



# **Desarrollo de una metodología para medición y análisis de calidad de potencia eléctrica**

**Deiner Francisco López Gómez**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



# **Desarrollo de una metodología para medición y análisis de calidad de potencia eléctrica**

**Deiner Francisco López Gómez**

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

**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):

Ingeniero Carlos A. Avendaño

Línea de Investigación:

Calidad de energía y potencia.

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2020



# **Agradecimientos**

A Padre Dios las gracias por la vida y mi ser

A mis hijos, madre, padre y esposa, todo mi amor y gratitud por su apoyo y sacrificio para  
hacer realidad uno de tantos sueños



## Resumen

El presente proyecto para graduación y titulación en ingeniería electromecánica, tiene como objetivo elaborar una metodología para la configuración y conexión del equipo analizador de redes, así como la medición y análisis de la información obtenida, evidenciando desviaciones eléctricas respecto a las normas que apliquen (IEEE Std 1159-2009 – V 2014 “*Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”, Resolución CREG 070/98 “*Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada*”, NTC 5501 “*Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común*”), también contendrá instructivos para la selección de soluciones tecnológicas para armónicos y reactiva en el sistema.

Se realizan dos mediciones que muestran condiciones diferentes de los fenómenos electromagnéticos, que permitieron analizar el sistema en general y hallar desviaciones en el factor de potencia y en la tasa de distorsión armónica; con esta información detallada de las desviaciones se hace posible el dimensionamiento del banco de condensadores para compensar la potencia reactiva aumentando el factor de potencia, así como la selección del filtro para la mitigación de armónicos en el sistema. Los procedimientos elaborados en el documento pueden ser aplicados para emitir observaciones, recomendaciones y soluciones de acuerdo a los parámetros eléctricos estudiados, basándose siempre en las normas y resoluciones nacionales e internacionales.

**Palabras clave:** Calidad de energía, tensión, corriente, potencia, armónicos, factor de potencia.

## Abstract

The present project for graduation and degree in electromechanical engineering, aims to develop a methodology for the configuration and connection of the network analyzer equipment, as well as the measurement and analysis of the information obtained, evidencing electrical deviations with respect to the standards that apply (IEEE Std 1159-2009 – V 2014 “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, Resolution CREG 070/98 “Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada”, NTC 5501 “Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común”), it will also contain instructions for the selection of technological solutions for harmonics and reactive systems in the system.

Two measurements are made that show different conditions of electromagnetic phenomena, which allowed us to analyze the system in general and find deviations in the power factor and in the harmonic distortion rate; With this detailed information on the deviations, it is possible to dimension the capacitor bank to compensate the reactive power by increasing the power factor, as well as the selection of the filter to mitigate harmonics in the system. The procedures elaborated in the document can be applied to issue observations, recommendations and solutions according to the electrical parameters studied, always based on national and international standards and resolutions.

**Keywords:** Power quality, voltage, current, power, harmonics, power factor.

# Contenido

	Pág.
<b>1. Calidad de la potencia eléctrica.....</b>	<b>19</b>
1.1 Perturbaciones de la calidad de energía .....	21
1.1.1 Huecos de tensión (sags) .....	22
1.1.2 Elevaciones de tensión /swell).....	22
1.1.3 Variación de frecuencia .....	22
1.1.4 De corta duración .....	23
1.1.5 Sobretensiones transitorias .....	23
1.1.6 Sobretensiones oscilatorias .....	23
1.1.7 Sobretensiones impulsivas .....	23
1.1.8 Variaciones de tensión en estado estable.....	24
1.1.9 Desbalance de tensión .....	24
1.1.10 Muecas de tensión.....	25
1.1.11 Interrupciones de larga duración.....	25
1.1.12 Flickers .....	26
1.1.13 Armónicos.....	26
1.1.14 Factor de potencia .....	27
1.2 Normas técnicas para la calidad de potencia eléctrica .....	28
1.2.1 Normas internacionales .....	28
1.2.2 Normas nacionales .....	29
1.2.3 Otras resoluciones.....	30
<b>2. Desarrollo metodológico .....</b>	<b>31</b>
2.1 Consideraciones .....	31
2.1.1 Caracterización del sistema.....	31
2.1.2 Necesidad o problemas expuestos por el cliente .....	31
2.1.3 Punto óptimo de conexión .....	32
2.2 Guía para el análisis y la elaboración de un informe de medición de calidad de energía .....	32
2.2.1 Informe .....	32
2.2.2 Análisis .....	34
2.3 Guía para el dimensionamiento de un banco de condensadores basado en la medición .....	34
2.3.1 Caracterización del problema .....	34
2.3.2 Dimensionamiento del banco de condensadores.....	35
2.4 Guía para la selección de un filtro de armónicos basado en la medición.....	35
2.4.1 Caracterización del problema .....	35
2.4.2 Selección del filtro de armónicos .....	36

<b>3.</b>	<b>Resultados - Aplicación de la metodología .....</b>	<b>37</b>
3.1	Aplicación de la metodología de análisis y elaboración de un informe – Empresa 1	37
3.1.1	Objetivos .....	37
3.1.2	Alcance de los trabajos .....	37
3.1.3	Descripción del sistema.....	37
3.1.4	Monitoreo realizado .....	38
3.1.5	Medición.....	38
3.1.6	Resumen de parámetros eléctricos .....	39
3.1.7	Análisis de la información de la medición .....	40
3.1.8	Tensión en estado estable .....	40
3.1.9	Corriente .....	41
3.1.10	Potencia aparente .....	42
3.1.11	Potencia activa .....	43
3.1.12	Potencia reactiva.....	44
3.1.13	Factor de potencia.....	45
3.1.14	Conclusiones de la medición .....	46
3.1.15	Recomendaciones de la medición .....	46
3.2	Aplicación de la metodología de análisis y elaboración de un informe – Empresa 2	47
3.2.1	Objetivos .....	47
3.2.2	Alcance de los trabajos .....	47
3.2.3	Descripción del sistema.....	47
3.2.4	Monitoreo realizado .....	47
3.2.5	Medición.....	47
3.2.6	Resumen de parámetros eléctricos .....	48
3.2.7	Análisis de la información de la medición .....	49
3.2.8	Tensión en estado estable .....	49
3.2.9	Corriente .....	50
3.2.10	Distorsión armónica en forma de onda .....	51
3.2.11	Distorsión armónica total en tensión (THDv) .....	51
3.2.12	Distorsión total de la demanda (TDD).....	53
3.2.13	Armónicos individuales.....	55
3.2.14	Conclusiones de la medición .....	57
3.2.15	Recomendaciones en la medición .....	57
3.3	Aplicación de la metodología para el dimensionamiento del banco de condensadores.....	58
3.4	Aplicación de la metodología para selección de filtro de armónicos.....	64
3.4.1	Configuración de filtro de armónicos .....	66
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
4.1	Conclusiones .....	69
4.2	Recomendaciones .....	70

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1:</b> Muesca de tensión provocada por operación de un rectificador. ....	25
<b>Figura 1-2:</b> Señal distorsionada debido a la suma de su quinta armónica. ....	27
<b>Figura 1-3:</b> Diagrama de potencia eléctrica. ....	28
<b>Figura 3-1:</b> Perfil de tensión de línea en estado estable. ....	40
<b>Figura 3-2:</b> Perfil de corriente en estado estable. ....	41
<b>Figura 3-3:</b> Perfil de potencia aparente. ....	42
<b>Figura 3-4:</b> Perfil de potencia activa. ....	43
<b>Figura 3-5:</b> Perfil de potencia reactiva. ....	44
<b>Figura 3-6:</b> Perfil de factor de potencia. ....	45
<b>Figura 3-7:</b> Perfil de tensión de línea en estado estable. ....	49
<b>Figura 3-8:</b> Perfil de corriente en estado estable. ....	50
<b>Figura 3-9:</b> Distorsión armónica total de tensión. ....	52
<b>Figura 3-10:</b> Forma de onda de corriente armónica. ....	54
<b>Figura 3-11:</b> Armónicos individuales de tensión. ....	55
<b>Figura 3-12:</b> Armónicos individuales de corriente. ....	56
<b>Figura 3-13:</b> Curva característica de factor de potencia. ....	58
<b>Figura 3-14:</b> Curva de factor de potencia de dos días de la semana. ....	59
<b>Figura 3-15:</b> Esquema eléctrico básico de Banco de condensadores de 5 pasos. ....	62
<b>Figura 3-16:</b> Vista frontal banco de condensadores de 5 pasos. ....	63
<b>Figura 3-17:</b> Forma de onda de corriente armónica en el tiempo. ....	64
<b>Figura 3-18:</b> Gráfico de barras de analizador de armónicos. ....	67
<b>Figura 3-19:</b> Pantalla de modo de compensación. ....	67
<b>Figura 3-20:</b> Pantalla activación de armónicos. ....	68

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3-1:</b> Resumen de parámetros eléctricos medidos. ....	39
<b>Tabla 3-2:</b> Resumen de parámetros eléctricos medidos. ....	48
<b>Tabla 3-3:</b> Límite de distorsión de tensión para sistemas desde 120V hasta > 161 kV...52	52
<b>Tabla 3-4:</b> Límites de distorsión armónica de corriente.....	53
<b>Tabla 3-5:</b> Armónicos de tensión. ....	55
<b>Tabla 3-6:</b> Análisis armónico de corriente.....	56
<b>Tabla 3-7:</b> Porcentaje y corriente armónica individual.....	65

## Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI
<i>A</i>	Amperio	A
<i>I</i>	Intensidad	A
<i>P</i>	Potencia activa	W
<i>Q</i>	Potencia reactiva	VAR
<i>S</i>	Potencia aparente	VA
<i>V</i>	Voltaje	V

Símbolo	Término	Unidad SI
$\theta$	Ángulo	grado (°)

Abreviatura	Término
<i>FP</i>	Factor de potencia
<i>Hz</i>	Hertz
<i>Isc</i>	Corriente de corto circuito
<i>II</i>	Corriente de línea estado estable
<i>RPM</i>	Revoluciones por minuto
<i>THDi</i>	Tasa de distorsión armónica de corriente
<i>THDv</i>	Tasa de distorsión armónica de tensión
<i>TDD</i>	Tasa total de demanda distorsión armónica
<i>UPS</i>	Sistemas de alimentación interrumpida
<i>VSD</i>	Variador de velocidad



## Introducción

El desarrollo técnico y económico de la industria ha hecho que cada vez más requieran equipos de mayor eficiencia y productividad, por ello la inclusión de muchos equipos electrónicos en sus instalaciones. Estos equipos requieren una confiabilidad y especificaciones técnicas de la más alta calidad, para que pueda darse la producción o funcionamiento en sus mejores términos, generando el menor impacto negativo posible, pero no solo los equipos deben tener las mejores condiciones, lo debe tener también la energía eléctrica requerida para su funcionamiento; labor tanto del usuario como de los que la suministran velar por mantener unos requerimientos mínimos de la calidad de energía para que el sistema eléctrico funcione conservando de los diferentes factores implícitos como la tensión, factor de potencia, forma de onda, armónicos, etc. La manera más práctica para la verificación del estado de la calidad de la energía es medir las condiciones actuales del sistema que permitan una pronta respuesta ante cualquier desviación o circunstancia presentada recordando siempre que lo que no se mide no se controla.

Por el comportamiento mismo de la industria, hoy en día se requiere, siendo casi un requisito indispensable, medir las condiciones de la calidad de energía en las instalaciones, pero más que solo medirlas, es hacerlo de la manera más adecuada, soportando estas mediciones bajo procedimientos o metodologías para que los resultados y análisis sean confiables y asertivos, una buena medición inicial es la línea base que permite conocer el estado actual de un sistema para posteriormente tomar acciones preventivas o correctivas a los problemas y desviaciones encontradas con el pasar del tiempo.

Uno de los problemas o desviaciones más recurrentes y comunes halladas en sistemas eléctricos industriales está vinculado con el factor de potencia, presentado principalmente por la implementación de equipos inductivos y equipos electrónicos en los procesos. Los equipos inductivos como motores aumentan la potencia reactiva en el sistema, que, si en

el peor de los casos supera el 50% de la potencia activa, puede generar que el exceso sobre este límite sea un consumo considerado como energía activa al momento de la facturación, generando pérdidas en la compañía pues es energía facturada no aprovechada como potencia útil, o en su defecto penalizaciones por no mantener el factor de potencia igual o mayor a 0,9. (CREG 108, 1997).

Por otra parte, los equipos electrónicos, a pesar de traer grandes beneficios sobre los resultados en los procesos, tienen una particularidad en las consecuencias sobre la calidad de la energía en el sistema de la industria, ya que crean distorsión en la forma de la onda de tensión y de corriente que impactan negativamente todo el sistema, desde la afectación a conductores eléctricos de neutro por sobrecalentamiento (Gruzs, 1990, pág. 723), fallas en equipos de protección hasta la pérdida de capacidad de transformadores (IEEE, 1998), dependiendo del orden o secuencia del armónico emitido e introducido; la potencia armónica por su parte, da como resultado una potencia no útil, consumida y facturada.

Desde equipos de uso básico en hogares hasta equipos responsables de la producción en el sector industrial, son respaldados por tecnologías electrónicas para su operación, estos equipos juegan un papel importante, pues automatizan los procesos para lograr una mayor producción, eficiencia y seguridad, sin embargo, presentan desventajas dado que estos equipos electrónicos son generadores de distorsión armónica (IEEE Std 519, 2014), y a su vez sufren efectos por causas de eventos de tensión. El sector industrial tiene claro los costos asociados al consumo energético mensual por los resultados en la factura de energía, por ejemplo, el sector de la industria del papel es el mayor consumidor de energía eléctrica para generación de fuerza motriz, seguido por la industria de alimentos, textiles y confecciones; la alta contribución de consumo del sector papel se debe a que posee la mayor población de motores eléctricos de alta potencia (INCOMBUSTIÓN, 2014, pág. 24).

Ahora bien, los costos dados por consecuencias de una mala calidad de energía generada o recibida son menos fáciles de evidenciar, pues muchos equipos pueden fallar o detener por un evento asociado a mala calidad de energía reflejado en situaciones no deseadas como paradas no programadas, mantenimientos correctivos evitables, etc. Si el usuario final no tiene la capacidad de monitorear estos parámetros eléctricos, es más difícil obtener información a tiempo que permita la comprensión de los sucesos y del impacto de la calidad de la energía en sus procesos industriales y control de los mismos, dando como

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

consecuencia que estos costos sigan sin gestionarse. Entonces resulta necesario realizar correctas mediciones y análisis de los parámetros eléctricos de la energía verificando cuales de estos parámetros se encuentran por fuera de valores recomendados (NTC 5001, 2008), o que eventos se encuentran en la medición, de esta manera emitir un diagnóstico correcto y a tiempo para mejorar y/o controlar dichas desviaciones.

El suministro de energía está diseñado para entregar energía segura y confiable a los consumidores, sin embargo, hay eventos presentes que afectan negativamente a equipos y sistema en general, que, si no son monitoreados adecuadamente, el control de las desviaciones se hace menos preciso y confiable.

## **Objetivo general**

Establecer una metodología para la medición y análisis de calidad de potencia, que permita diagnosticar y recomendar posibles soluciones a las desviaciones eléctricas evidenciadas.

## **Objetivos específicos:**

- Elaborar una guía para la una correcta medición, análisis y elaboración de un informe técnico con la caracterización de los parámetros eléctricos contenidos en la medición de calidad de potencia.
- Realizar una guía para el dimensionamiento de un banco de condensadores según el factor de potencia del sistema eléctrico.
- Identificar los armónicos según su orden y frecuencia más representativos de la medición que permitan la selección del filtro de armónicos.

## 1. Calidad de la potencia eléctrica.

La implementación de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, empezando por el control hasta el uso final, ha ocasionado que se incremente las apariciones de perturbaciones en las propiedades de los parámetros que componen la energía eléctrica; razón por la que se han desarrollado regulaciones que ayudan a controlar este tipo de problemas para que impacte de la menor manera posible a todo el sistema de potencia del sistema interconectado nacional.

La importancia de medir, monitorear y controlar los parámetros eléctricos de la calidad de la energía surge al identificar los efectos y consecuencias de las distintas perturbaciones en los sistemas eléctricos, equipos y personas, esto ha generado que el desarrollo de instrumentos utilizados para la captar, descargar y procesar información sea llevado a un nivel de mayor importancia; a través de los años se han implementado normas, recomendaciones, estándares que han ayudado a regular y mitigar las desviaciones que puedan afectar el sistema de interconexión nacional.

Existe una norma que establecen los valores límite de distorsión armónica de corriente y tensión en la que los consumidores deben trabajar y guiarse, como es la (IEEE 1159, 2009), estándar homologado para Colombia con la (NTC 5000, 2002) y (NTC 5001, 2008). La Comisión de Regulación de Energía y Gas, mediante la resolución (CREG 108, 1997) artículo 25, parágrafo 1° obliga a las empresas prestadoras de servicio exigir a aquellas instalaciones cuyo factor de potencia inductivo este por debajo de 0,9, que instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva, con el parágrafo 3° definen que en caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida por un suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable.

Las tecnologías que abarcan el control de los parámetros eléctricos que presenten desviaciones con respecto a las normas que se referencien es muy variado, pues estas van desde el control de problemas de tensión proveniente de los suministradores de energía hasta la potencia reactiva, armónicos y alto factor de potencia generado por los mismos usuarios. Estas tecnologías que ayudan con los controles pueden conseguirse en el mercado colombiano o bien importándose y las características de los mismos dependen de la necesidad de sistema medido, presupuesto, horarios de trabajo de la compañía, etc.

Para la compensación de energía reactiva, el control de se hace mediante bancos de condensadores, buscando evitar el pago de penalización por consumo de energía reactiva a la compañía que suministra la energía eléctrica (CREG 108, 1997, pág. 22), este banco permite también la disminución de caídas de tensión, ampliación de la capacidad en los conductores eléctricos, así como minimizar pérdidas de energía, entre otros beneficios. Existe una gran variedad de este tipo de tecnologías; de diferentes fabricantes disponibles en Colombia como, ABB, SCHNEIDER ELECTRIC, SIEMENS, etc. La variación básicamente la da la necesidad de cada sistema en particular, potencia requerida, comportamiento del sistema donde se requiere instalar y presupuesto, sin embargo, para instalar el banco de condensadores se requiere informar al operador de red y entregar las características técnicas de las inductancias y capacitancias que serán conectadas (CREG 070, 1998, pág. 21).

Para el mejoramiento y control del factor de potencia por alta reactiva en el sistema se cuentan con bancos de condensadores de pasos fijos; que consta de uno o varios pasos con sus respectivas protecciones y un piloto en la parte frontal del tablero que indica cuales de estos se encuentran en funcionamiento, activándose de manera manual por selectores, la cantidad de pasos activos dependen de la intervención de personal calificado, ya que una mala supervisión de la operación podría ocasionar sobrecompensaciones o subcompensaciones.

Los bancos de condensadores automáticos; realizan la compensación de energía reactiva de acuerdo al monitoreo en tiempo real, donde la cantidad y capacidad de los pasos automáticos se deberán calcular de acuerdo a la caracterización del sistema por su perfil de carga, estos pasos se señalizan con pilotos en la puerta del tablero que indican cuales pasos están operativos.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

El banco de condensadores mixto, es el más común en el mercado, este banco realiza la compensación al igual que el automático, pero, adicionalmente posee uno o más pasos fijos, pasos que son medidos o calculados para compensar las pérdidas que son constantes en el sistema eléctrico.

En cuanto a los filtros de armónicos, también existe gran variedad en el mercado colombiano, de marcas como CIRCUTOR, SCHNEIDER ELECTRIC, ECONEST. La eficacia de estos filtros es basada en su tipo; activos o pasivos. La gran diferencia consiste en que los pasivos solo atenúan los armónicos, y trabajan con armónicos que son constantes en el tiempo, mientras que los filtros activos inyectan una corriente armónica con ángulo de fase opuesto a la existente en el sistema para cancelarla (Schneider, 2019), dependiendo de su frecuencia y potencia, logrando así una mayor eficiencia en la implementación.

