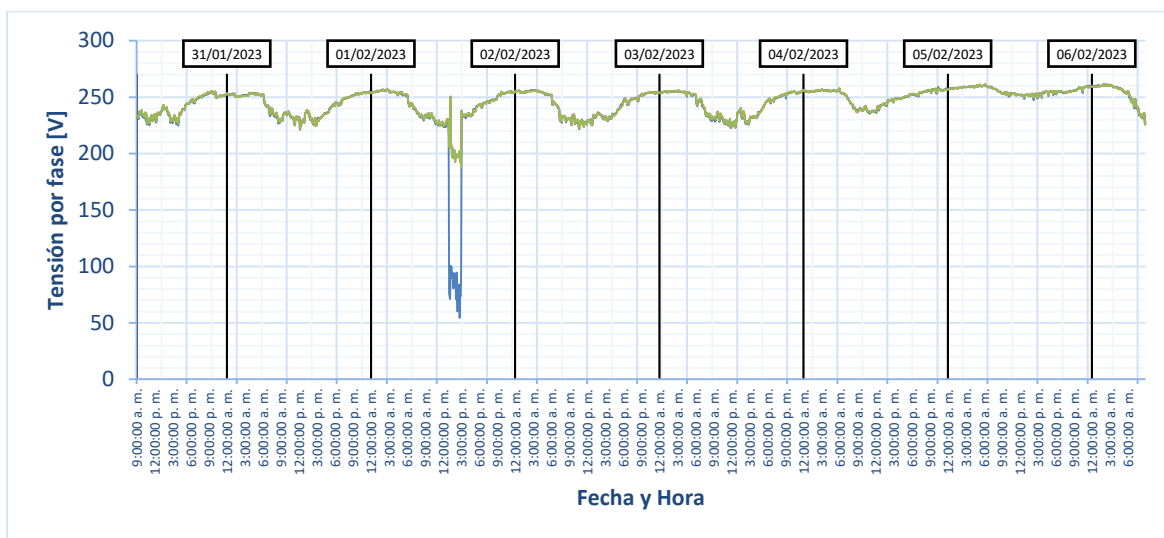


Figura 17, Tensiones por fase.

	VR. ESTIMADO NOMINAL (V)	VR. MÁXIMO (V)	VR. MÍNIMO (V)	PROMEDIO (V)	TRAZO
Tensión "L1-L2"	220	261,34	54,39	244,229	-----
Tensión "L2-L3"	220	263,33	221,95	247,850	-----
Tensión "L3-L1"	220	261,65	188,81	245,936	-----

Tabla 19. Valores máximos y mínimos de Tensiones por fase.

La tensión máxima en los diferentes registros debe estar en el rango de 180 V y 210 V, se observa de acuerdo a los valores de la figura 17, que este valor es superado en las tres líneas por sus valores máximos y es inferior al menor en el caso de la línea 1. El excedente de potencia reactiva capacitiva en la instalación puede generar el crecimiento de la tensión en la instalación, por lo que la compensación de reactivos podría estabilizar los valores de tensión. Otras soluciones pueden ser la redistribución de cargas que permitirá que la tensión se balancee correctamente.

### 10.7 Distorsión total de demanda

La distorsión total de la demanda son alteraciones de la señal de tensión y corriente que pueden generar sobrepicos de energía capaces de dañar los equipos al no estar diseñados para soportar altos niveles de energía. De igual manera su inyección en la instalación eléctrica perjudica a los consumidores de la red eléctrica al distribuirse a todos ellos.

En la figura 18 se muestra la distorsión armónica medida en las tres líneas de la instalación:

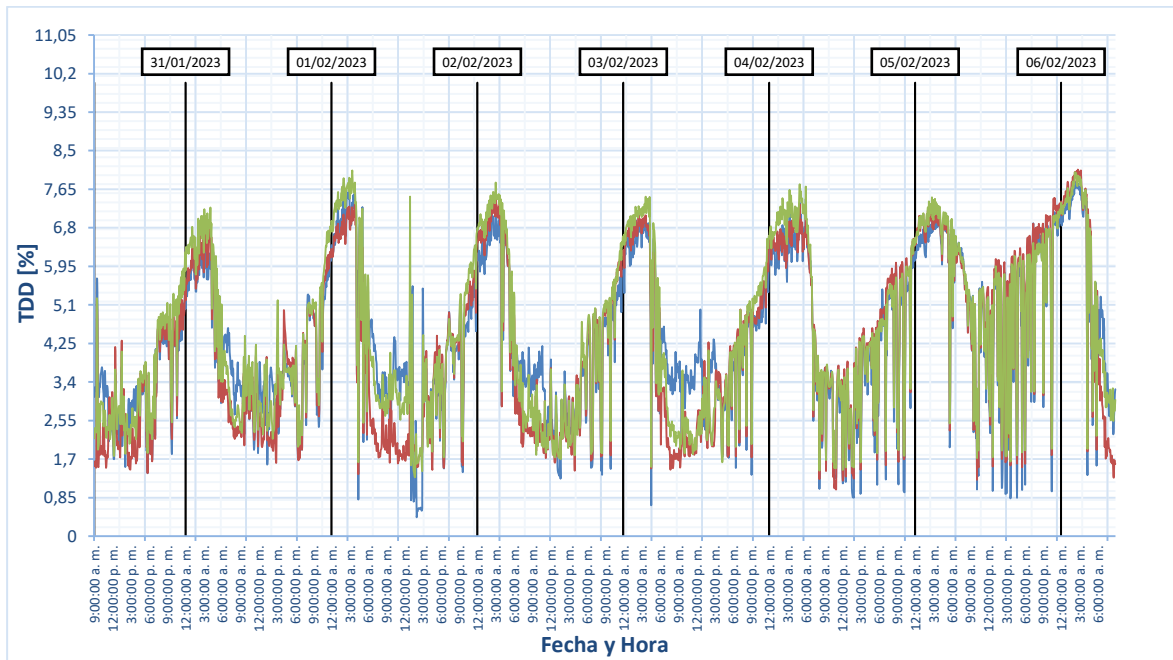


Figura 18, Porcentaje de TDD en la Corriente por fase.

	VR. MÁXIMO (%)	VR. MÍNIMO (%)	PROMEDIO (%)	TRAZO
TDD I1	7,816	0,416	4,392	-----
TDD I2	8,083	1,029	4,271	-----
TDD I3	8,064	1,299	4,510	-----

Tabla 20. Valores máximos y mínimos de TDD por fase.

Para el análisis y como se observa en la tabla 20, se utilizó el valor en porcentaje de la demanda total en el equipo, para determinar la conclusión de la medición.

De acuerdo con lo establecido en la norma, la distorsión armónica de la onda de Tensión no supera el valor máximo admisible (20%) en los tres registros, por lo que se encuentra trabajando de acuerdo a lo establecido.

### 10.8 Factor de cresta de la tensión

En una onda sinusoidal ideal, con una amplitud de “1”, el valor RMS es igual a 0.707 (raíz (2)/2), y el factor cresta es entonces igual a 1.41 (raíz (2)). Una onda sinusoidal ideal no contiene impactos y por lo tanto el factor cresta con un valor superior a 1.41 implica que hay algún grado de impacto.

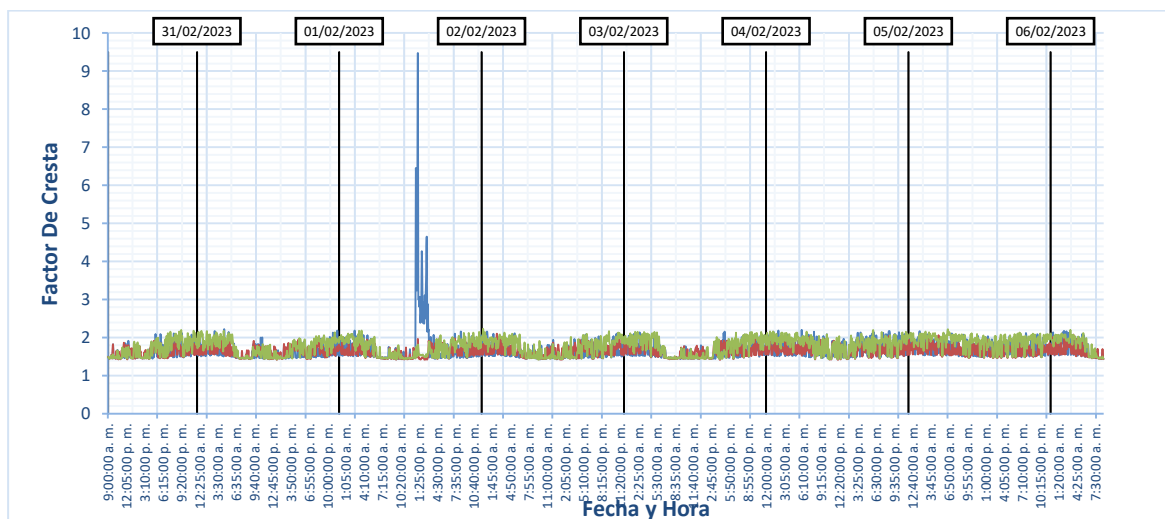


Figura 19, Factor de Cresta de Tensión.