### **1.1 Perturbaciones de la calidad de energía**

La afectación de la calidad de energía puede darse por muchos fenómenos, ya sean por factores atmosféricos, fallas mecánicas del sistema eléctrico y equipos de cargas no lineales, afectando la forma de ondas de parámetros como la tensión y la corriente de diferentes maneras, como cambios en la frecuencia, amplitud o en el tiempo de duración del fenómeno. Según la (NTC 5000, 2002), hay una clasificación de perturbaciones de calidad de energía eléctrica según su duración como se ve a continuación:

- Perturbaciones lentas: Sags, swells, variación de frecuencia, de corta duración
- Perturbaciones rápidas: Transitorias, oscilatorias, impulsivas
- Perturbaciones de larga duración o permanentes: Variación en estado estable, desbalance de tensión, muescas.
- Flickers
- Armónicos
- Variación del factor de potencia

### **1.1.1 Huecos de tensión (sags)**

Este tipo de problemas se evidencia cuando se dan cortocircuitos, grandes conmutaciones por entrada de bancos de motores. Este evento puede causar que los equipos queden inactivos por cortos tiempo sin embargo pueden llevar el equipo a falla. Se caracteriza por la reducción del valor RMS en un 10% o más respecto a la tensión nominal, su duración va desde medio ciclo a 1 minuto (NTC 5001, 2008, pág. 10).

### **1.1.2 Elevaciones de tensión /swell)**

Las elevaciones repentinas del valor eficaz de la tensión son conocidos como SWELL, contrario al SAG, este se caracteriza por el incremento del 10% del valor de la tensión nominal, su duración va desde 0,5 ciclos y 30 ciclos (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 21). Normalmente este tipo de fenómenos son causados equipos de arco eléctrico, grandes sistemas de alimentación interrumpida (UPS), salidas de cargas, o cortocircuitos monofásicos (fase – tierra), dado que las fases que no entraron en falla, son las que presentan las elevaciones momentáneas de su valor en tensión. Las consecuencias del evento son pueden darse en la reducción de la vida útil de equipos de cómputo, variadores de velocidad (VSD), también en elementos de potencia como conductores eléctricos, barrajes, transformadores de potencia, motores, etc (NTC 5001, 2008, pág. 13). Una manera de minimizar estas consecuencias es tener los equipos o el sistema eléctrico debidamente aterrizado.

### **1.1.3 Variación de frecuencia**

Este parámetro es considerado uno de los más importantes en sistemas potencia para corriente alterna, la frecuencia muestra básicamente el número de ciclos repetidos por segundo visualizados en la forma de onda. En Europa la frecuencia de trabajo es de 50 Hz, para Colombia la frecuencia de operación es 60 Hz (CREG 070, 1998, pág. 36). Esta variación en la frecuencia está asociada directamente al funcionamiento del generador eléctrico, balance entre la capacidad degeneración y la demanda de carga (IEEE 1159, 2009, pág. 33), a sus RPM, mientras las revoluciones sean constantes, la frecuencia lo es también; las desviaciones de esta frecuencia se pueden generar problemas directos con el generador, como altas vibraciones, pérdidas de potencia, los equipos electrónicos de operación de generador presenten fallas, también se alude que la carga asumida es mayor o superior a su capacidad.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### **1.1.4 De corta duración**

Perturbaciones de corta duración es considerado cuando la ausencia de tensión no supera el minuto, o que se observe que el valor eficaz haya tenido una disminución del 10% con respecto a la tensión nominal. Las causas de este tipo de evento son los equipos de protección de corto circuitos, por ejemplo, los reconectores que dependiendo de la configuración hacen una reanudación de energía no mayor al segundo, los efectos más comunes pueden ser, apagones momentáneos en sistemas de iluminación, la desprogramación de equipos electrónicos, e interrupción de procesos.

### **1.1.5 Sobretensiones transitorias**

Estos cambios son muy rápidos y repentinos, con cambios en la amplitud de la onda de tensión, causando que los valores excedan el valor nominal, la duración es de menos de medio ciclo. Las causas más comunes son las maniobras eléctricas en líneas de transmisión, las descargas atmosféricas, la entrada o salida de altas cargas (NTC 5001, 2008, pág. 30).

### **1.1.6 Sobretensiones oscilatorias**

Es un cambio de frecuencia repentino de la condición de estado estacionario de tensión, corriente o de los dos, estos cambios son positivos como negativos. Un transitorio oscilatorio consiste en una tensión o corriente cuyo valor instantáneo cambia rápidamente de polaridad. Se caracteriza por la duración, magnitud, y contenido espectral; las subclases de contenido espectral son de alta, media y baja frecuencia; 0.5 – 5 MHz , 5-500kHz, < 5 kHz respectivamente (IEEE 1159, 2009, pág. 8).

### **1.1.7 Sobretensiones impulsivas**

Se caracterizan por un cambio repentino de la frecuencia nominal de la señal de tensión, corriente o ambos. Es unidireccional en su polaridad, es decir positivas o negativas. Se caracterizan por sus tiempos de subida y decaída, una de las causas más comunes son las descargas atmosféricas, la amortiguación de las altas frecuencias generadas son dadas rápidamente por la componente resistiva del circuito (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 46).

### **1.1.8 Variaciones de tensión en estado estable**

Estas variaciones tienen duraciones mayores a 1 minuto (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 57) y se dan cuando hay una desviación del valor eficaz a la tensión nominal a la frecuencia de red (60 Hz). Las principales causas pueden ser caídas de tensión por distancia o entradas y salidas de grandes cargas.

Se conocen dos tipos de variaciones de larga duración, sobretensiones y subtensiones. La primera, puede presentarse por maniobras en el sistema como desconexiones de cargas muy grandes, banco de condensadores entrando en línea y posición del tap del transformador (NTC 5001, 2008, págs. 15-16). Las afectaciones normalmente se dan sobre la vida útil de los equipos, fallas en equipos electrónicos, accionamientos en equipos de protección, etc.

Por otro lado, las subtensiones tienen causas contrarias a las sobretensiones, la entrada de una carga representativa al sistema, circuitos eléctricos con cargas superiores a la dimensionada, salida de bancos de condensadores; estas subtensiones pueden aumentar las pérdidas de eficiencia en motores de inducción por aumento de temperatura dado que el consumo de corriente es mayor para sostener la potencia demandada. Los límites para controlar las variaciones de tensión están definidos por la norma (NTC 5001, 2008), entre +10% y -10% de la tensión nominal.

### **1.1.9 Desbalance de tensión**

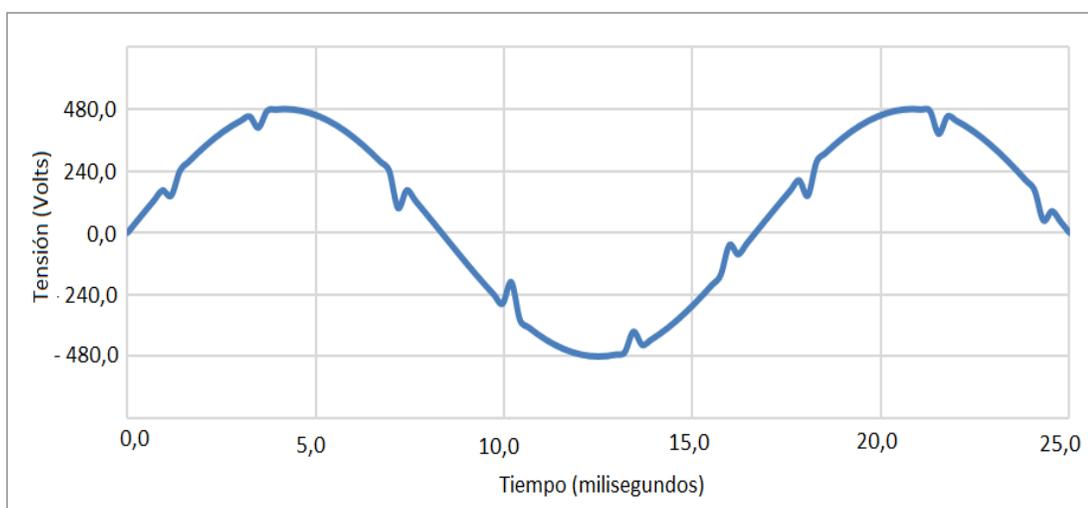
El desbalance de tensión en un sistema trifásico se define como la relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa y la magnitud del componente de secuencia positiva, expresada como un porcentaje (IEEE 1159, 2009, pág. 15). Las principales causas, desbalances de carga principalmente por la existencia de cargas monofásicas en sistemas trifásicos, bancos de condensadores con deficiencias en su funcionamiento. Las consecuencias más representativas se dan en equipos rotativos, reduciendo su capacidad de carga, disminuyendo la vida útil, pues el aislamiento sufre al incrementarse la temperatura (PDMA, pág. 9), lo que llevaría a mantenimientos correctivos no deseados. La mejor opción para mitigar o eliminar esta desviación, es balancear las cargas, distribuyendo de la manera más uniformes las cargas monofásicas en cada fase, garantizando que estos valores de desviación no superen el 2%.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 1.1.10 Muestras de tensión

La muesca de tensión se muestra de una forma periódica en la forma de onda de tensión, duración menor a medio ciclo, las principales causas de este evento son el funcionamiento de equipos electrónicos de potencia para la conmutación de corriente de una fase a otra como se observa en la Figura 1-1.

**Figura 1-1:** Muesca de tensión provocada por operación de un rectificador.



*Nota. Fuente: Adaptado (IEEE 1159, 2009, pág. 31)*

El efecto de este fenómeno se da principalmente en equipos electrónicos sensibles causando malas operaciones o fallas, se pueden inducir tensiones en otros circuitos por oscilaciones de alta frecuencia (NTC 5001, 2008, pág. 28); el uso de cargas inductivas como motores en el mismo sistema eléctrico, mitigan esta perturbación.

### 1.1.11 Interrupciones de larga duración

Las interrupciones de larga duración se dan cuando la ausencia de tensión se da por tiempos mayores a 1 minuto (NTC 5000, 2002, pág. 15) o cuando la tensión está por debajo del 10% de la tensión nominal.

### **1.1.12 Flickers**

Los flickers son percibidos en la visión humana por los parpadeos en la iluminación, estos parpadeos se dan normalmente por las fluctuaciones de tensión en baja tensión. Estas fluctuaciones se dan cuando hay cambios de tensión rápidas, en una frecuencia que es detectable por el ojo humano; este fenómeno sin embargo no afecta de manera representativa en los equipos, pero si crea la molestia a las personas (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 70). Las causas de este fenómeno se dan principalmente por equipos grandes conectados en el sistema como equipos de arco eléctrico, motores de alta potencia con carga variable (NTC 5001, 2008, pág. 18), etc. Los efectos se dan más en precepción por personas que en equipos, normalmente los equipos más afectados son los bombillos, con cambio en el nivel de la iluminación y la reducción de su vida útil, en las personas es la sensación de mareo y cansancio visual.

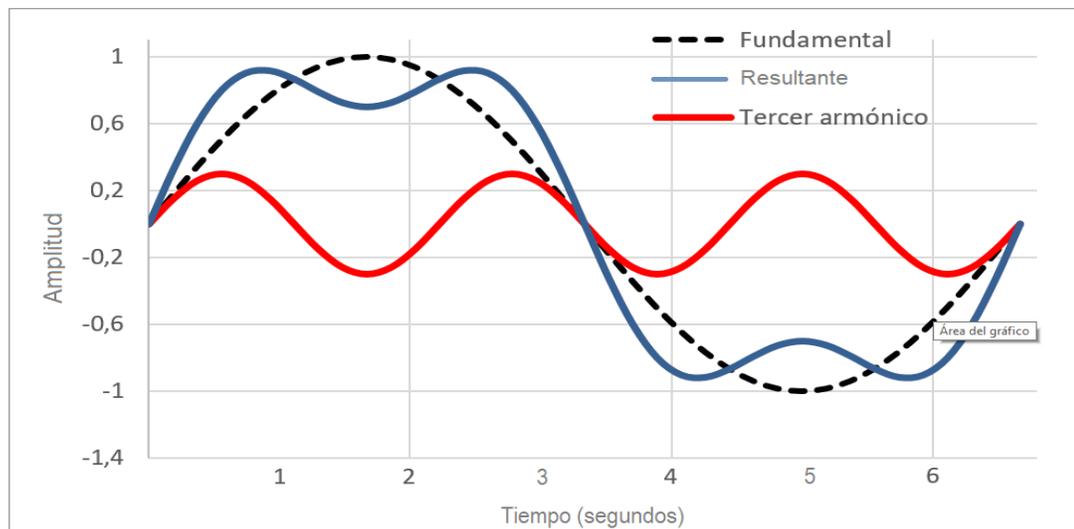
### **1.1.13 Armónicos**

Son voltajes o corrientes sinusoidales que tienen frecuencias múltiplos enteros con respecto a la señal de frecuencia fundamental (60 Hz). Cuando se combinan estas frecuencias con la fundamental, la forma sinusoidal cambia y se muestra distorsionada. La distorsión armónica existe debido a las características no lineales de los dispositivos y cargas en el sistema de potencia (IEEE 1159, 2009). Estos armónicos distorsionan las ondas sinusoidales de tensión y corriente que van de menos a más ciclos, cada uno de estos armónicos es expresado en términos de su orden, por ejemplo, armónicos del orden 2, 3, 4 y 5, tienen frecuencias de 120, 180, 240 y 300 Hz.

A medida que el orden del armónico es mayor, su magnitud y frecuencia disminuye, por eso los armónicos más representativos son los de orden inferior como el quinto y séptimo armónico. Si se sobrepone las armónicas sobre la fundamental, se puede visualizar la deformación de la onda en la fundamental, mostrando al final una onda compuesta resultante como se ve en la Figura 1-2.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

**Figura 1-2:** Señal distorsionada debido a la suma de su quinta armónica.



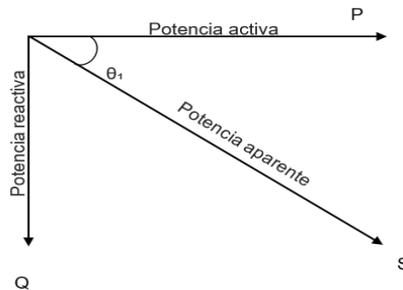
*Nota. Fuente: Adaptado (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 76)*

### 1.1.14 Factor de potencia

Equipos constituidos por devanados, como motores y transformadores son consumidores de energía reactiva para formar los campos magnéticos necesarios para operar, esta energía reactiva produce un desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente, este desfase puede anularse con el uso de banco de condensadores haciendo que el sistema sea más eficiente requiriendo menos corriente para el trabajo útil que requiere el sistema eléctrico. A las compañías se les solicita mantener el FP lo más cercano a 1 (CREG 108, 1997), y que deben equiparse de contadores de potencia reactiva para su control y facturación.

Para entender este fenómeno de una mejor manera se debe tener claro que la potencia eléctrica es el resultado del producto de la tensión y la corriente, pero que en los sistemas eléctricos hay presente 3 tipos de potencia: Activa, aparente y reactiva

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, el ángulo formado en el triángulo de potencias por P y S es dado por el desfase entre la tensión y corriente (Figura 1-3).

**Figura 1-3:** Diagrama de potencia eléctrica.

*Nota. Fuente: Adaptado (ENRIQUEZ HARPER, Gilberto, 2002, pág. 116)*

Las desventajas de un bajo factor de potencia en un sistema eléctrico son significativas tanto para el consumidor como para la compañía suministradora, pues la corriente transmitida es mayor por tanto líneas de transmisión, generadores, transformadores van a estar sobrecargados y este costo es cobrado directamente al usuario final.

Dentro de las ventajas del uso de bancos de condensadores para el mejoramiento del factor de potencia está inicialmente un menor costo en la factura por concepto de energía eléctrica, no pagos de penalizaciones en caso de sobrepasarse, aumento en la capacidad del sistema tanto del suministrador como el consumidor; la tensión adquiere una mejor calidad, y hay un menor desgaste en la vida útil de los equipos instalados, conductores, transformadores, etc.

## 1.2 Normas técnicas para la calidad de potencia eléctrica

Para la realización de mediciones de calidad de potencia y energía eléctrica, el análisis se debe referenciar en las normas nacionales e internacionales, dado que muestran los límites de los parámetros medidos dependiendo de las características del lugar y de sus necesidades, a continuación, se van a describir las normas de referencia.

### 1.2.1 Normas internacionales

- IEEE 1159 - 2009: Guía para el monitoreo de calidad de potencia:

Esta práctica recomendada abarca el monitoreo de la calidad de la energía eléctrica de los sistemas eléctricos, descripciones de fenómenos electromagnéticos, definiciones de condiciones nominales y sus desviaciones, (IEEE 1159, 2009, pág. 3). El documento

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

también muestra buenas prácticas en la medición e interpretación de datos durante la ejecución de la medición, por ejemplo, localizar los puntos estratégicos para monitorear, límites, tiempos de medición, interpretación de datos, etc.

- IEEE 519-2014: Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia:

Este estándar tiene como objetivo limitar los contenidos de armónicos de tensión y corriente generados por cargas no lineales presentes en el sistema eléctrico. Los límites que se diseñaron para un punto de conexión común PCC, y en este punto controlar las distorsiones armónicas de tensión y corriente.

- IEC 61000-4-30 Técnicas de ensayo y medición - Métodos de medición de calidad de potencia:

Esta norma también muestra intervalos de variación de tiempo en el monitoreo y en la captación de datos de los parámetros para garantizar una mejor precisión. Las dos clases de mediciones son llamadas en este estándar como Clase A y Clase B (IEC 61000-4-30, 2003, pág. 15).

Las medidas clase A se usan cuando se requiere una mayor precisión y confiabilidad en los resultados.

En las medidas clase B, los resultados nos necesariamente tienen los valores definidos dentro de los intervalos definidos por la IEC, sin embargo, con este tipo de medidores, los resultados pueden usarse para controles de consumos, cargabilidad del sistema, y demás aplicaciones donde la incertidumbre puede ser un poco más alta.

### 1.2.2 Normas nacionales

- NTC 5000, calidad de la potencia eléctrica (CPE) – definiciones y términos fundamentales:

Esta norma define la terminología básica usada en la calidad de energía y potencia eléctrica, desarrollada por la caracterización de los fenómenos electromagnéticos existentes en sistemas eléctricos de potencia.

- NTC 5001, calidad de la potencia eléctrica (CPE) – límites y metodología de evaluación en punto de conexión común:

Esta norma establece las metodologías de evaluación y los valores de referencia de los parámetros asociados a la calidad de potencia eléctrica en el punto de conexión común (PCC) entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión. (NTC 5001, 2008, pág. 12).

### **1.2.3 Otras resoluciones**

- Resolución CREG 047 de 2004 / Factor de potencia:

Esta resolución define el valor del factor de potencia inductivo para instalaciones eléctricas donde el valor no puede estar por debajo de 0,90, dado que, en caso de incumplirse, el operador de red exigirá al usuario la instalación de equipos de medición y control de energía reactiva.

- Resolución CREG No. 108 de 1997 / Factor de potencia:

En esta resolución, en el artículo 25, párrafo 3, se menciona el proceder para los usuarios que en caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida, el exceso sobre este límite, se considerará como consumo de energía activa para la factura (CREG 108, 1997).

- Resolución CREG No. 070 de 1998 / Frecuencia:

En esta resolución, en el capítulo 6, numeral 6.2.1.1, indica que la frecuencia nominal del SIN es 60 Hz y su rango de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones normales de operación. El OR y los Usuarios deben tener en cuenta que en estados de emergencia, fallas, déficit energético y períodos de restablecimiento, la frecuencia puede oscilar entre 57.5 y 63.0 Hz por un período de tiempo de quince (15) segundos (CREG 070, 1998, pág. 36).

## **2. Desarrollo metodológico**

La metodología expuesta en este documento tendrá en cuenta normas internacionales y nacionales, resoluciones y demás, así como la experiencia en casos reales de medición.

### **2.1 Consideraciones**

#### **2.1.1 Caracterización del sistema**

Inicialmente se debe tener en cuenta las características principales del sistema, como diagramas unifilares, niveles de tensión desde la red de entrada hasta uso final, placas características de los transformadores, otros equipos que se encuentran en las instalaciones, seccionadores, bancos de condensadores, equipos inductivos, transferencias, tableros de distribución, variadores de velocidad, ascensores, equipos electrónicos de potencia para automatización, etc. También es importante saber a qué se dedica la compañía donde se hace la medición, horarios de trabajo, picos de trabajo en el día, mes y año; por ejemplo, si es de fundición, el comportamiento de los factores eléctricos como la corriente es distinto a una compañía que maneje sólo oficinas con muchos equipos de cómputo. Todas estas características ayudan a perfilar mejor el sistema, que termina en un mejor análisis, diagnóstico y recomendaciones para los hallazgos en la compañía.

#### **2.1.2 Necesidad o problemas expuestos por el cliente**

La interacción con el dueño del sistema es muy importante, pues ya puede tener un historial de eventos o identificados ciertos problemas, como fallas o daños en ciertos equipos, incremento en facturas de energía, paradas no programadas en ciertas líneas de producción, daños constantes en condensadores, reinicios de equipos electrónicos, etc. Esta información adicional puede guiar la medición y enfocarla para caracterizar de manera más asertiva el sistema eléctrico.

### **2.1.3 Punto óptimo de conexión**

Cuando el tema es más puntual, el punto de conexión, la configuración del analizador y el tiempo de medición debe serlo también, debe ubicarse lo más cerca posible al equipo que se está afectando o a la fuente de los eventos.

Sin embargo, para mediciones de un sistema en general es recomendable hacer la conexión en el lugar correcto para obtener datos confiables, en la (IEEE Std 519, 2014) muestran recomendaciones para mantener los niveles de distorsión dentro de los límites máximos aceptables en sistemas de potencia, siendo responsabilidad tanto del usuario como de la compañía suministradora de energía, la definición de este PCC (point of common coupling o punto común de conexión), debe ser dónde los otros usuarios se conectan al sistema de distribución de la compañía que suministra la energía, de esta manera al calcular el porcentaje máximo de armónicos permitido de acuerdo a la corriente de cortocircuito, no se obtengan valores superiores que puedan terminar en malas recomendaciones.

## **2.2 Guía para el análisis y la elaboración de un informe de medición de calidad de energía**

### **2.2.1 Informe**

El informe es el entregable, dónde se evidencia el comportamiento del sistema eléctrico en general, dicha medición depende también de las condiciones que se pactan con el cliente, como tiempos de medición, variables a medir y analizar, recomendaciones, etc.

Este debe contener información relevante, básicamente lo que se muestra a continuación:

#### **▪ Información General**

- Cliente
- Consecutivo de informe
- Ejecutor de la medición y/o análisis y revisión
- Fecha de la medición
- Contenido del informe

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### ▪ **Objetivos**

- Presente el objetivo de la medición: Resultados, observaciones, Recomendaciones

### ▪ **Alcance**

- Fecha de medición
- Tiempo de medición

### ▪ **Descripción del sistema eléctrico**

En esta sección es considerable el levantamiento de una información previa que permitirá al momento de analizar la información tener un análisis más asertivo y confiable, los datos más relevantes pueden ser:

- Razones por la cual se quiere monitorear el sistema eléctrico.
- Solicitar diagrama unifilar
- Características de los equipos: Placas de los transformadores, esquema de conexión del PCC (Punto de conexión común), niveles de tensión en el punto de conexión

### ▪ **Monitoreo realizado**

- Se indica la cantidad de puntos dónde fueron hechas las mediciones
- Equipos utilizados para la medición

### ▪ **Normatividad**

- Presente las normas usadas para el análisis de la información

### ▪ **Resumen de parámetros medidos**

Para dar una vista preliminar y global de los resultados, se recomienda mostrarlos en una tabla resumen, de esta forma es más fácil evidenciar dónde están las desviaciones y hacia dónde debe enfocarse el informe.

### ▪ **Análisis de la información**

En este punto, la información se debe presentar a detalle, con cada uno de los parámetros medidos o acordados con el cliente, Cada parámetro debe ser evaluado referenciándose

en la norma o normas que apliquen, o alguna norma que se concerte con el cliente para algún parámetro específico.

▪ **Conclusiones y recomendaciones**

- Evidencie datos relevantes de la medición
- Muestre las desviaciones encontradas
- Presente alarmas de factores que pueden no estar en desviación pero que requieran seguimiento
- Muestre las recomendaciones requeridas para mitigar o resolver los problemas encontrados

### **2.2.2 Análisis**

El análisis debe contener un resumen de los parámetros, la caracterización de cada parámetro con puntos relevantes como:

- Gráfica del parámetro, con colores que distingan fases, fecha y hora de medición en el eje X, y valores en el eje Y
- Valores máximos y mínimos medidos y de referencia
- Observaciones del comportamiento del parámetro medido
- Breve explicación del parámetro analizado
- Posibles causas y/o consecuencias de la desviación en caso que exista
- Recomendaciones para las desviaciones o hallazgos que permitan mejorar un punto específico o sistema eléctrico en general

## **2.3 Guía para el dimensionamiento de un banco de condensadores basado en la medición**

### **2.3.1 Caracterización del problema**

- Referencie los resultados de las mediciones con las normas pertinentes para evidenciar las desviaciones
- Estudie los valores máximos, mínimos y promedio característicos de la semana del parámetro con desviación

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

- Defina horas de los valores máximo y mínimos típicos en uno o varios días de la semana del parámetro con desviación, identificando las horas más críticas
- Identifique caídas en el valor del factor de potencia atípicos, por ejemplo, dados por interrupciones del suministro de energía del sistema, así evitar cálculos

### 2.3.2 Dimensionamiento del banco de condensadores

- Identifique el valor del factor de potencia, la potencia activa y reactiva actual del sistema en la medición
- Estipule el valor deseado de factor de potencia al que se desea llegar dónde indican un factor de potencia igual o superior a 0.90 según la (CREG 047, 2004).
- Calcule el ángulo de desfase del factor de potencia deseado según la ecuación (3).
- Calcule la potencia reactiva resultante usando la ecuación (5)
- Calcule la potencia del banco de condensadores restando la potencia reactiva resultante de la potencia reactiva actual del sistema como se define en la ecuación (6)
- Defina la ubicación del banco de condensadores según conveniencia, presupuesto y comportamiento del sistema
- Defina el tipo de banco según característica del sistema, este banco puede ser fijo, automático o mixto
- Elabore un esquema básico del banco de condensadores de acuerdo al comportamiento típico de sistema eléctrico, así se define qué pasos del banco pueden ser fijos y cuales automáticos
- Defina capacidad de las botellas según disponibilidad en el mercado y los cálculos realizados

## 2.4 Guía para la selección de un filtro de armónicos basado en la medición

### 2.4.1 Caracterización del problema

- Referencie los resultados de las mediciones con las normas pertinentes para evidenciar las desviaciones
- Estudie los valores porcentuales y de corriente máximos característicos de los armónicos individuales

### **2.4.2 Selección del filtro de armónicos**

- Calcule la corriente armónica del sistema identificando la corriente de cada armónico individual como se hace en la ecuación (8)
- Calcule la potencia armónica máxima del sistema usando la ecuación (9), para buscar la mitigación o eliminación de los armónicos presentes en el sistema,
- Tenga en cuenta un factor de servicio para ampliar el rango de mitigación del filtro de armónicos
- Identifique los armónicos individuales de mayor incidencia para concentrar el trabajo del filtro sobre estos
- Defina si el filtro requerido es pasivo o activo de acuerdo al comportamiento de los mismos en el sistema.
- Escoja el filtro de armónicos por disponibilidad del mercado más adecuado para eliminar o mitigar la distorsión armónica del sistema

## **3. Resultados - Aplicación de la metodología**

Usando como base lo descrito en el capítulo 2, se realiza la aplicación para la elaboración y análisis de un informe de calidad de energía, se incluirán dos mediciones, que contengan comportamientos y/o desviaciones diferentes para enriquecer el análisis. En cada medición se incluirán sólo los parámetros requeridos para el análisis de las desviaciones, en los anexos C y D, se encuentra la totalidad de los parámetros medidos y analizados.

### **3.1 Aplicación de la metodología de análisis y elaboración de un informe – Empresa 1**

#### **3.1.1 Objetivos**

Presentar los resultados del monitoreo de parámetros eléctricos realizado en el transformador con capacidad de 1250 kVA en EMPRESA 1; una vez analizados los resultados se emitirán observaciones y recomendaciones a las desviaciones halladas.

#### **3.1.2 Alcance de los trabajos**

El alcance de las actividades ejecutadas en campo realizadas desde el 23 de febrero hasta el 02 de marzo de 2020, este proyecto incluye:

Monitoreo de parámetros eléctricos por un periodo de 136,5 horas dónde el PCC se ubica aguas abajo del transformador

#### **3.1.3 Descripción del sistema**

El sistema eléctrico de la EMPRESA 1, parte de su sistema eléctrico es alimentado por un transformador de 1250 kVA, donde la tensión nominal de operación del sistema es de 500V/289V. Aguas abajo del transformador es donde se ubica el PCC.

### **3.1.4 Monitoreo realizado**

Los resultados se presentan en gráficas y tablas, en las que se realiza un análisis en el presente informe, observando el comportamiento de los parámetros de interés, como tensiones, corrientes, potencias, factor de potencia etc. Se realizó un (1) monitoreo con el analizador Fluke 435 S II

### **3.1.5 Medición**

Se realizó en el transformador de 1250 kVA. Con la realización del monitoreo se evalúan los parámetros eléctricos que puedan estar afectando el sistema de la empresa y/o sistema eléctrico de los diversos procesos desprendidos del punto de acople común.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

**3.1.6 Resumen de parámetros eléctricos**

El análisis se realizó aguas abajo del transformador de 1250 kVA con salida de 500/289 V donde a partir de ahora se denominará el PCC (punto de conexión o acople común). Se presenta un resumen de los parámetros medidos y resaltado en rojo los parámetros con desviaciones (Tabla 3-1).

**Tabla 3-1:** Resumen de parámetros eléctricos medidos.

Parámetro medido	FASE	Mínimo	Promedio	Máximo
Tensiones de estado estable [V]	L1	265,900	281,439	291,900
	L2	264,200	279,038	289,900
	L3	265,100	279,756	290,600
Corriente [A]	L1	107,400	526,006	1240,000
	L2	104,400	507,813	1224,000
	L3	115,600	525,169	1242,000
Frecuencia [Hz]		59,940	60,000	60,060
Distorsión Armónica en tensión THDV [%]	L1	1,673	3,070	4,916
	L2	1,578	3,064	4,936
	L3	1,700	2,951	4,808
Distorsión Armónica en corriente THDI [%]	L1	4,9	9,6	24,2
	L2	5,1	9,5	23,9
	L3	4,8	8,9	21,3
Distorsión Total en Demanda TDD [%]			6,034	
Potencia Aparente [kVA]		101,257	470,935	1097,211
Potencia Activa [kW]		39,960	360,437	910,700
Potencia Reactiva [kVar]		0,000	232,028	611,965
Factor de potencia [p.u]		<b>-0,82</b>	<b>-</b>	<b>0,82</b>
Desbalance en tensión [%]		0,136	0,520	1,078
Desbalance en corriente [%]		0,000	0,003	0,021

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.1.7 Análisis de la información de la medición

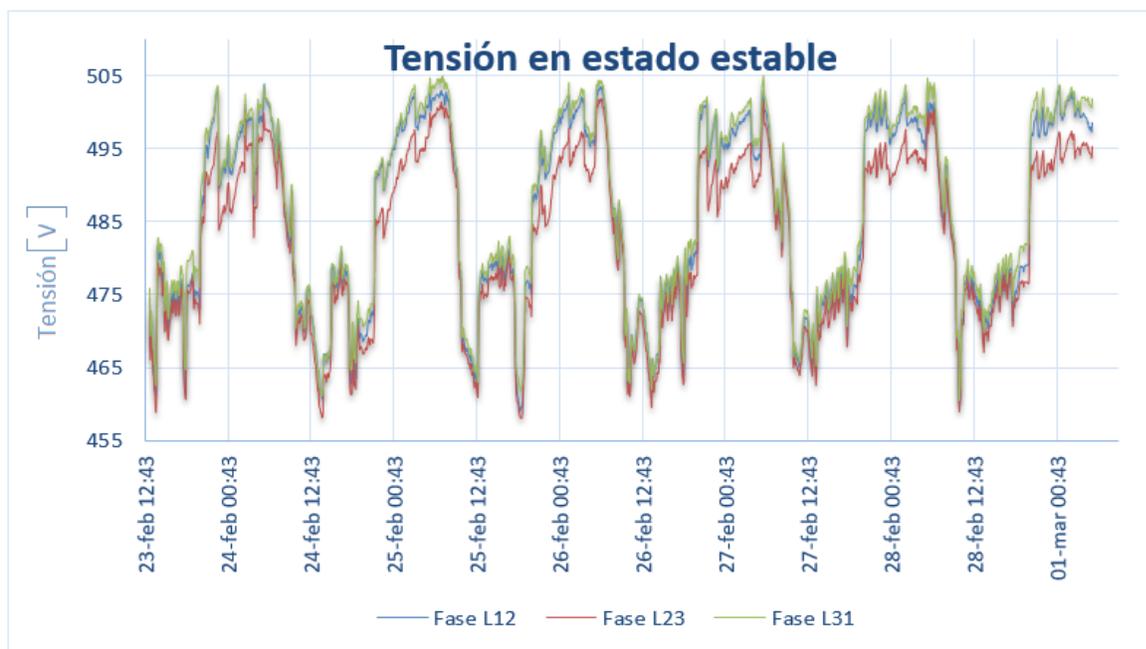
En el presente informe se mostrarán los parámetros requeridos para el análisis del factor de potencia, dado que este parámetro es el que presenta desviación.

### 3.1.8 Tensión en estado estable

Según la NTC 5001 los valores de tensión en estado estable son  $\pm 10\%$  de la tensión nominal, durante el monitoreo se registraron valores de tensión en la acometida principal que variaron entre 458 V y 504.9 V. Estos valores se consideran aceptables, dado que la tensión nominal en la salida es 500 VL-L.

En la Figura 3-1 se muestra el comportamiento de las tensiones del sistema; las tensiones más bajas presentadas se dieron cuando entró en operación la mayor parte de equipos de la compañía, entre las 23:30 y las 9:30. No se presentaron perturbaciones de tensión momentáneas durante la medición que estén sobre o bajo del límite permitido.

**Figura 3-1:** Perfil de tensión de línea en estado estable.



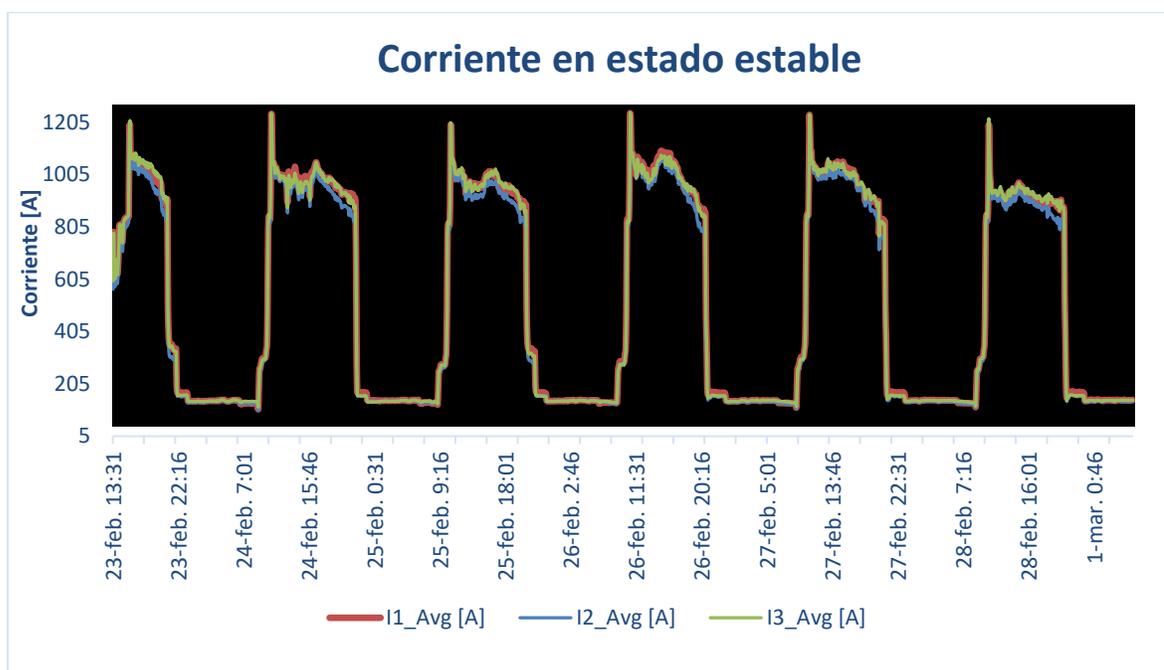
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.1.9 Corriente

En la siguiente figura (Figura 3-2) se observa que el valor máximo de corriente registrado durante el monitoreo en el punto de medido fue 1242,0 A, debido posiblemente a los equipos de gran capacidad en los diferentes procesos, sin embargo, se puede observar que sigue por debajo de la corriente nominal del transformador 1444 A. Este comportamiento de la corriente es similar en cada uno de los días de la medición, mostrando los valores pico entre las 9:30 hasta las 21:30 aproximadamente, esta característica de carga se va a ver reflejado en los demás parámetros como la potencia, factor de potencia, armónicos, etc.

**Figura 3-2:** Perfil de corriente en estado estable.



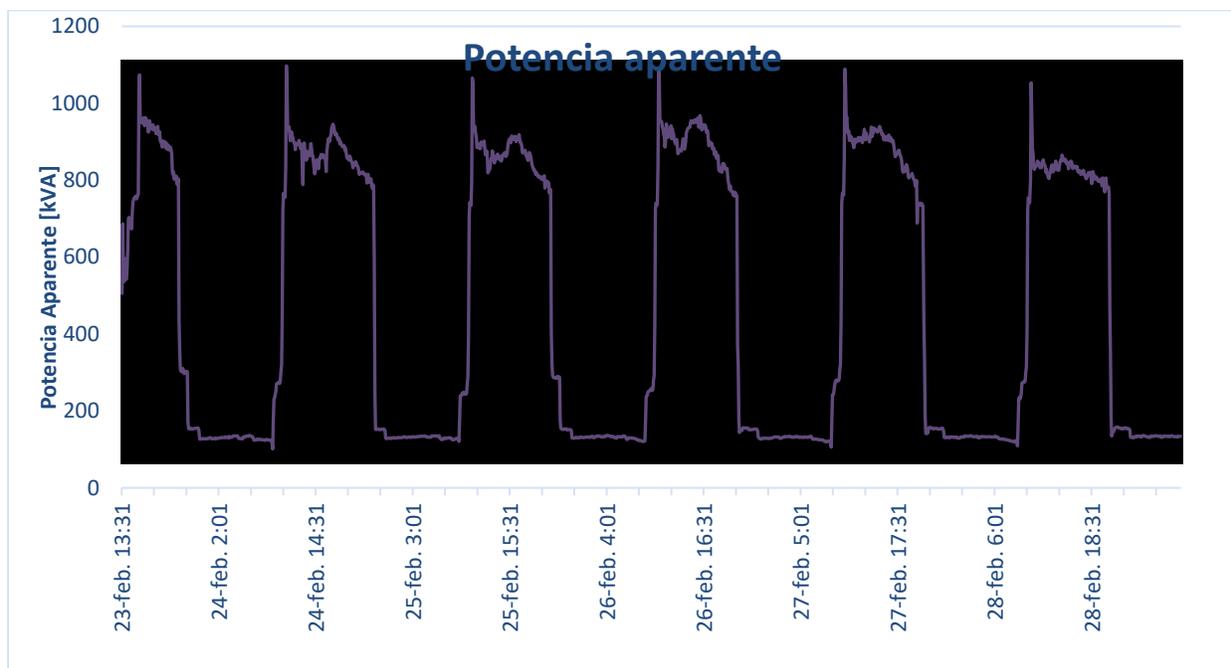
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.1.10 Potencia aparente

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 1097,21 kVA a plena carga; el transformador es de 1250 kVA, por lo que su cargabilidad está en un 87,77%, esto muestra una cargabilidad **Aceptable**, óptima para el rendimiento del transformador y con disponibilidad para más carga. El comportamiento de picos y valles es acorde a la carga registrada en el sistema (Figura 3-2).