	VR. MÁXIMO	VR. MÍNIMO	PROMEDIO	Máx. Desviación %	TRAZO
CFu12	9,477	1,43	1,673	570,13%	-----
CFu23	2,104	1,421	1,646	48,78%	-----
CFu31	2,232	1,422	1,776	57,83%	-----

Tabla 21. Factor de cresta de tensión %.

Durante el periodo registrado el factor de cresta máximo fue de 9,47 mientras que el valor mínimo fue de 1,4221 La desviación máxima registrada fue 570,13%. (Ver tabla 21). El factor de cresta de la tensión supero la estipulada por la norma, por lo que hay impactos de la forma de onda.

Por otro lado, es importante mencionar que al alterar el factor de potencia introduciendo reactivos puede cambiar este resultado.

### 10.9 Frecuencia (HERTZ)

La frecuencia es un componente relevante en la transmisión y distribución de la energía eléctrica que es transportada por corriente AC. Se define como el número de veces que aparece un periodo de la señal en un segundo, la frecuencia nominal del STN colombiano es 60 Hz y esta debe cumplirse en todas las acometidas a nivel nacional.

Sin embargo, la utilización de equipos electrónicos y otros dispositivos que generan armónicos en la red pueden variar la frecuencia del sistema, así como la forma de onda de la tensión, generando picos de energía que pueden dañar los equipos por lo que es necesario mantener la frecuencia dentro de un intervalo de terminado de acuerdo a la norma para evitar futuros accidentes. A continuación en la tabla 20 se muestran los valores de frecuencia medidos:

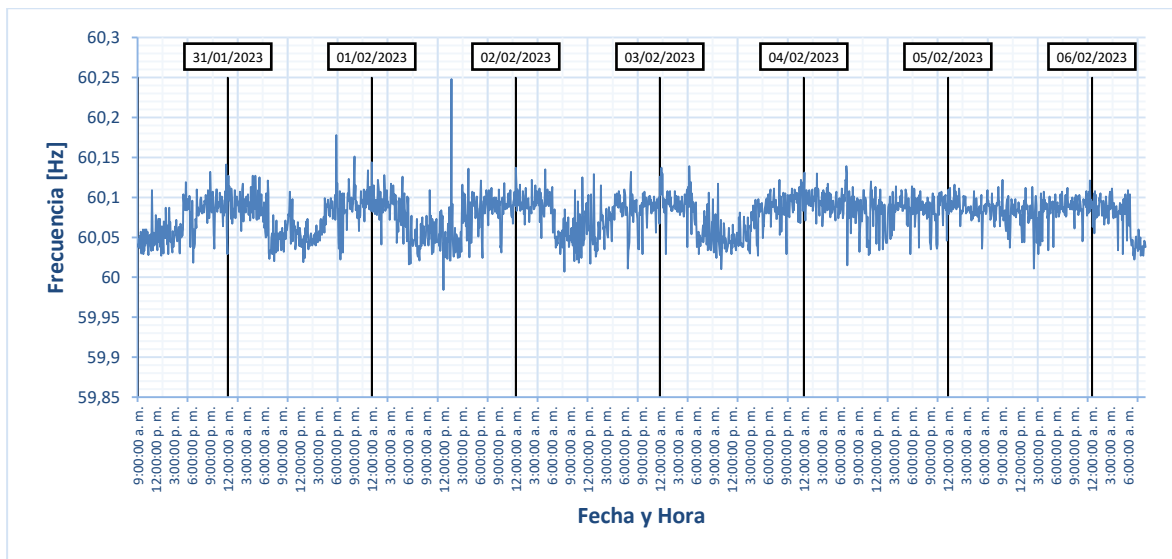


Figura 20, Frecuencia en Hertz



Frecuencia (Hz)				
	VR. MÁXIMO	VR. MÍNIMO	PROMEDIO	TRAZO
<b>Hz</b>	60,248	59,984	60,077	-----

Tabla 22. Valores máximos y mínimos de Frecuencia.