**Figura 3-3:** Perfil de potencia aparente.



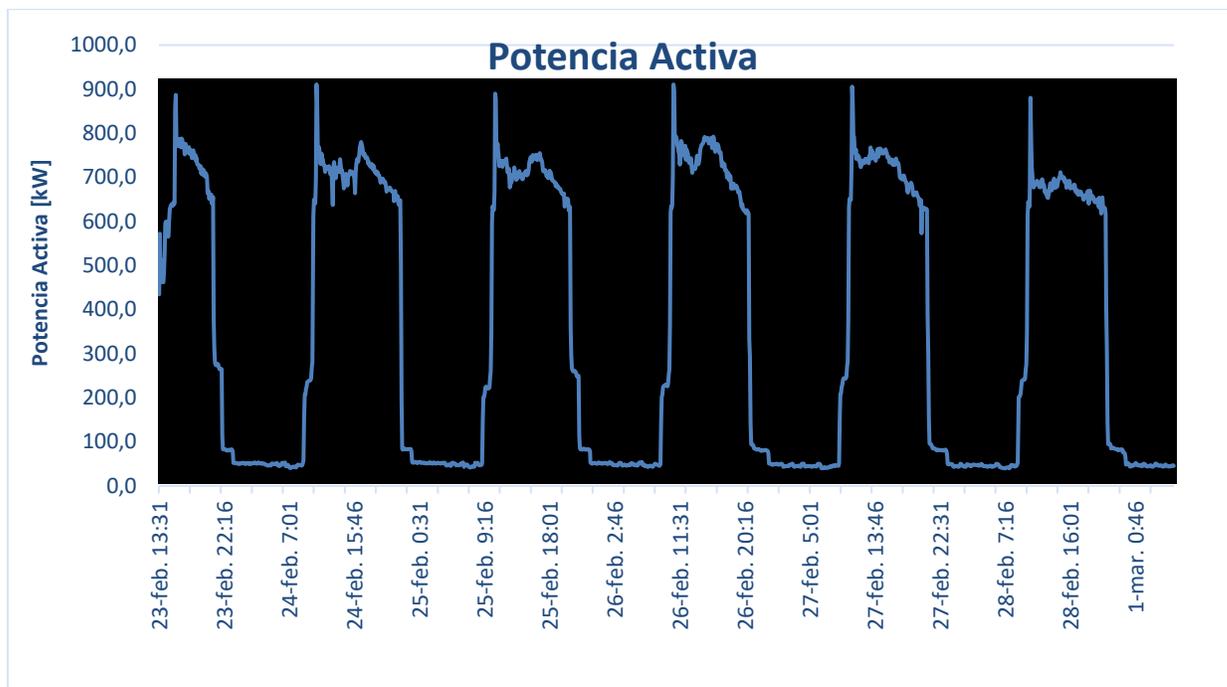
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

**3.1.11 Potencia activa**

Se puede observar en la Figura 3-4 que la potencia activa promedio máxima registrada fue de 910,7 kW a plena carga, se observa normalidad en el comportamiento conforme a la carga registrada.

**Figura 3-4:** Perfil de potencia activa.

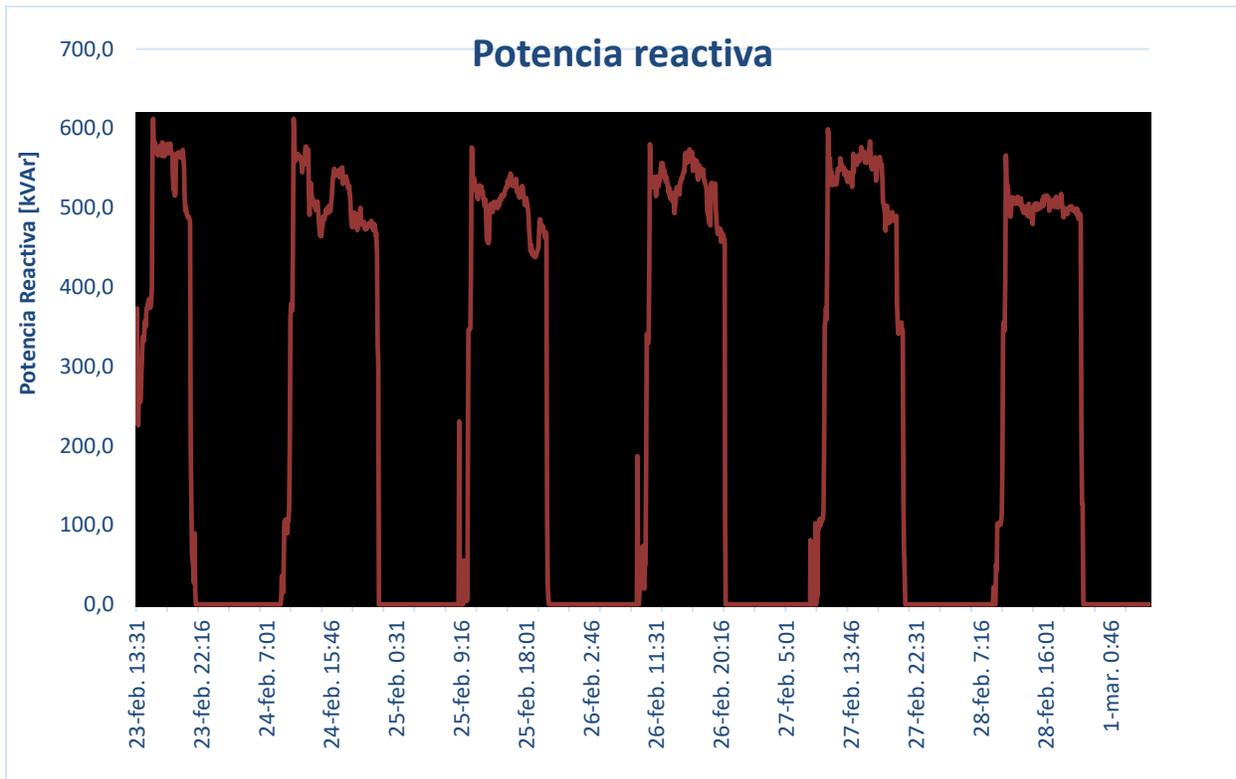


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.12 Potencia reactiva

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 611,965 kVAR a plena carga, lo que supera el 50% de la carga activa por lo tanto presenta penalización basándose en la (CREG 108, 1997)/ Factor de potencia, que indica que si la energía reactiva es mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida, el exceso sobre este límite, se considerará como consumo de energía activa para la factura. La potencia reactiva por encima del 50% es de 156,61 kVAR, que pueden ser facturados como consumo activo (Figura 3-5).

**Figura 3-5:** Perfil de potencia reactiva.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

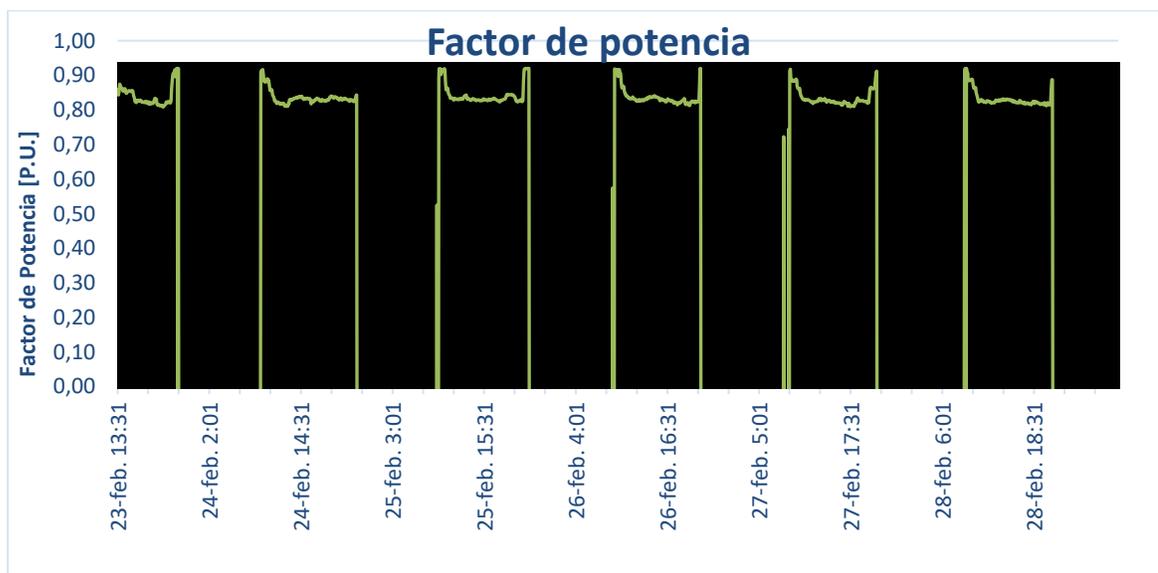
## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.1.13 Factor de potencia

Es la relación entre la potencia útil consumida por una carga y la potencia aparente del mismo. El factor de potencia puede ser Inductivo (+) o puede ser capacitivo (-). La Norma técnico colombiana NTC 5001 recomienda que, bajo operación normal, el factor de potencia debe permanecer entre 0,9 y 1 para factor de potencia inductivo y entre 0,9 y 1 para factor de potencia capacitivo durante el 95% de la operación. Los valores que se encuentran por debajo de 0,9 normalmente es causado por exceso de demanda de potencia reactiva en un sistema eléctrico producido por equipos inductivos como hornos, motores, generadores, entre otros.

En el monitoreo, se registraron valores de factor de potencia promedio de 0,82 lo que indica que este valor **no es aceptable**. Es recomendable instalar un banco de condensadores para realizar la compensación reactiva del sistema. En la Figura 3-6 se muestra el comportamiento de este parámetro durante el monitoreo.

**Figura 3-6:** Perfil de factor de potencia.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.14 Conclusiones de la medición

Como resultado del análisis de los parámetros eléctricos se tienen las siguientes conclusiones.

- El comportamiento típico del lugar muestra entrada de equipos inductivos entre las 22:00 y las 11:00, generando un aumento de la potencia reactiva; este comportamiento puede generar multas por tener un factor de potencia por debajo de 0,9 y puede de igual manera aumentar el consumo energético del lugar.
- El comportamiento de los niveles de tensión en estado estable estuvo en óptimas condiciones. Las variaciones de la tensión con duración mayor a 1 minuto, no registran valores que se encuentren por fuera del  $\pm 10\%$  de la tensión nominal del punto de conexión común (PCC).
- La corriente no registra valores por fuera de la capacidad nominal del conductor, y los desbalances de corriente no están fuera de valores aceptables para la alimentación eléctrica de las cargas trifásicas del lugar.
- Los armónicos de tensión y corriente no muestran desviaciones o valores representativos que afecten el factor de potencia.

### 3.1.15 Recomendaciones de la medición

- Se recomienda instalar un banco de condensadores que compense el desfase mientras los equipos se encuentran en operación, dado que se observa una potencia reactiva alta y un factor de potencia por debajo de 0,9 lo que puede acarrear multas en la factura de energía.
- Es recomendable hacer una inspección de termografía a todo el sistema eléctrico de la planta, incluyendo tableros, banco de condensadores, ya que, con la identificación y corrección de puntos calientes, se puede mejorar la calidad de energía del sistema, evitando desbalances, fallas y demás por falsos contactos, además de otras consecuencias derivadas de dichos puntos calientes
- Es recomendable que la subestación disponga de un diagrama unifilar del sistema eléctrico tal como lo establece el RETIE en el artículo 10; Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas.

## **3.2 Aplicación de la metodología de análisis y elaboración de un informe – Empresa 2**

### **3.2.1 Objetivos**

Presentar los resultados del monitoreo de parámetros eléctricos realizado en el transformador con capacidad de 400 kVA en EMPRESA 2; una vez analizados los resultados se emitirán observaciones y recomendaciones a las desviaciones halladas.

### **3.2.2 Alcance de los trabajos**

El alcance de las actividades ejecutadas en campo realizadas desde el 08 de marzo hasta el 15 de marzo de 2020, este proyecto incluye:

Monitoreo de parámetros eléctricos por un periodo de 161 horas dónde el PCC se ubica aguas abajo del transformador

### **3.2.3 Descripción del sistema**

El sistema eléctrico de la EMPRESA 2, parte de su sistema eléctrico es alimentado por un transformador de 400 kVA, donde la tensión de operación del sistema es de 216/125 V. Aguas abajo del transformador es donde se ubica el PCC.

### **3.2.4 Monitoreo realizado**

Los resultados se presentan en gráficas y tablas, en las que se realiza un análisis en el presente informe, observando el comportamiento de los parámetros de interés, como tensiones, corrientes, potencias, factor de potencia etc. Se realizó Un (1) monitoreo con el analizador Fluke 435 S II

### **3.2.5 Medición**

Se realizó en el transformador de 400 kVA. Con la realización del monitoreo se evalúan los parámetros eléctricos que puedan estar afectando el sistema de la empresa y/o sistema eléctrico de los diversos procesos desprendidos del punto de acople común.

### 3.2.6 Resumen de parámetros eléctricos

El análisis se realizó aguas abajo del transformador de 400 kVA con salida de 216/125 V donde a partir de ahora se denominará el PCC (punto de conexión o acople común). Se presenta un resumen de los parámetros medidos y resaltado en rojo los parámetros con desviaciones (Tabla 3-2).

**Tabla 3-2:** Resumen de parámetros eléctricos medidos.

Parámetro medido	FASE	Mínimo	Promedio	Máximo
Tensiones de estado estable [V]	L1	204,500	211,829	216,900
	L2	202,800	211,011	216,400
	L3	202,900	210,002	215,400
Corriente [A]	L1	15,160	143,888	424,500
	L2	11,800	136,579	436,000
	L3	8,256	108,405	393,500
Frecuencia [Hz]		59,950	60,001	60,050
Distorsión Armónica en tensión THDV [%]	L1	1,205	1,883	3,652
	L2	1,184	1,950	3,810
	L3	1,108	1,857	3,525
Distorsión Armónica en corriente THDI [%]	L1	6,8	17,8	26,4
	L2	5,2	17,6	27,3
	L3	5,4	19,2	37,8
Distorsión Total en Demanda TDD [%]			<b>18,937</b>	
Potencia Aparente [kVA]		4,713	46,659	151,200
Potencia Activa [kW]		4,470	45,332	145,600
Potencia Reactiva [kVar]		0,000	10,594	41,080
Factor de potencia [p.u]		-1,000	0,966	1,000
Desbalance en tensión [%]		0,091	0,520	1,004
Desbalance en corriente [%]		0,000	0,003	0,025

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

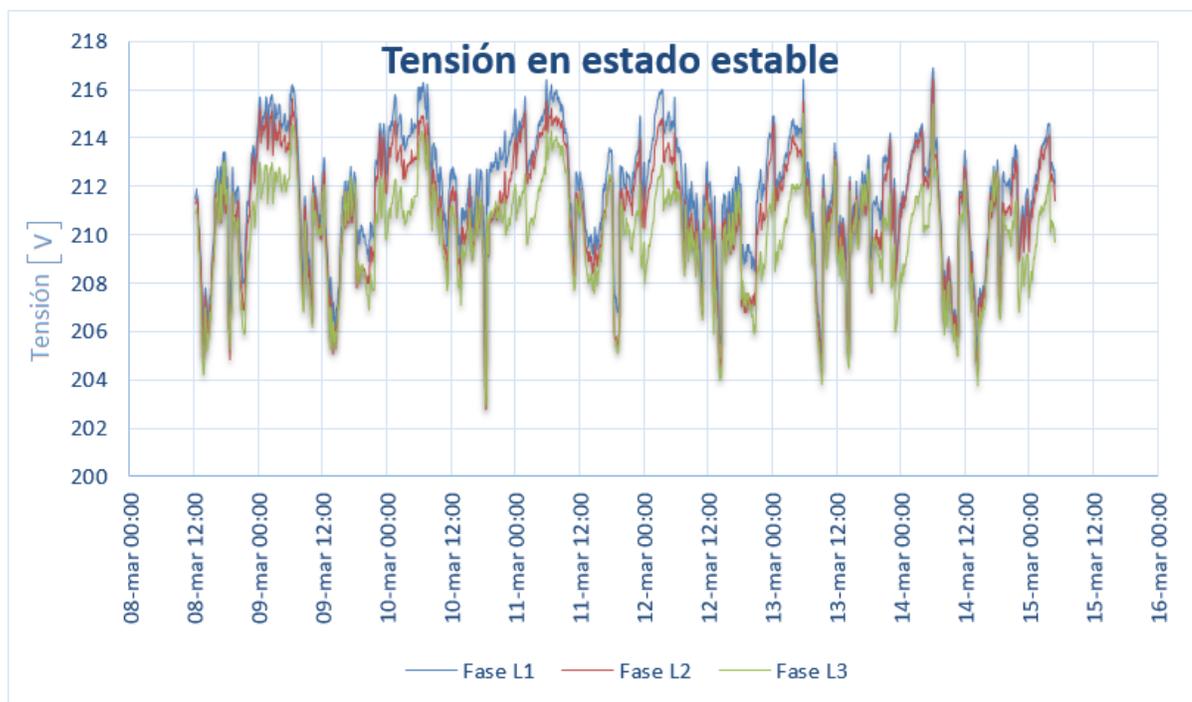
### 3.2.7 Análisis de la información de la medición

En el presente informe se mostrarán los parámetros requeridos para el análisis de armónicos, dado que este parámetro es el que presenta desviación.

### 3.2.8 Tensión en estado estable

Según la NTC 5001 los valores de tensión en estado estable son  $\pm 10\%$  de la tensión nominal, durante el monitoreo se registraron valores de tensión en la acometida principal que variaron entre 216,9 V y 202,8 V. Estos valores se consideran aceptables, dado que la tensión nominal en la salida es 216 VL-L. En la Figura 3-7 se ilustra el comportamiento de las tensiones del sistema; las tensiones más bajas presentadas se dieron cuando entró en operación la mayor parte de equipos de la compañía, sin embargo, no se presentaron desviaciones de tensión por grandes entradas de carga o perturbaciones momentáneas durante la medición que estén sobre o bajo del límite permitido.

**Figura 3-7:** Perfil de tensión de línea en estado estable.

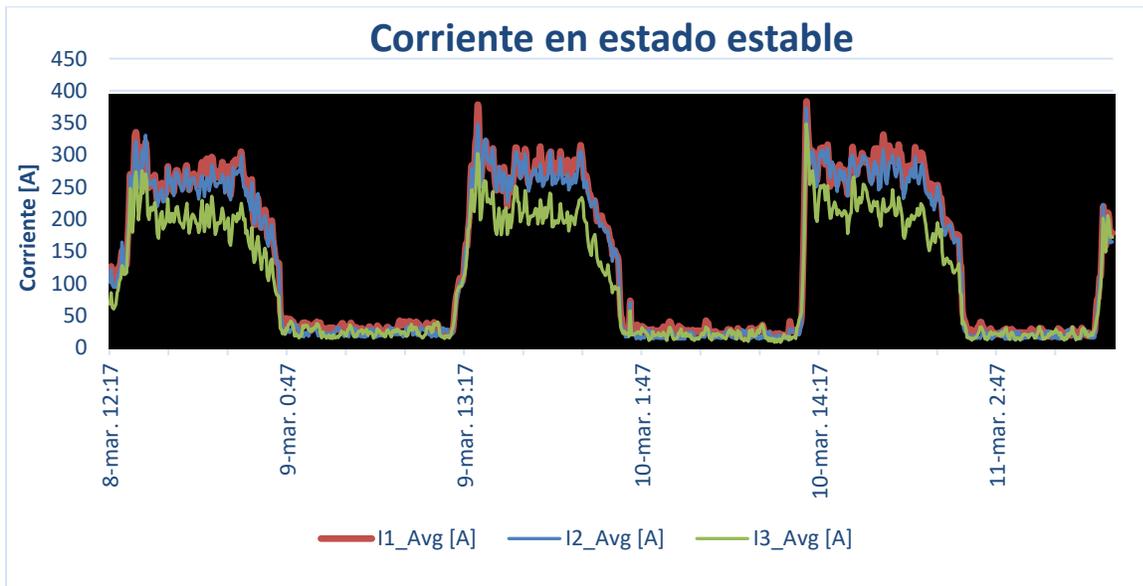


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.9 Corriente

Durante el monitoreo la corriente máxima registrada fue de 380 A, la corriente máxima soportada por el conductor de 500 A lo que no implica inconvenientes y el valor de corriente promedio durante los momentos de carga fue de 260 A, se puede observar que sigue por debajo de la corriente nominal del transformador 1070 A. Este comportamiento de la corriente es similar en cada uno de los días de la medición, mostrando los valores pico entre las 13:00 hasta las 01:00 aproximadamente, esta característica de carga se va a ver reflejado en los demás parámetros como la potencia, factor de potencia, armónicos, etc. (Figura 3-8).

**Figura 3-8:** Perfil de corriente en estado estable.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### **3.2.10 Distorsión armónica en forma de onda**

Para que se considere como distorsión armónica, las deformaciones en una señal, debe cumplir algunas condiciones como que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, esto indica que la energía evaluada es finita, que la señal periódica, conteniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de parámetros de tensión y corriente además que sea permanente, que se presente en cualquier instante de tiempo, en pocas palabras, que esta no sea esporádica.