Tal como se puede evidenciar en la tabla 22, la frecuencia es estable durante todo el periodo de medición, sus variaciones no superan los valores máximos admisibles (entre 57.5 y 63.0 Hz) a pesar de las caídas de potencia durante el fin de semana del 4 y 5 de febrero.

## 11. CONCLUSIONES

- Para la realización del presente estudio de calidad de energía se tuvo en cuenta la normativa nacional e internacional vigentes en Colombia tales como CREG 015.CRG 199, NTC 5001, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000. Lo que nos permitió tener puntos de referencia en cuanto a las condiciones y parámetros de medición, los límites mínimos y máximos permitidos en cada parámetro eléctrico y las condiciones de sanción económica.
- Con base en los resultados obtenidos durante la medición de los indicadores de calidad de energía en el tablero general de distribución de la empresa Multiproyectos, se pueden establecer:
  - ✓ La potencia activa consumida presenta un patrón periódico durante los primeros 5 días, con un consumo que oscila entre 30kW y los 50kW, teniendo una caída de consumo los últimos 3 días de la medición. A su vez la potencia aparente tuvo un comportamiento similar al de la potencia activa.
  - ✓ Existen excedentes de potencia reactiva inductiva y capacitiva. teniendo la inductiva llegando a ser hasta 8,5 veces superior al 50% de la potencia activa, con un pico máximo en de 45,1kVAr y la capacitiva con un pico máximo de 30,25 kVAr, esto genera penalizaciones económicas, pérdidas de potencia activa y desbalances de corriente y tensión,
  - ✓ Debido a los excedentes de potencia reactiva presentes en la red el factor de potencia se encuentra muy por debajo de lo establecido por la ley con un pico máximo de 0.887 y promedio de 0,27,
  - ✓ La distorsión armónica de la onda de Tensión no supera el valor máximo admisible (20%) en los tres registros, por lo que se encuentra trabajando de acuerdo con lo establecido por la norma.
  - ✓ El factor de cresta supero la estipulada por la norma teniendo una desviación máxima de 570,13%, por lo que hay impactos de la forma de onda.
  - ✓ La frecuencia es estable durante todo el periodo de medición, sus variaciones no superan los valores admisibles (entre 57.5 y 63.0 Hz).
- Teniendo en consideración las variables medidas que evidencian presencia de fenómenos electromagnéticos que afectan la instalación eléctrica dando como resultado

---

un factor de potencia en promedio de 0,27, se hace necesario realizar una compensación de potencia reactiva, para ello es necesario realizar un mantenimiento preventivo correctivo al banco de condensadores y en este revisar si hay condensadores en modo directo, o si la programación del banco de condensadores no es correcta. Si después de realizado el mantenimiento el factor de potencia no es compensado, se deberá implementar un nuevo sistema de compensación, se sugiere compensación activa con filtros o compensadores dinámicos.

- Los factores generadores de potencia reactiva son los transformadores, motores, cables mal dimensionados o empalmados, equipos de protección dañados y equipos electrónicos, dando como resultado baja calidad de energía lo que a su vez afecta la eficiencia y vida útil de la maquinaria de proceso. Con el fin de mitigar el impacto de estos, se sugiere:
  - ✓ que para la alimentación eléctrica de la maquina punzonadora se remplacen los 2 transformadores conectados en serie de 20kVA, 240V/400V y 25kVA, 400V/460 por un solo transformador que cubra el rango de voltaje 240V/460V requerido.
  - ✓ Con el fin de mejorar el suministro eléctrico de todo el taller La cuenta eléctrica que abastece el taller es a 220V, se sugiere solicitar una ampliación de carga a una cuenta que opere a 440V, con una potencia superior a los 50kVA y con esto poder eliminar de la red eléctrica interna los transformadores elevadores de 220V a 440V.
  - ✓ Se sugiere realizar una actualización y normalización RETIE a todo el sistema eléctrico del taller de metalmecánica, ya que en el levantamiento se evidencio calentamiento de acometidas, malas conexiones y equipo eléctrico en malas condiciones.
  - ✓ Se debe realizar un estudio de cargabilidad real del taller, con el fin de establecer la carga real de cada una de las máquinas y con esto poder diseñar las acometidas eléctricas acorde a cada una.

- ✓ Con el fin de reducir el riesgo de fallas en el sistema eléctrico y a prolongar la vida útil de los equipos eléctricos, se requiere hacer un equilibrio de cargas y con esto evitar el desbalance de corriente y voltaje.
- Para dar constancia del estudio realizado se envió a la empresa multiproyectos Electromecánicos Ltda, un informe técnico detallado en el que se relacionan los hallazgos encontrados en sus instalaciones eléctricas, en este también se sugieren las modificaciones y recomendaciones necesarias para la normalización de su acometida eléctrica y con esto evitar que sigan siendo penalizados económicamente.