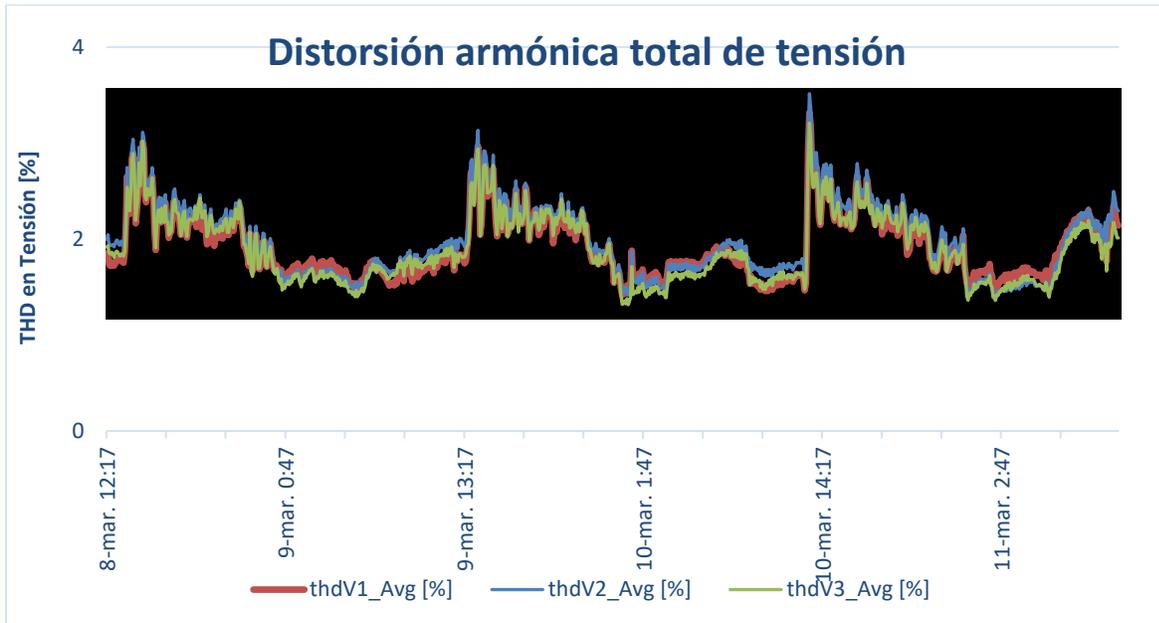
La calidad de la onda eléctrica se evalúa a través de los siguientes parámetros; tasa de distorsión armónica total en tensión (THDv) y tasa de distorsión armónica en corriente demandada (TDD).

### **3.2.11 Distorsión armónica total en tensión (THDv)**

Los armónicos de tensión son ondas sinusoidales donde las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), causados normalmente por dispositivos cuya característica de tensión y corriente no es lineal.

La IEEE 519 del 2014 tiene como límite de referencia **8%** para la distorsión armónica total en tensión en estado estable, para tensiones menores a 1 kV. De acuerdo a los datos del monitoreo al calcular los porcentuales al 95 % de los valores de distorsión armónica total de tensión (THDv) se obtiene como resultado **2.242 %** como se ve en la Figura 3-9.

**Figura 3-9:** Distorsión armónica total de tensión.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

Este comportamiento indica que el valor se encuentra **dentro** del rango permitido por la norma así como se indica en la Tabla 3-3, dado que el valor máximo permitido para tensiones menores o iguales a 1000 V es de 8%.

**Tabla 3-3:** Límite de distorsión de tensión para sistemas desde 120V hasta > 161 kV.

Rango de Tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica Total- THDv (%)
V ≤ 1.0 kV	5,0	8,0
1 kV < Vn ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < Vn ≤ 161 kV	1,5	2,5
Vn ≥ 161 kV	1,0	1,5

*Nota. Fuente: Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 6)*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

**3.2.12 Distorsión total de la demanda (TDD)**

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante también es baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma (IEEE Std 519, 2014).

Para este caso tomando el valor de corriente de corto circuito **I<sub>cc</sub>: 16,97 kA** del transformador y una corriente 95 percentil en estado estable de 260 A, de esta manera es posible determinar la relación **I<sub>sc</sub>/I<sub>L</sub>: 61,48**; relacionando este valor en la tabla de límites en la distorsión de la corriente de la Tabla 3-4, como lo recomienda la (IEEE Std 519, 2014), para tensiones entre 120 V – 69000 V, se observa:

**Tabla 3-4:** Límites de distorsión armónica de corriente.

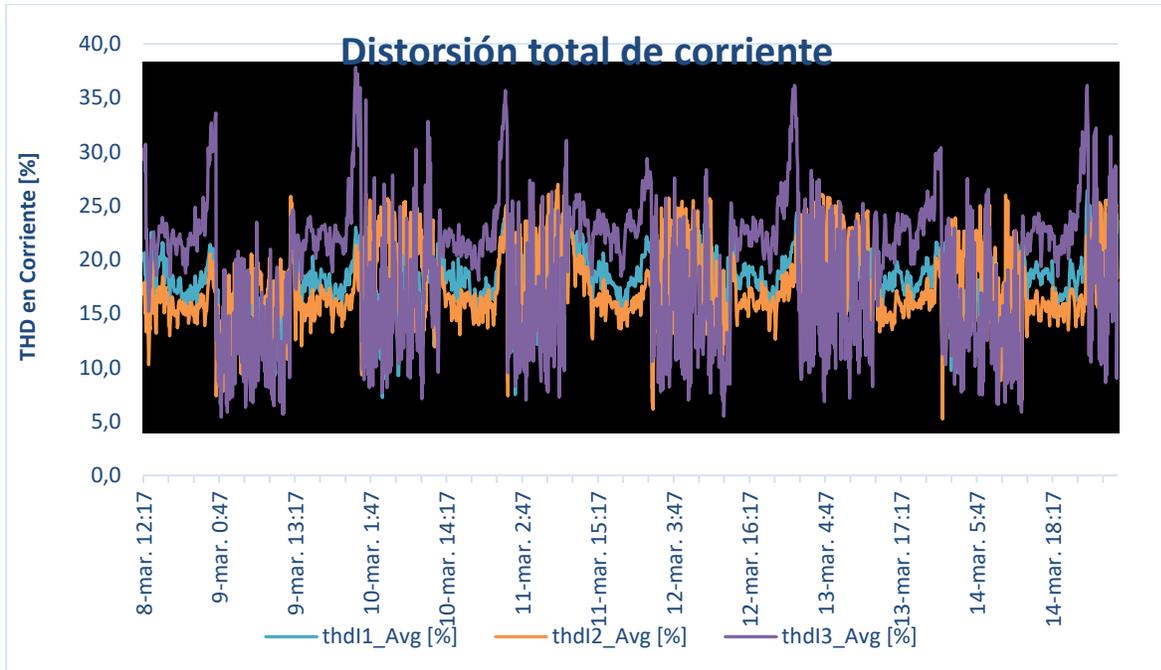
Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120V < V <sub>n</sub> ≤ 69kV						
Relación	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	11	17	23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

*Nota. Fuente: Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 7)*

Que el valor máximo de TDD que debe tomar este sistema es de **12%**. El resultado obtenido para este parámetro en el punto de probabilidad del 95%, fue de **18,93%**, lo anterior indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema se encuentra **por fuera** del límite máximo permitido.

Las posibles causas de la distorsión armónica en este punto común de conexión pueden ser por la presencia de cargas no lineales de origen electrónico, estas cargas no consumen corriente de forma progresiva, su consumo en momentos es alto y repentino como se ve en la Figura 3-10.

**Figura 3-10:** Forma de onda de corriente armónica.



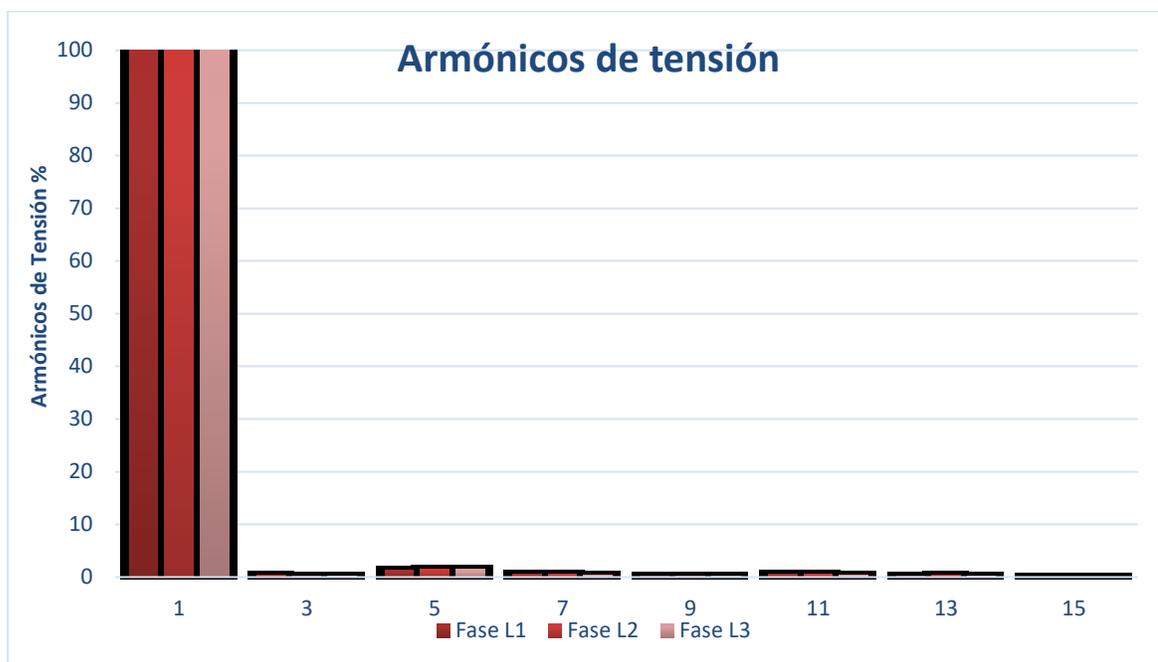
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.2.13 Armónicos individuales

En las siguientes ilustraciones en barras se representa el porcentaje de armónicos individuales impares de tensión (Figura 3-11) y corriente (Figura 3-12) con respecto a la fundamental.

**Figura 3-11:** Armónicos individuales de tensión.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 3-5:** Armónicos de tensión.

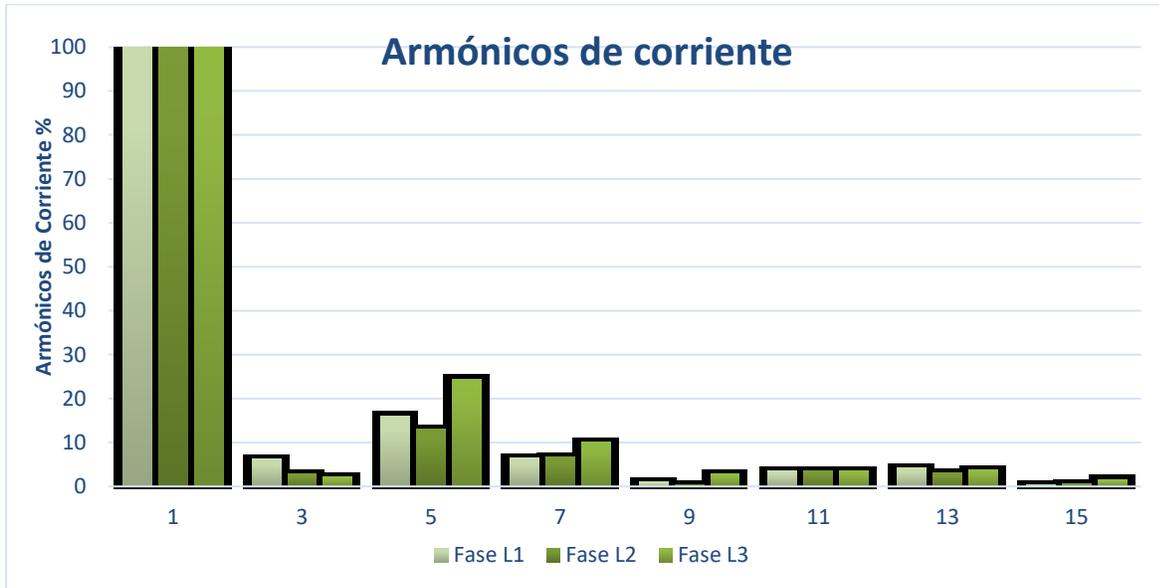
Armónicos				% THD voltaje total	IEEE std 519 - 2014
3 th	5 th	7 th	9 th	Promedio	
0,31	1,30	0,48	0,16	2,24	Si cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

El armónico de tensión de mayor influencia es el 5° con un valor del 1,30 % como se denota en la Tabla 3-5, la cual se encuentra **DENTRO** de lo recomendado por el estándar como límite máximo de distorsión por componente armónico individual de voltaje de 5% y se valora como **Si cumple**.

El armónico individual de corriente de mayor influencia es el 5° con un valor de 16,08 % (Figura 3-12), lo que indica que se encuentra **POR FUERA** de lo recomendado por el estándar que tiene como límite máximo de distorsión por componente armónica individual de corriente el 10% para el nivel de relación  $I_{sc}/I_n$ .

**Figura 3-12:** Armónicos individuales de corriente.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

En la tabla se muestra el porcentaje de armónicos individuales dónde se evidencia los demás armónicos por debajo del máximo permitido que es 10% a excepción del armónico 5°, la valoración en la tabla es **No cumple**.

**Tabla 3-6:** Análisis armónico de corriente.

SCR= $I_{sc}/I_n$	Armónicos					IEEE std 519 - 2014	% TDD corriente total	IEEE std 519 - 2014
	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th			
61,48	6,18	16,08	6,51	0,97	3,61	No cumple	18,93	No cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

### 3.2.14 Conclusiones de la medición

Como resultado del análisis de los parámetros eléctricos se tienen las siguientes conclusiones.

- El comportamiento de los niveles de tensión en estado estable estuvo en óptimas condiciones. Las variaciones de la tensión con duración mayor a 1 minuto, no registran valores que se encuentren por fuera del  $\pm 10\%$  de la tensión nominal del punto de conexión común (PCC).
- El nivel de distorsión armónica en corriente fue de 18,93 %, lo que nos indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema, se encuentra **por fuera del intervalo** establecido por la norma (12% para este nivel de relación  $I_{sc}/I_n$ )
- Los armónicos individuales de corriente presentan una desviación, pues el 5° armónico muestra un porcentaje de 16.08 %, cuando el máximo permitido es de 10%. Estos armónicos tienen muchas implicaciones en motores eléctricos pues son de secuencia negativa, lo que representa que se cree un campo magnético inverso que tiende a frenar el equipo y aumentar la demanda de corriente, pues la potencia que debe entregar es la misma, también a disminuir la vida útil del aislamiento del motor, pues trabajará a mayores temperaturas.

### 3.2.15 Recomendaciones en la medición

- Se recomienda instalar un filtro de armónicos, para la eliminación o mitigación de los mismos, así evitar penalizaciones por reinyección de armónicos al sistema, como también evitar daños en equipos, paradas no programadas por disparo de protecciones, evitar errores en equipos electrónicos sensibles, etc.
- Se recomienda hacer una inspección de termografía a todo el sistema eléctrico de la planta, incluyendo tableros, banco de condensadores, ya que, con la identificación y corrección de puntos calientes, se puede mejorar la calidad de energía del sistema, evitando desbalances, fallas y demás por falsos contactos, además de otras consecuencias derivadas de dichos puntos calientes.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

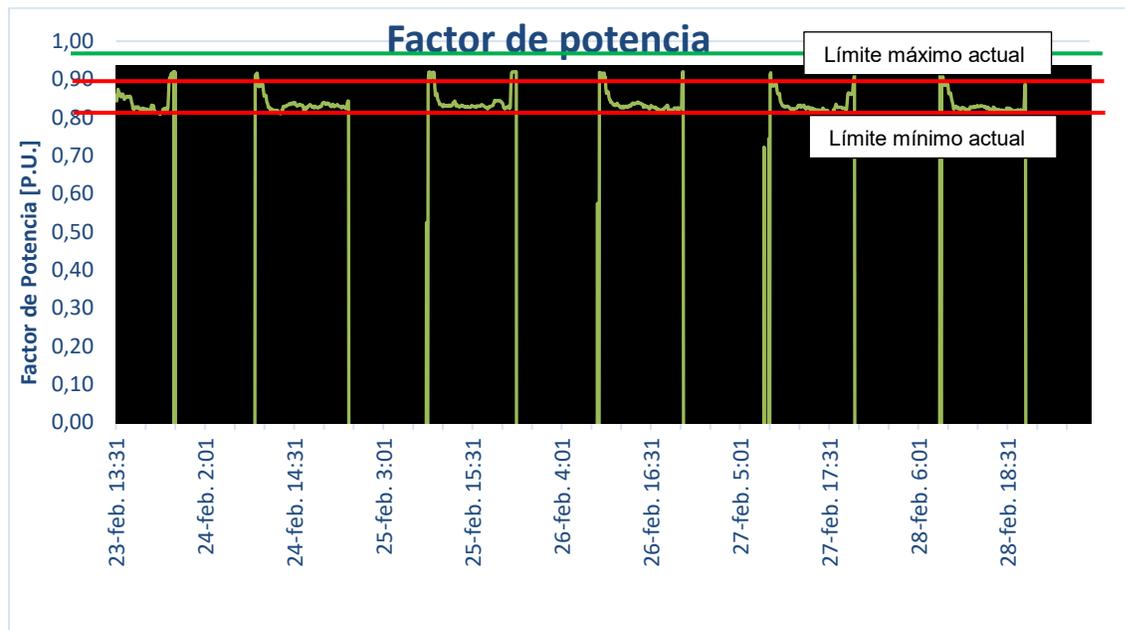
- Se recomienda que la subestación disponga de un diagrama unifilar del sistema eléctrico tal como lo establece el RETIE en el artículo 10; Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas.

### 3.3 Aplicación de la metodología para el dimensionamiento del banco de condensadores

Para esta sección se tomará como base para el cálculo, los datos obtenidos de la medición en la Empresa 1, dónde se evidenciaron valores por debajo de 0,9 del factor de potencia y se mostrará el paso a paso para el dimensionamiento del mismo.

En la medición de la Empresa 1, se evidenciaron problemas de factor de potencia como se ilustra en la **Figura 3-13**.

**Figura 3-13:** Curva característica de factor de potencia.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

En la curva característica de FP en la medición se evidencia que el factor de potencia está muy por debajo del mínimo permitido por la (CREG 047, 2004), que estipula como valor mínimo 0,90, el sistema tiene como FP:

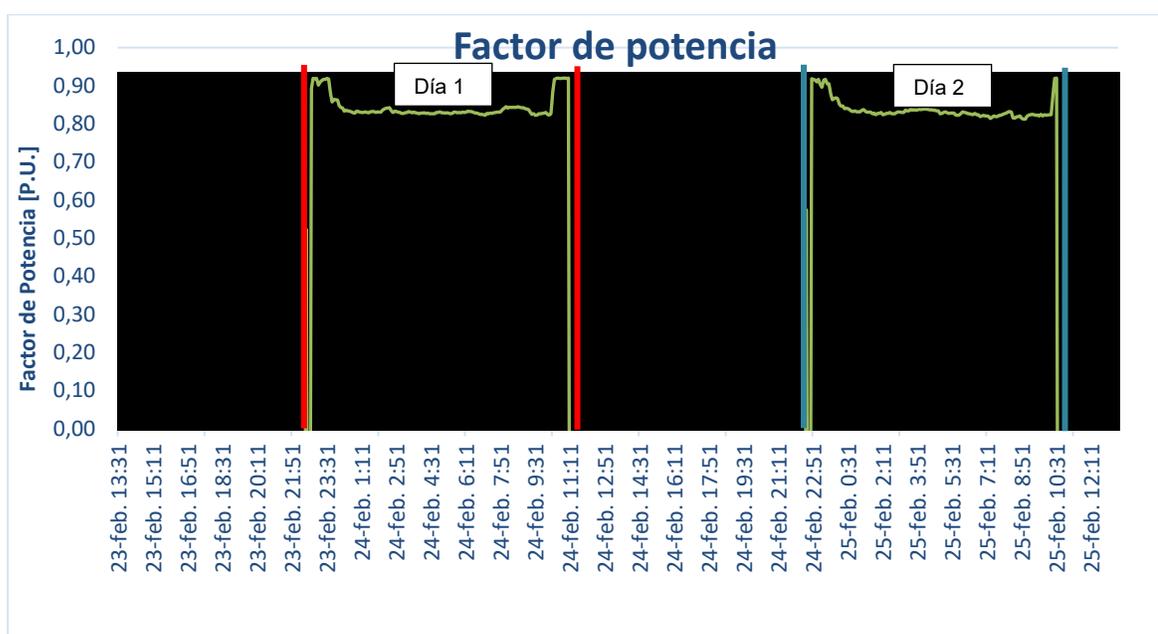
- El valor máximo de la medición

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

- FP: 0,92
- El valor mínimo de la medición
  - FP: 0,83

Analizando el comportamiento detalladamente, se observa que tiene una característica repetitiva en la mayoría de los días, para este caso se hace una verificación en dos días con comportamientos similares como se ve a continuación:

**Figura 3-14:** Curva de factor de potencia de dos días de la semana.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

Se evidencia lo siguiente:

- Día 1

Valores pico: 0,92 Desde las 22:00 a 23:30 y 09:30 a 11:00

Valores promedio: 0,83 Desde las 23:30 hasta las 09:30

- Día 2

Valores pico: 0,92 Desde las 22:00 a 23:30 y 10:00 a 10:30

Valores promedio: 0,83 Desde las 23:30 hasta las 10:00

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

Esta identificación va a permitir establecer la mejor configuración y tipo de banco de condensadores requerido para suplir la necesidad de acuerdo al comportamiento de carga de equipos inductivos en la compañía.

A continuación, se deben desarrollar los cálculos de la capacidad requerida del banco de condensadores para aumentar el FP del sistema, se determinarán cálculos para los valores más altos y los más bajos.

Como la resolución indica un factor de potencia igual o superior a 0.90 (CREG 047, 2004), en este proyecto se va a estipular como valor deseado un FP de 0,93 que será llamado FP<sub>2</sub>.

Datos actuales para factor de potencia:

$$FP = 0,83 \text{ promedio}$$

$$P_1 = 910,7 \text{ kW}$$

$$S_1 = 1097,21 \text{ kVA}$$

$$Q_1 = 611,965 \text{ kVAR}$$

Calculando el ángulo con el factor de potencia actual se obtiene:

$$FP_1 = 0,83$$

$$\cos \theta_1 = 0,83$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} 0,83$$

$$\theta_1 = 33,90^\circ$$

Ahora se debe calcular la potencia aparente y potencia reactiva teórica con el FP = 0.93.

Datos actuales:

$$FP = 0,93$$

$$P_2 = 910,7 \text{ kW}$$

$$S_2 = \frac{P}{\cos \theta_2} \quad (1)$$

$$Q_2 = S_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

Calculando el ángulo con el factor de potencia deseado se obtiene:

$$FP = 0,93$$

$$\cos \theta_2 = 0,93$$

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \text{Cos}^{-1} 0,93 \\ \theta_2 &= 21,56^\circ\end{aligned}\quad (3)$$

Calculando la potencia aparente de la ecuación (1), se obtiene:

$$\begin{aligned}S_2 &= \frac{910,7 \text{ kW}}{\text{Cos } 21,56} \\ S_2 &= \mathbf{979,21 \text{ kVA}}\end{aligned}\quad (4)$$

Calculando la potencia reactiva  $Q_2$  se obtiene:

$$\begin{aligned}Q_2 &= S_2 \text{ Sen } \theta_2 \\ Q_2 &= 979,21 \text{ kVA Sen } 21,56 \\ Q_2 &= 979,21 \text{ kVA Sen } 21,56 \\ Q_2 &= \mathbf{359,83 \text{ kVAR}}\end{aligned}\quad (5)$$

Se calcula la potencia del banco de condensadores con los valores menos críticos de FP con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}Q_C &= Q_1 - Q_2 \\ Q_C &= 611,965 \text{ kVAR} - 359,83 \text{ kVAR} \\ Q_C &= \mathbf{252,135 \text{ kVAR}}\end{aligned}\quad (6)$$

Se obtiene como resultado una capacidad del banco de condensadores de 252,13 kVAR, para los valores menos críticos dada la medición, normalizando, la potencia sería de 250 kVAR.

Se procede a calcular la corriente total del banco de condensadores, teniendo en cuenta que el transformador tiene como características nominales una potencia aparente de 1250 kVA, y tensión nominal de operación en el secundario de 500 V/289 V.

Teniendo como corriente del banco de condensadores el siguiente resultado:

$$\begin{aligned}I_L &= \frac{Q_t}{\sqrt{3} \times V_t} \\ I_L &= \frac{252,135 \text{ VAR}}{\sqrt{3} \times 500 \text{ V}} \\ I_L &= 290,98 \text{ A}\end{aligned}\quad (7)$$

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

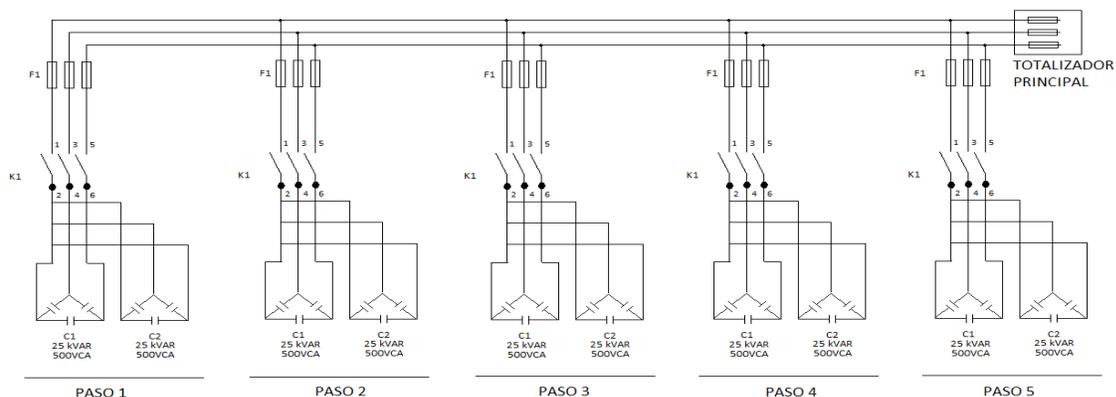
La compensación trifásica usualmente trabaja con la conexión en paralelo, ahora bien, la ubicación puede disponerse a cada equipo inductivo, o en grupos que tengan potencias de consumo y tiempos de trabajo similares, sin embargo, para este caso real, se trabajará con una **compensación central**, que requiere a su vez un banco inteligente, automático, que pueda manejar diferentes potencias y tiempos de trabajo.

El banco de condensadores tiene muchas configuraciones de acuerdo a la característica del sistema eléctrico, sin embargo, un diseño típico se contiene los siguientes elementos:

- Gabinete o tablero
- Interruptor principal
- Barraje o cables de fuerza
- Interruptores o fusibles de protección para cada paso
- Contactores
- Condensadores
- Barraje de puesta a tierra
- Módulo de regulación de factor de potencia
- Selector de posiciones para el control manual del banco
- Pilotos indicadores de pasos activos

En la Figura 3-15 se ilustra el esquema eléctrico básico de conexión de un banco de condensadores de 5 pasos; dónde se tiene una protección principal, se tienen protecciones trifásicas para cada paso, un contactor y dos condensadores de 25 kVAR por paso.

**Figura 3-15:** Esquema eléctrico básico de Banco de condensadores de 5 pasos.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

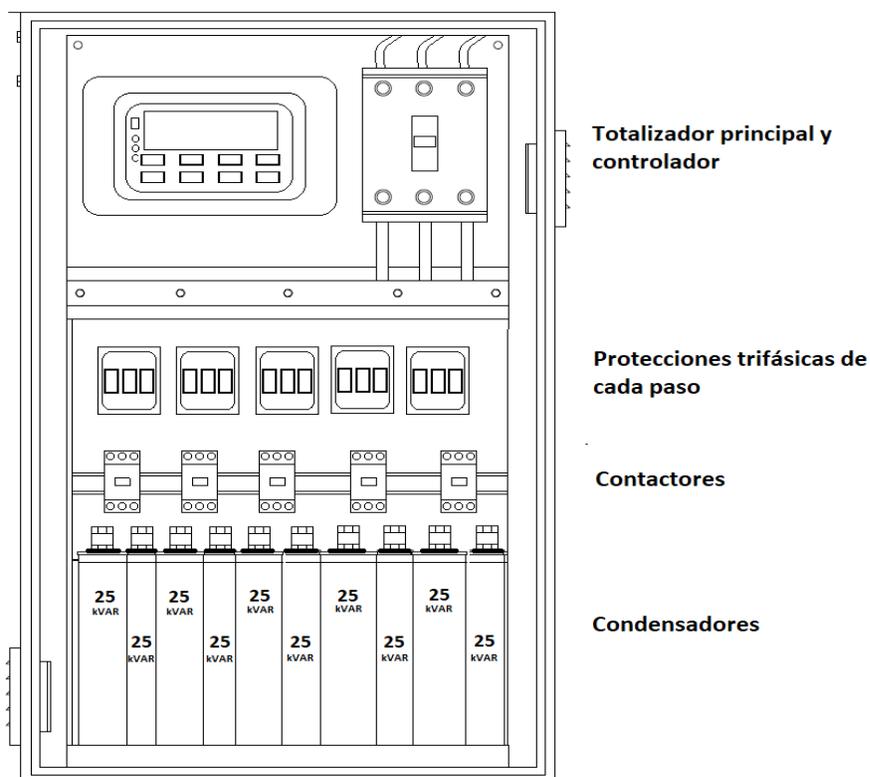
## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

En la siguiente ilustración se tiene una vista frontal del banco de condensadores deseado según los cálculos para el dimensionamiento, con un gabinete compuesto por el controlador, protección principal, y los 5 pasos automáticos de 50 kVAR cada paso, se estipula que sea totalmente automático porque el comportamiento del sistema es variable y se requiere que el FP esté siempre por encima de 0,90 (Figura 3-16).

El banco de condensadores quedaría dimensionado de la siguiente manera:

- Potencia del banco: 250 kVAR
- Conexión: Paralelo
- Disposición: Central
- Disposición de pasos: 5 pasos (5x50)
- Pasos móviles o automáticos: 5
- Botellas comercialmente encontradas en el mercado para usar: 25 kVAR

**Figura 3-16:** Vista frontal banco de condensadores de 5 pasos.



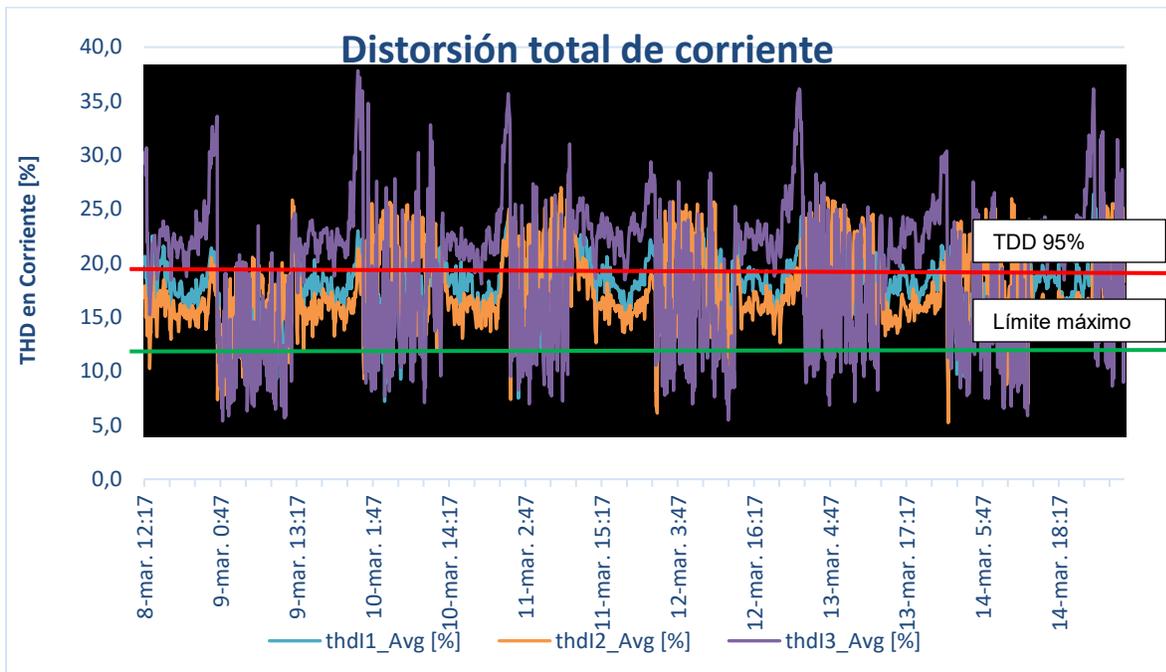
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

### 3.4 Aplicación de la metodología para selección de filtro de armónicos

Para esta sección se tomará como base para el cálculo, los datos obtenidos de la medición en la Empresa 2, que tiene problemas de armónicos en el sistema y se mostrará el paso a paso para la selección del filtro.

En la medición de la Empresa 2, se evidenciaron problemas de armónico como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 3-17:** Forma de onda de corriente armónica en el tiempo.



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 3-17 se muestran valores máximos de 37% en THDI, la valoración se hace con el 95% según la norma IEEE 519-2014, para este caso puntual el resultado de TDD fue de 18,93% superando el límite máximo que es de máximo 12%. según la relación  $I_{sc}/I_L$ : 61,48.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

Para los armónicos individuales <11 el valor máximo permitido es de 10%, para este caso el armónico 5° fue de 16,08% en la fase L1.

Para calcular la potencia del filtro de armónicos se debe identificar el porcentaje de cada armónico individual y la corriente de cada uno de ellos; en la presente medición los armónicos pares no fueron tenidos en cuenta por sus valores despreciables.

**Tabla 3-7:** Porcentaje y corriente armónica individual.

Armónicos	Fund	har03	har05	har07	har09	har11	har13	har15
%	100%	6,19	16,08	6,51	0,98	3,62	4,13	0,33
Armónicos Corriente Armónicos		27,84	73,74	18,45	4,27	23,70	10,70	3,15

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

Se procede a calcular la potencia del filtro de la siguiente manera:

Primero calcule la corriente armónica del sistema así:

$$I_h = \sqrt{((I_{h_3})^2 + (I_{h_5})^2 + (I_{h_7})^2 + (I_{h_9})^2 + (I_{h_{11}})^2 + (I_{h_{13}})^2 + (I_{h_{15}})^2)} \quad (8)$$

$$I_h = \sqrt{((27,84)^2 + (73,74)^2 + (18,45)^2 + (4,27)^2 + (23,70)^2 + (10,70)^2 + (3,15)^2)}$$

$$I_h = 85,2 A$$

Con la corriente armónica, se calcula la potencia armónica:

$$S_h = I_h \times V \quad (9)$$

$$S_h = 85,2 A \times 216 V$$

$$S_h = 18403 VA$$

$$S_h = 18,403 kVA$$

La potencia calculada del filtro es de 18,4 kVA, sin embargo, se recomienda tener en cuenta un factor de servicio (FS), para este caso particular se tomará el FS de 1,15; entonces:

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

$$S_h = 18,4 \text{ kVA} \times 1,15$$

$$S_h = 21,16 \text{ kVA}$$

Normalizando, la potencia del filtro de armónicos será de **21 kVA**.

### 3.4.1 Configuración de filtro de armónicos

En Colombia existen compañías que disponen de filtros de armónicos pasivos y activos; para este caso de estudio se requiere un filtro de armónicos activo, pues el comportamiento de los armónicos no es constante en el tiempo, este comportamiento es dinámico.

Los filtros activos de armónicos son equipos de electrónica de potencia que se basa en lógica digital con el fin de sintetizar una forma de onda de intensidad que se inyecta en la red eléctrica para cancelar las intensidades armónicas causadas por las cargas no lineales presentes en la instalación. Estos están compuestos por transformadores de intensidad para medir la intensidad de la carga y así determinar el contenido de intensidad armónica presente, cuando se inyecta la corriente que se ha sintetizado, se amortiguan las intensidades armónicas, reduciendo así el efecto de distorsión en el sistema y todos los efectos que estas conllevan.

Cada fabricante desarrolla a su manera la forma de operar y configurar los filtros de armónicos, para este caso de estudio, en el mercado colombiano es posible obtener esta tecnología con la potencia requerida según los resultados con la compañía Schneider Electric, con la que cuenta con diversidad de filtros que podrían solucionar el problema evidenciado en la medición de calidad de energía, para una explicación de configuración se toma como ejemplo el manual de usuario del filtro AccuSine™ PCS AHF.

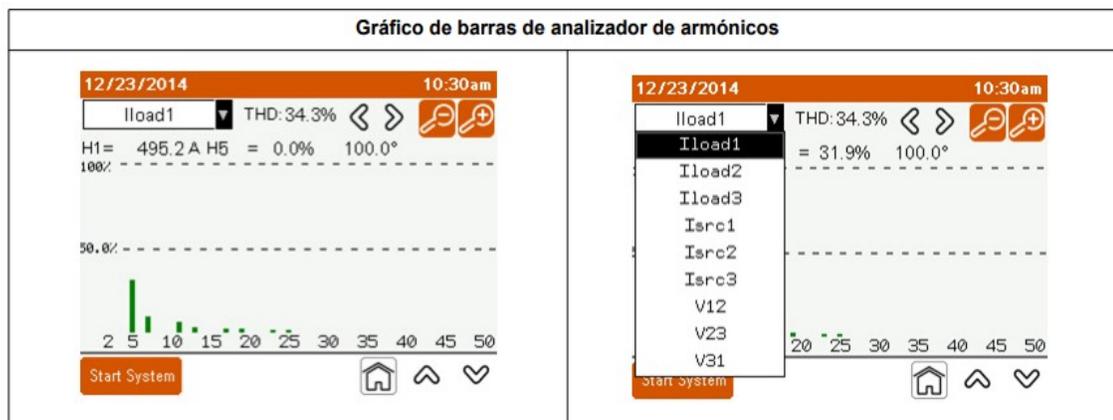
Estos filtros activos cuentan con módulos de configuración para adecuarlos a las necesidades del sistema eléctrico dónde se vaya a disponer, por ejemplo, los filtros activos de Schneider la configuración se hace de la siguiente manera:

El menú desplegable, permite mostrar un valor de orden de armónicos específico (Figura 3-18); los valores que puede mostrar son los siguientes:

- Barras de armónicos de tensión y corriente
- Barras de armónicos de la fuente de intensidad
- Barras de armónicos de la carga de intensidad

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

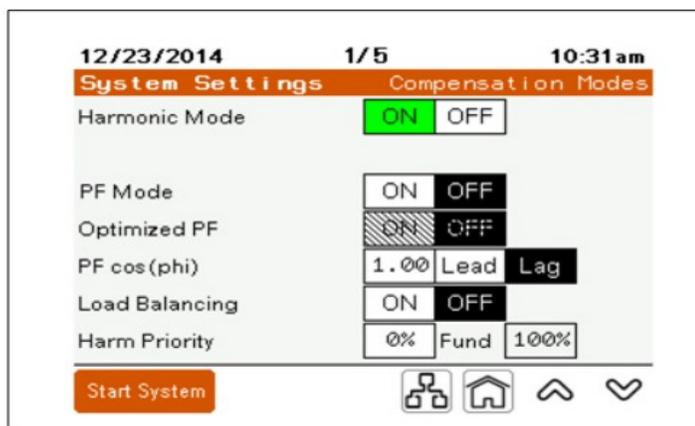
**Figura 3-18:** Gráfico de barras de analizador de armónicos.



*Nota. Fuente: Adaptado (Schneider Electric, pág. 20)*

En esta interfaz como se ilustra en la Figura 3-19, se encuentran el modo compensación, esta facilita la activación o desactivación la corrección de distorsión armónica, dónde se establece qué porcentaje de la capacidad del filtro será dedicada a la atenuación de los armónicos.

**Figura 3-19:** Pantalla de modo de compensación.



*Nota. Fuente: Adaptado (Schneider Electric, pág. 23)*

En esta parte de la configuración como se muestra en la Figura 3-20, se puede hacer una compensación manual y elegir qué armónicos individuales se quieren mitigar. Cuando la

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

pantalla muestra el recuadro en ON, se habilita la compensación, el armónico se activa o inactiva cuando se pulsa.