## 12. REFERENCIAS

- [1] E. A. C. Plata y A. J. U. Farfán, *Sistemas eléctricos en régimen no sinusoidal*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia., 2022.
- [2] E. R. Chirinos Vera, *Análisis de la direccionalidad armónica a nivel tensión de 60 KV para optimizar el funcionamiento de la sub estación Chiclayo Oeste de 220/60 KV.*, 2020.
- [3] S. L. Gundebommu, I. Hunko, O. Rubanenko y V. Kuchanskyy, «Assessment of the power quality in electric networks with wind power plants,» de *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems*, 2020.
- [4] M. K. Ventura, *Estudio y análisis de calidad del producto Enfocado en Perturbaciones Armónicas en el Sistema Eléctrico de un Ingenio Azucarero Cartavio SAA.*, 2018.
- [5] «AUNA Dostribución,» 19 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.aunadistribucion.com/blog/salicru-perturbaciones-electricas-y-como-evitarlas/>. [Último acceso: 25 04 2023].
- [6] M. E. Silva Silva, *Mejora en la calidad de la energía eléctrica para eficientar la vida útil del equipo compensador de potencia reactiva de los supermercados del formato Lider*, Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello, 2019.
- [7] M. R. Berenguer Ungaro, Hernández Rodríguez, N. R., Conde García, R. E., Arias Gilart, R. y Deás Yero, D., «Gestión de la calidad de la energía eléctrica,» *Ingeniería Energética*, vol. 39, nº 1, pp. 62-68, 2018.

- [8] Quinteros, J., Masache, P. y Carrión, D., «Revisión para la restauración optima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad.» *I+ D Tecnológico*, vol. 17, nº 1, pp. 87-95, 2021.
- [9] Daza Urrego, A., Buriticá Arboleda, C. I. y Garzón Rodríguez, Y., «Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010,» *Tecnura*, vol. 19, pp. 41-54, 2015.
- [10] Abata Mesías, S. W., y Villa Lema, F. S. , Análisis de transitorios electromagnéticos en la red del sistema eléctrico Metro de Quito, Quito: Bachelor's thesis, 2018.
- [11] M. Cassane Arroyo, Armónicos en redes industriales., 2021.
- [12] Beltrán, J. R. L. y Gámez, E. V. , Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial. Trabajo para optar por el título de Ingeniero Electricista., Universidad del Salvador., 2019.
- [13] Segura Wilches, D. E. y Merchan Rojas, J. R., Metodología para el Análisis de Distorsión Armónica en Instalaciones Eléctricas Industriales de Baja Tensión con Carga Instalada Mayor a 1 MVA., 2018.
- [14] J. C. Cerecedo Márquez, Simulación y construcción de un filtro pasa altas y de un filtro pasa bajas., 2010.
- [15] S. N. Vargas Mendoza, Filtros pasivos y/o transformadores Zig-Zag como solución a los armónicos presentes en un sistema eléctrico., 2022.
- [16] I. H. Vargas Espinoza, Implementación de un banco de condensadores para aumentar el factor de potencia en la Empresa Fibraforte Año 2015., 2017.
- [17] R. Huaman Conde, Estudio del comportamiento del motor de inducción trifásico de 7.5 kw de potencia, operando como generador eléctrico, mediante el uso de un banco de pruebas., 2022.

- [18] Cespedes Molano, L. E. y Saad Gómez, J. A. , Evaluación técnica y diagnóstico de la calidad de energía eléctrica en la planta Quala SA., 2007.
- [19] Blooming, T. M. y Carnovale, D. J., «Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits,» de *In Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* , 2006.
- [20] Comisión de Regulación de Energía y Gas , NTC 5001 - Eficiencia Energética en el Sector Eléctrico., 2011.
- [21] International Electrotechnical Commission (IEC)., IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields., 2010.
- [22] ING SAC, Creg 015-2018 implicaciones economicas en su empresa, 2018.
- [23] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Colombian Technical Standard NTC 4104: Distribution Electric Systems, 2017.

### **13. ANEXOS**

- ✓ Certificado de calibración del analizador de redes mi 2892 Power Master.
- ✓ Informe técnico presentado a la empresa Multiproyectos.
- ✓ Diagrama unifilar.
- ✓ Catálogo de productos Metrel.