**Figura 3-20:** Pantalla activación de armónicos.

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8				ON							
10	ON										
20	ON										
30	ON										
40	ON										
50	ON	ON									

*Nota. Fuente: Adaptado (Schneider Electric, pág. 31)*

De esta manera se puede configurar el filtro para el comportamiento del sistema actual o para futuros cambios por entrada o salida de equipos en la compañía dónde se hizo la medición.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- El presente proyecto incluye 2 mediciones con comportamientos diferentes en los parámetros eléctricos con el fin de enriquecer el análisis el contenido y desarrollo del documento.
- La caracterización en cada medición no fue la ideal por temas contractuales comerciales entre el cliente y la empresa prestadora del servicio de calidad de energía, pues el ingreso a las instalaciones de la compañía era restringido, esto no permitió un levantamiento ideal de los equipos existentes, de los diferentes procesos o líneas de procesos, sin embargo si era de conocimiento que las instalaciones contenían equipos inductivos, equipos de electrónica de potencia, equipos de cómputo y algunos horarios de trabajo o de ciertos procesos.
- La metodología para la conexión del equipo se hizo basado en el equipo con el que se hizo la medición, sin embargo, el principio de funcionamiento, configuración del equipo, conexión y descarga de información es similar con otros analizadores del mercado.
- La metodología de análisis de la información está basada en normas nacionales e internacionales, sin embargo, juega un papel importante la experiencia de quién ejecuta el presente proyecto, pues existen condiciones que pueden alertar de falsas desviaciones, que al detalle puede identificarse que son condiciones de un proceso específico que no tiene mayor influencia sobre el sistema eléctrico analizado.
- El dimensionamiento del banco de condensadores es basado en los resultados obtenidos, en este no se tiene en cuenta el cálculo de la frecuencia de resonancia, esto implica otros cálculos que no están dentro del alcance del proyecto, sin embargo, en el presente proyecto se pudo dimensionar una solución que ayudaría a la compañía a mejorar el factor de potencia, evitando multas por bajo FP y por potencia reactiva muy alta, así como a mejorar el sistema en general para disposición de su máxima potencia instalada.

## METODOLOGÍA PARA MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

- La selección del filtro de armónicos está basada en la potencia armónica hallada del sistema eléctrico según los datos obtenidos en la medición, sin embargo, se debe aclarar que las grandes compañías que fabrican estas soluciones tienen unas cargas y potencias predeterminadas, para Colombia, hay representantes de Circuitor (empresa que fabrica filtros de armónicos), que son más asequibles para la solicitud de filtros más personalizados, de acuerdo a la necesidad, niveles de tensión, pequeñas o grandes potencias armónicas a sintonizar, armónicos específicos a controlar, etc.

### 4.2 Recomendaciones

- Las mediciones hechas en las empresas fueron realizadas bajo algunas condiciones comerciales que permitieron hacer las mediciones sin inconvenientes, pero por restricciones de las mismas, no fue posible hacer una caracterización general de la cantidad exacta de quipos inductivos, luminarias, equipos electrónicos asociados a los procesos y demás. Para futuras mediciones dónde se use la metodología empleada en el presente proyecto, se recomienda priorizar una caracterización de la compañía dónde se haga el análisis, pues esto permitirá la identificación de factores que ayuden a un excelente análisis, diagnóstico y recomendaciones para la solución de los problemas encontrados.
- Es recomendable que las personas encargadas de las mediciones, sean idóneas, conocedoras de los riesgos eléctricos presentes, que aplique las recomendaciones estipuladas por el RETIE, uso adecuado de equipos de protección personal, distancias de seguridad, etc., para un desarrollo que salvaguarde la vida de las personas y la integridad de los activos de la compañía.
- Es importante que los equipos usados en las mediciones estén debidamente verificados y calibrados por los entes legales correspondientes en Colombia, esto garantizará que los resultados obtenidos sean confiables, que se encuentren dentro de los rangos estipulados para las variables que manejan los equipos analizadores.
- Se recomienda complementar los análisis con diagramas unifilares de la instalación ya que brindan un mejor panorama, sin embargo en los lugares donde se llevaron a cabo las mediciones, no contaban con estos, faltando al RETIE, se les hace la debida recomendación.

# A. Anexo: Registro de datos de medición

FORMATO DE REGISTRO DE DATOS	
Fecha: _____	Orden de trabajo: _____
Ciudad: _____	
Empresa/Cliente: _____	
Ejecutor: _____	
Datos generales	
Equipo analizador: _____	
Fecha calibración o verificación: _____	
Tiempo de medición (horas – días): _____	
Horario de producción de la empresa/Cliente: _____	
Datos PCC	
Punto de conexión	
<input type="checkbox"/> Transformador	
<input type="checkbox"/> Tablero de distribución	
<input type="checkbox"/> Celda media tensión	
<input type="checkbox"/> Otro: _____	
Nivel de tensión Primario: _____	
Nivel de tensión Secundario: _____	
Nivel de corto circuito del PCC: _____	
Calibre de conductores en punto de conexión: _____	
Potencia de Transformador o Capacidad Tablero de distribución: _____	

## B. Anexo: Registro fotográfico



## **C. Anexo: Análisis medición Empresa 1**

**MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS  
EN TRANSFORMADOR DE 1250 kVA**

**Empresa 1  
INFORME No. 01**

**Equipo utilizado:** Analizador de redes FLUKE 435 SII

**Realizado por:** Deiner López

**Fecha de Elaboración:** 21/09/20

**Fecha de medición:** De 23/02/2020 hasta 02/03/2020

- **Objetivos**

Presentar los resultados del monitoreo de parámetros eléctricos realizado en el transformador con capacidad de 1250 kVA en EMPRESA 1; una vez analizados los resultados se emitirán observaciones y recomendaciones a las desviaciones halladas.

- **Alcance de los trabajos**

El alcance de las actividades ejecutadas en campo realizadas desde el 23 de febrero hasta el 02 de marzo de 2020, este proyecto incluye:

Monitoreo de parámetros eléctricos por un periodo de 136,5 horas dónde el PCC se ubica aguas abajo del transformador

- **Descripción del sistema**

El sistema eléctrico de la EMPRESA 1, parte de su sistema eléctrico es alimentado por un transformador de 1250 kVA, donde la tensión de operación del sistema es de 500 V/289 V. Aguas abajo del transformador es donde se ubica el PCC como se visualiza a continuación.

- **Monitoreo realizado**

Los resultados se presentan en gráficas y tablas, en las que se realiza un análisis en el presente informe, observando el comportamiento de los parámetros de interés, como tensiones, corrientes, potencias, factor de potencia etc.

Se realizó un (1) monitoreo con el analizador Fluke 435 S II

- **Medición**

Se realizó en el transformador de 1250 kVA. Con la realización del monitoreo se evalúan los parámetros eléctricos que puedan estar afectando el sistema de la empresa y/o sistema eléctrico de los diversos procesos desprendidos del punto de acople común.

▪ **Normatividad pertinente**

**Tabla 1** Resumen normatividad a parámetros medidos

<b>Parámetro</b>	<b>Norma Vigente</b>	<b>Límites de evaluación</b>
FRECUENCIA	<p align="center"><b><u>Resolución CREG 070/98</u></b></p> <p><i>Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada.</i></p>	<p><i>La frecuencia nominal del SIN Colombiano es de 60 Hz y su intervalo de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones Normales de operación.</i></p> <p><i>El valor máximo recomendado para desbalances de tensión en Baja Tensión en sistemas trifásicos es 2% menores a 69 kV.</i></p>
DESBALANCE DE TENSIÓN Y CORRIENTE	<p align="center"><b><u>NTC 5001</u></b></p> <p><i>Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común.</i></p>	<p><i>El valor recomendado para desbalances de Corriente en Baja Tensión en sistemas trifásicos es de 5 al 20%, para una fase.</i></p> <p><i>En condiciones normales de suministro de energía eléctrica en los sistemas de baja tensión, la máxima tensión no deberá superar el 10% de la nominal; y la tensión mínima no deberá superar el -10% de la nominal.</i></p>
TENSIÓN	<p align="center"><b><u>NTC 5001</u></b></p> <p><i>Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común.</i></p>	<p><i>Los valores de corrientes deben estar por debajo de los valores Nominales de la capacidad de los conductores.</i></p>
CORRIENTE	<p align="center"><b><u>NTC 2050 CÓDIGO ELÉCTRICO PRIMERA ACTUALIZACIÓN</u></b></p> <p align="center"><b><u>RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas)</u></b></p> <p><i>Última actualización resolución No. 18 – 1294 del 6 de Agosto de 2008</i></p>	<p><i>El límite máximo recomendado de distorsión armónica en tensión para niveles de tensión nominal menores a 69 kV es de 8%.</i></p>
DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD)	<p align="center"><b><u>Resolución CREG 070/98</u></b></p> <p><i>Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada.</i></p> <p align="center"><b><u>ANSI/IEEE std 519 - 2014</u></b></p> <p><i>“Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”</i></p>	<p><i>El límite máximo recomendado de distorsión armónica en corriente para niveles de tensión nominal menores a 69 kV es de máximo 20%.</i></p>
FACTOR DE POTENCIA	<p align="center"><b><u>Resolución CREG No. 108 de 1997 / Factor de potencia</u></b></p> <p align="center"><b><u>Resolución CREG 047 de 2004 / Factor de potencia</u></b></p>	<p><i>El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0.90).</i></p>

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

▪ **Resumen de parámetros eléctricos**

El análisis se realizó aguas abajo del transformador de 1250 kVA con salida de 500/289 V donde a partir de ahora se denominará el PCC (punto de conexión o acople común).

**Tabla 4** Resumen de parámetros eléctricos medidos

<b>Parámetro medido</b>	<b>FASE</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>
Tensiones de estado estable [V]	L1	265,900	281,439	291,900
	L2	264,200	279,038	289,900
	L3	265,100	279,756	290,600
Corriente [A]	L1	107,400	526,006	1240,000
	L2	104,400	507,813	1224,000
	L3	115,600	525,169	1242,000
Frecuencia [Hz]		59,940	60,000	60,060
Distorsión Armónica en tensión THDV [%]	L1	1,673	3,070	4,916
	L2	1,578	3,064	4,936
	L3	1,700	2,951	4,808
Distorsión Armónica en corriente THDI [%]	L1	4,9	9,6	24,2
	L2	5,1	9,5	23,9
	L3	4,8	8,9	21,3
Distorsión Total en Demanda TDD [%]			6,034	
Potencia Aparente [kVA]		101,257	470,935	1097,211
Potencia Activa [kW]		39,960	360,437	910,700
Potencia Reactiva [kVar]		0,000	232,028	611,965
Factor de potencia [p.u]		<b>-0,82</b>	<b>-</b>	<b>0,82</b>
Desbalance en tensión [%]		0,136	0,520	1,078
Desbalance en corriente [%]		0,000	0,003	0,021

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

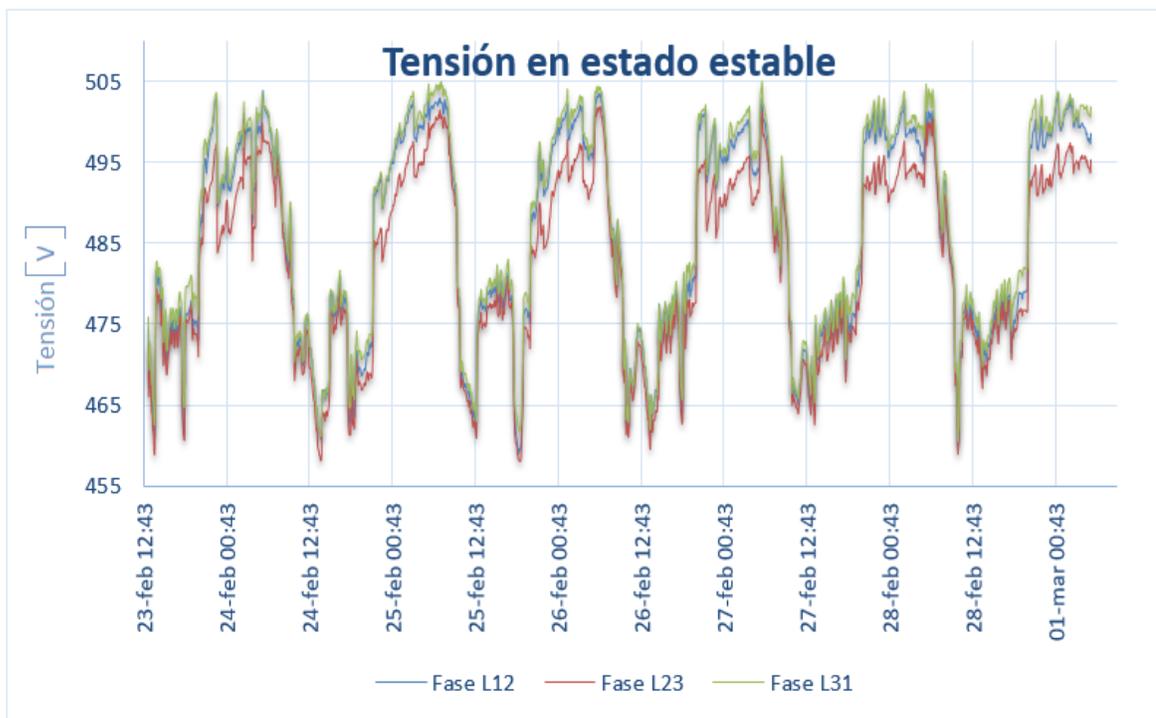
## Análisis de la información de la medición

- Tensión en estado estable

Según la NTC 5001 los valores de tensión en estado estable son  $\pm 10\%$  de la tensión nominal, durante el monitoreo se registraron valores de tensión en la acometida principal que variaron entre 458 V y 504.9 V. Estos valores se consideran aceptables, dado que la tensión nominal en la salida es 500 VL-L.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de las tensiones del sistema; las tensiones más bajas presentadas se dieron cuando entró en operación la mayor parte de equipos de la compañía, entre las 23:30 y las 9:30. No se presentaron perturbaciones de tensión momentáneas durante la medición que estén sobre o bajo del límite permitido.

**Figura 1** Perfil de tensión de línea



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Desbalance de tensión

Para un sistema trifásico el desbalance es definido como la diferencia entre los niveles de tensión de cada fase con referencia a la tensión nominal del sistema. Es recomendable que en un sistema eléctrico trifásico las tensiones sean lo más similares y cercanas al valor nominal. La principal causa que ocasiona el desbalance de tensión son las cargas monofásicas no balanceadas sobre sistemas trifásicos o defectos de operación en bancos de condensadores. Un desbalance de tensión puede reducir la capacidad de cargas de equipos inductivos como motores reduciendo la vida útil del aislamiento por sobretensión, etc. El desbalance de tensión promedio registrado fue de 0,52 %, teniendo en cuenta que la NTC 5001, establece un límite máximo de 2%, es posible determinar que este parámetro es aceptable para las acometidas bajo análisis. En el siguiente gráfico se muestra el registro del perfil de desbalance de tensión.

**Figura 4** Perfil de desbalance de tensión

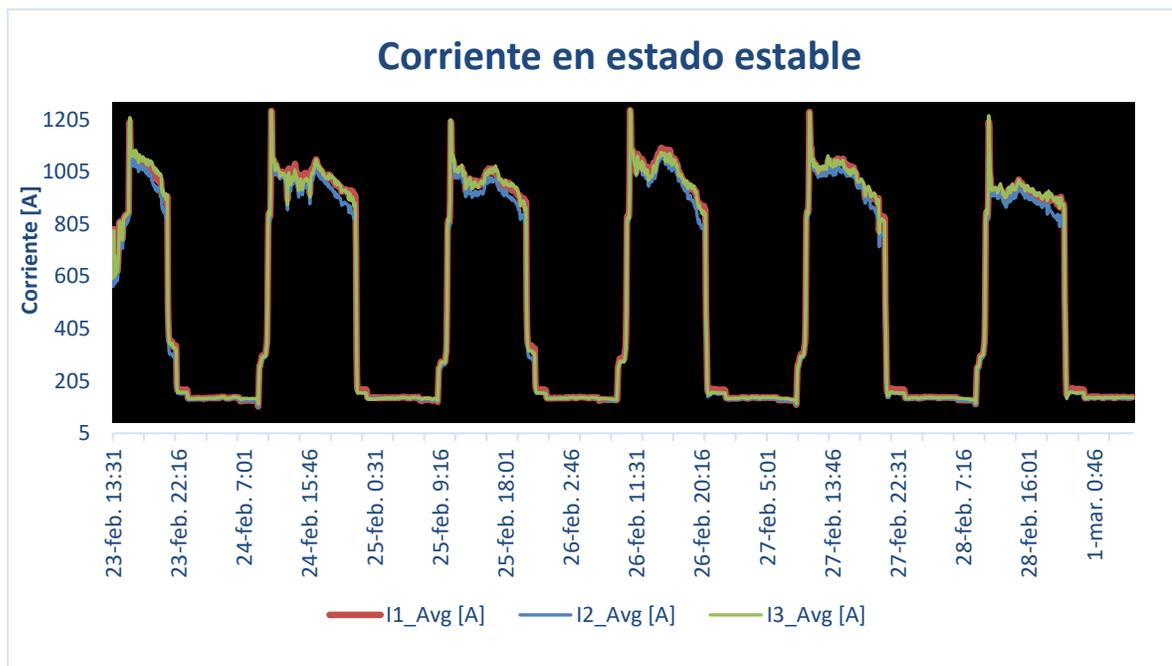


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Corriente

En la siguiente figura se observa que el valor máximo de corriente registrado durante el monitoreo en el punto de medido fue 1242,0 A, debido posiblemente a los equipos de gran capacidad en los diferentes procesos, sin embargo, se puede observar que sigue por debajo de la corriente nominal del transformador 1444 A. Este comportamiento de la corriente es similar en cada uno de los días de la medición, mostrando los valores pico entre las 9:30 hasta las 21:30 aproximadamente, esta característica de carga se va a ver reflejado en los demás parámetros como la potencia, factor de potencia, armónicos, etc.

**Figura 3** Perfil de corriente



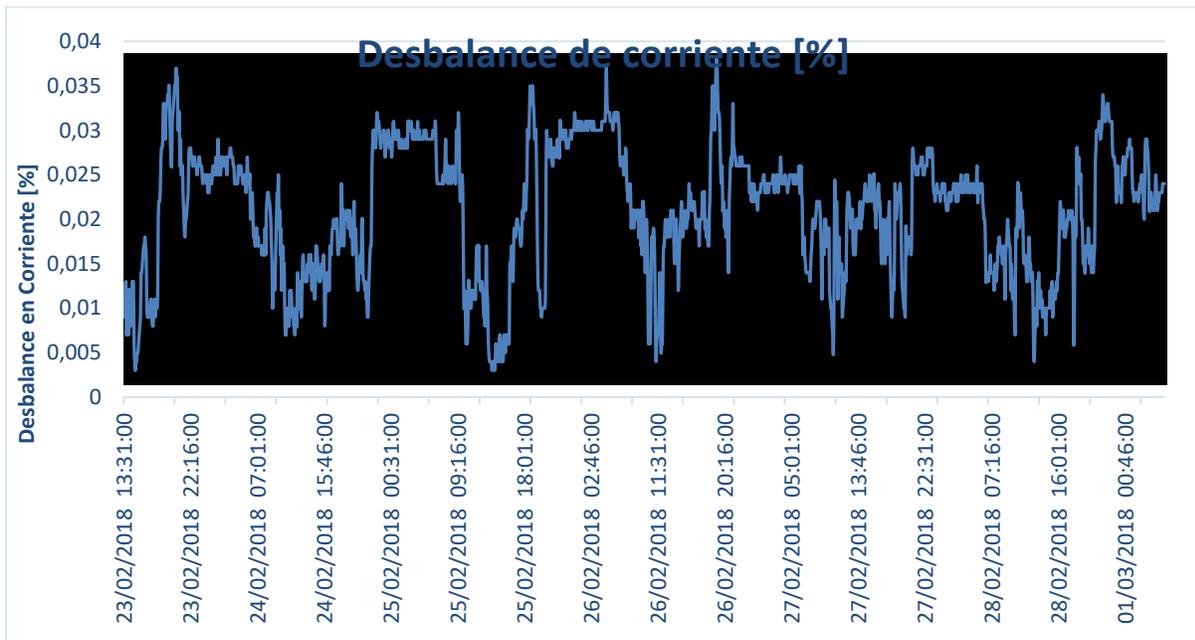
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Desbalance de corriente

El factor de desbalance de corriente se define usando la teoría de componentes simétricas, relacionando la componente de secuencia positiva y negativa. De acuerdo con la NTC 5001, los desbalances de corriente no deben ser superiores al 20 % en periodos no mayores a 10 minutos para niveles de tensión  $\leq$  a 62 kV.

En la figura siguiente se muestra los valores de desbalances en corriente registrados durante el monitoreo. Se verifica que el desbalance está dentro del intervalo permitido por la normatividad ya referida.

**Figura 4** Perfil de Desbalance de Corriente

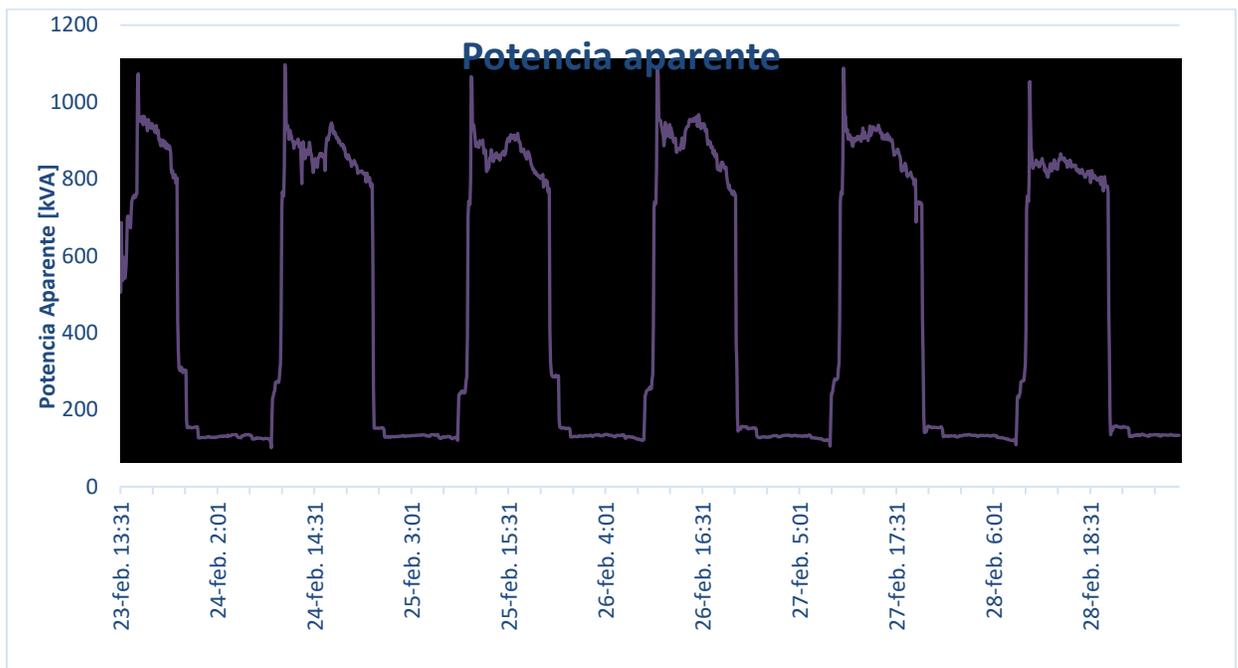


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia aparente

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 1097,21 kVA a plena carga; el transformador es de 1250 kVA, por lo que su cargabilidad está en un 87,77%, cargabilidad Aceptable.

**Figura 5 Perfil de potencia aparente**

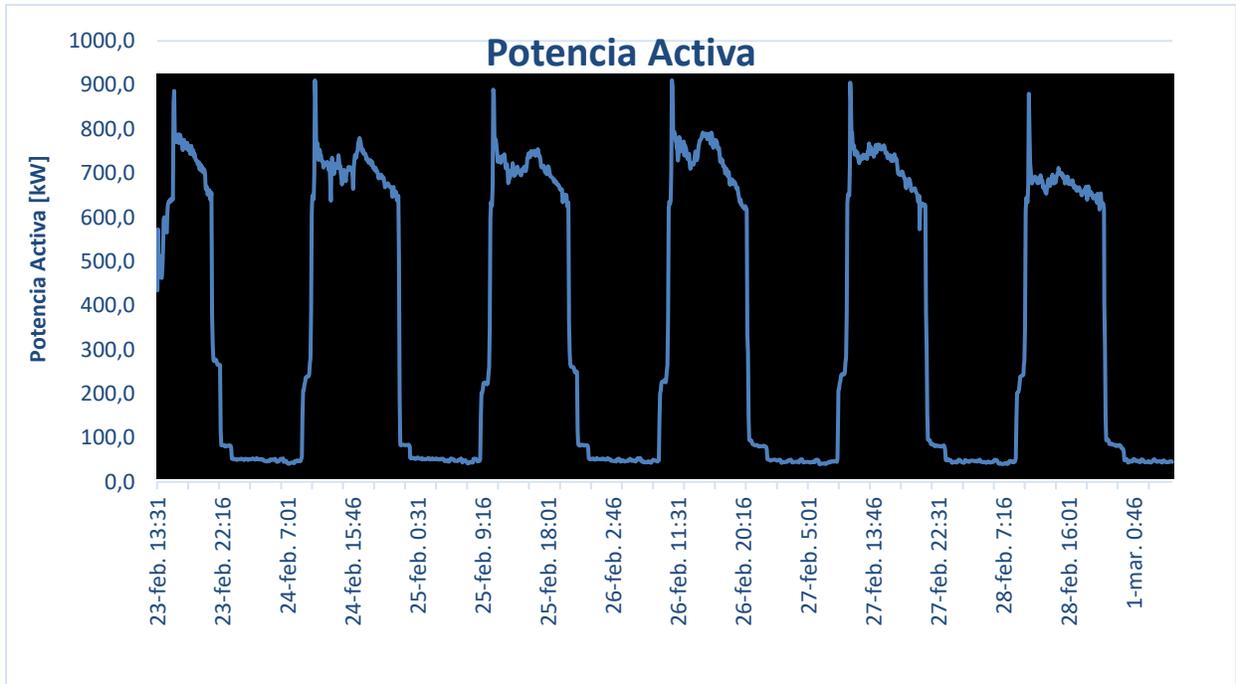


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia activa

Se puede observar que la potencia activa promedio máxima registrada fue de 910,7 kW a plena carga, se observa normalidad en el comportamiento.

**Figura 6** Perfil de potencia activa

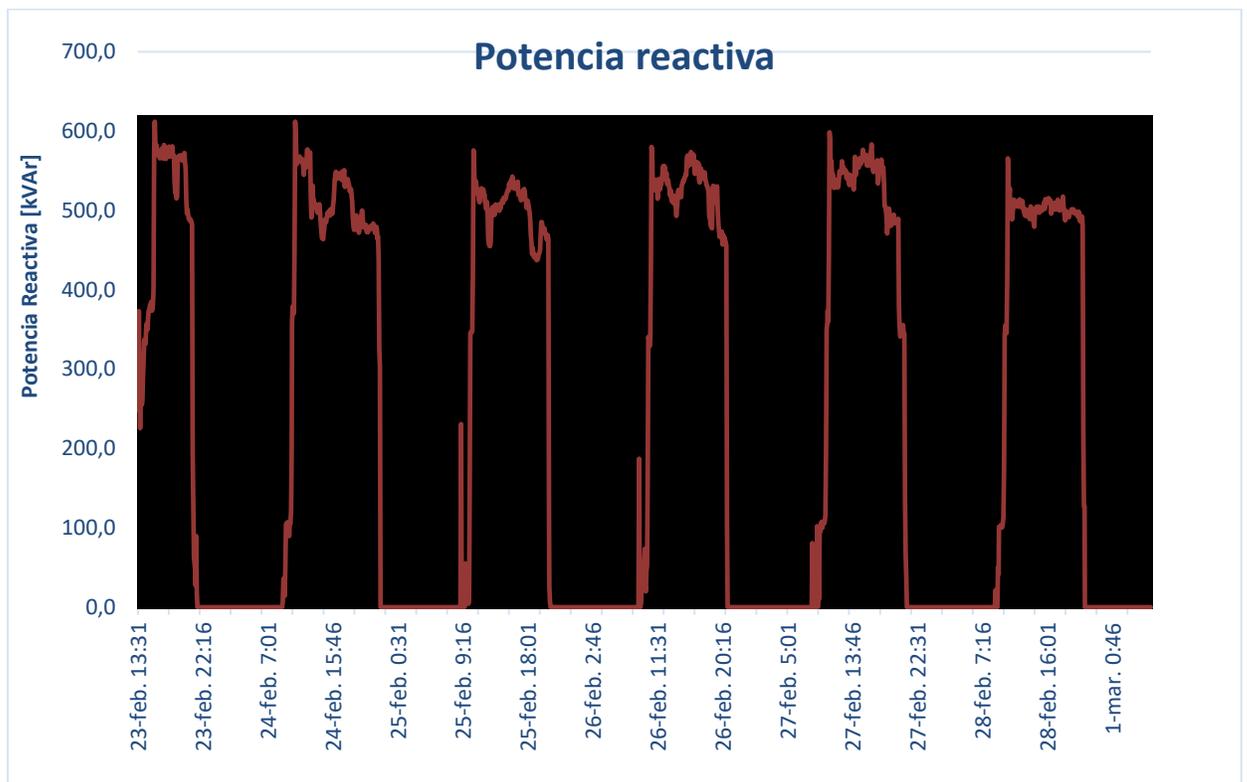


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia reactiva

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 611,965 KVAR a plena carga, lo que supera el 50% de la carga activa por lo tanto presenta penalización basándose en la (CREG 108, 1997)/ Factor de potencia, que indica que si la energía reactiva es mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida, el exceso sobre este límite, se considerará como consumo de energía activa para la factura. La potencia reactiva por encima del 50% es de 156,61 kVAR, que pueden ser facturados como consumo activo.

**Figura 7** Perfil de potencia reactiva



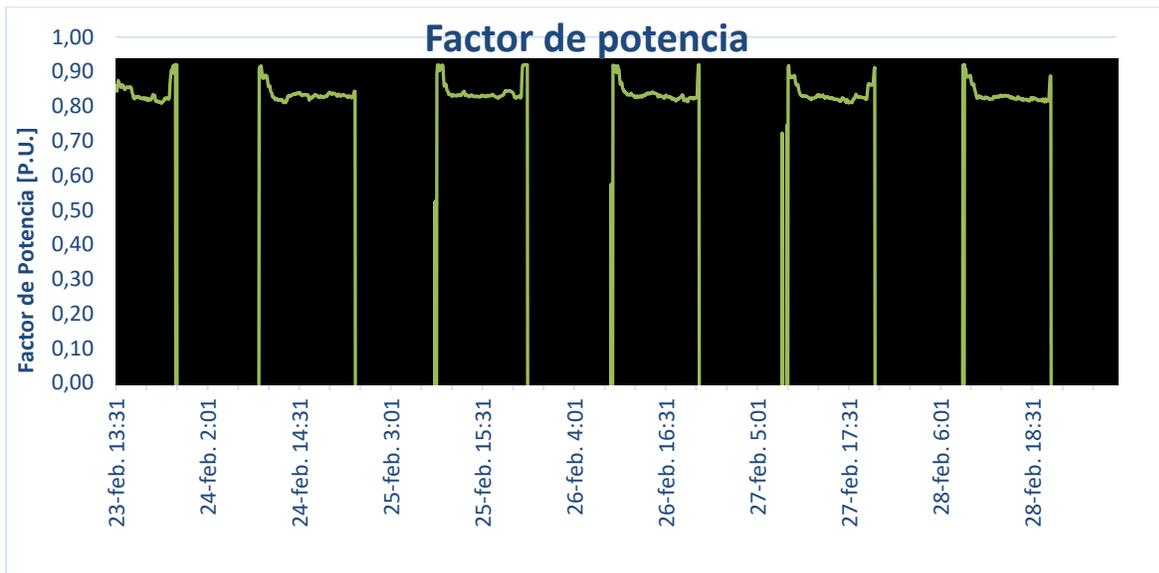
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Factor de potencia

Es la relación entre la potencia útil consumida por una carga y la potencia aparente del mismo. El factor de potencia puede ser Inductivo (+) o puede ser capacitivo (-). La Norma técnica colombiana NTC 5001 recomienda que, bajo operación normal, el factor de potencia debe permanecer entre 0,9 y 1 para factor de potencia inductivo y entre 0,9 y 1 para factor de potencia capacitivo durante el 95% de la operación. Los valores que se encuentran por debajo de 0,9 normalmente es causado por exceso de demanda de potencia reactiva en un sistema eléctrico producido por equipos inductivos como hornos, motores, generadores, entre otros.

En el monitoreo, se registraron valores de factor de potencia promedio de 0,82 lo que indica que este valor no es aceptable. Es recomendable instalar un banco de condensadores para realizar la compensación reactiva del sistema. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de este parámetro durante el monitoreo.

**Figura 8** Perfil de factor de potencia

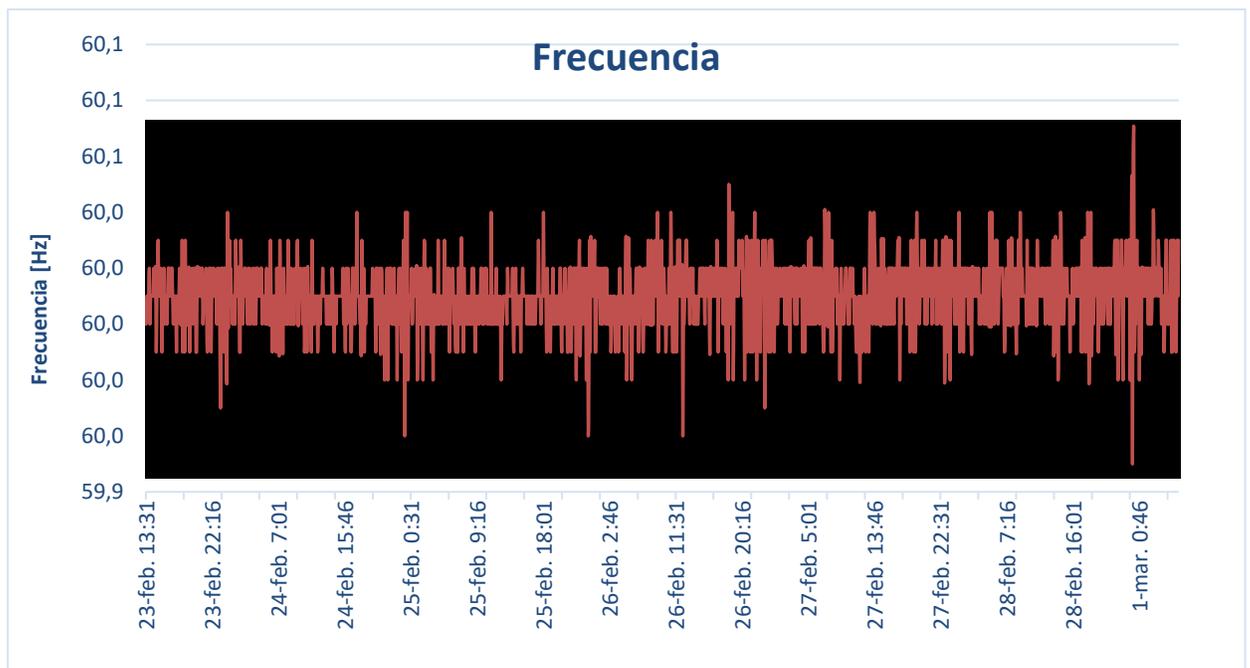


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Frecuencia

Para Colombia es 60 Hz. Este valor es determinado por la velocidad de los alternadores en las estaciones de generación. Las fluctuaciones de frecuencia pueden ocasionar errores de sincronización en usuarios que tienen cargas de grandes rectificadores, comportamientos erróneos en equipos de cómputo, equipos electrónicos, entre otros. A continuación, se observa que la variación de la frecuencia se encuentra dentro de los valores admitidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC 5001, 2008) y resolución (CREG 070, 1998), donde indica una frecuencia mínima de 59,8 Hz y máxima de 60,2 Hz, ubicándose para el caso en un mínimo de 59,94 Hz y un máximo de 60,060 Hz.

**Figura 9** Perfil de Frecuencia



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Distorsión armónica en forma de onda

Cuando la onda de corriente o de tensión en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada comparada con la onda sinusoidal ideal, se trata de una onda con componentes armónicos.

La calidad de la onda eléctrica se evalúa a través de los siguientes parámetros; (THDv) y (TDD).

- Distorsión armónica total en tensión (THDv)

Los armónicos de tensión son ondas sinusoidales dónde las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), causados normalmente por dispositivos con tensión y corriente no lineal.

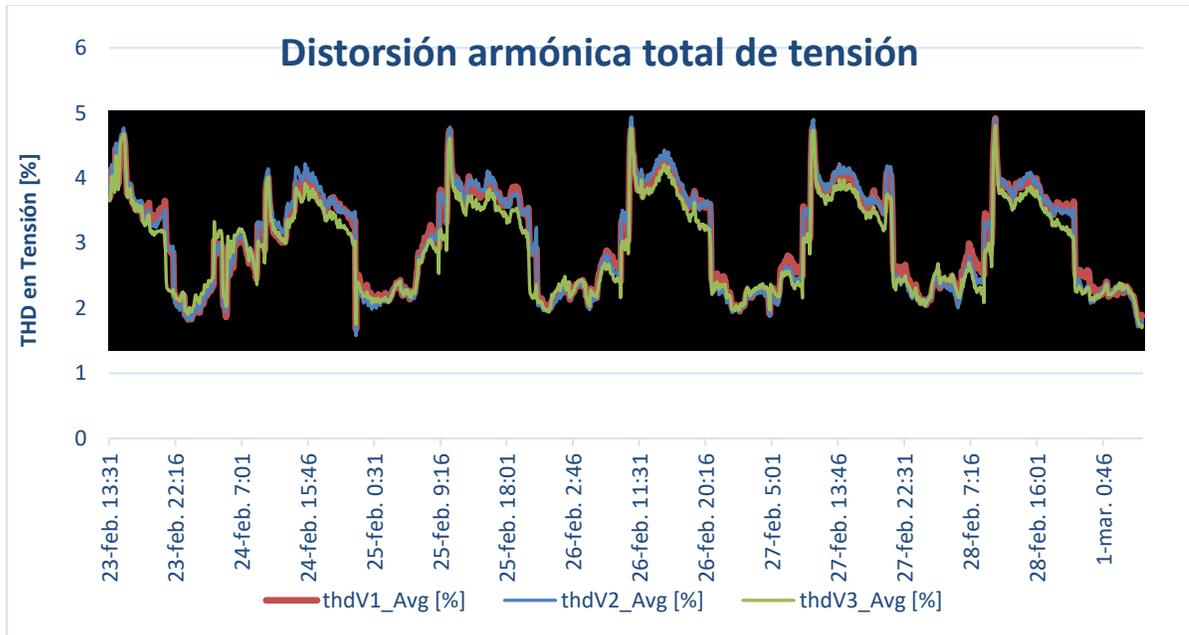
**Tabla 3** Límite de distorsión de tensión para sistemas desde 120V hasta > 161 kV

Rango de Tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica Total- THDv (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

*Nota. Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 6)*

La IEEE 519 del 2014 tiene como límite de referencia **8%** para la distorsión armónica total en tensión en estado estable, para tensiones menores a 1 kV. De acuerdo a los datos del monitoreo al calcular los porcentuales al 95 % de los valores de distorsión armónica total de tensión (THDv) se obtiene como resultado **4.936 %**, lo cual se puede decir que el valor se encuentra **dentro** del rango permitido por la norma.

**Figura 10** Distorsión armónica total de tensión



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- **Distorsión total de la demanda (TDD)**

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante también es baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma (IEEE Std 519, 2014).

Para este caso tomando el valor de corriente de corto circuito  $I_{cc}$ : 23,2 kA del transformador (impedancia aproximada de 6,2%) y una corriente promedio máxima en estado estable de 900 A durante los tiempos de carga, es posible determinar la relación  $I_{sc}/I_L$ : 25,8; relacionando este valor en la tabla de límites en la Distorsión de la Corriente de la (IEEE Std 519, 2014) para tensiones entre 120 V – 69000 V, se observa:

**Tabla 4** Límites de distorsión armónica de corriente

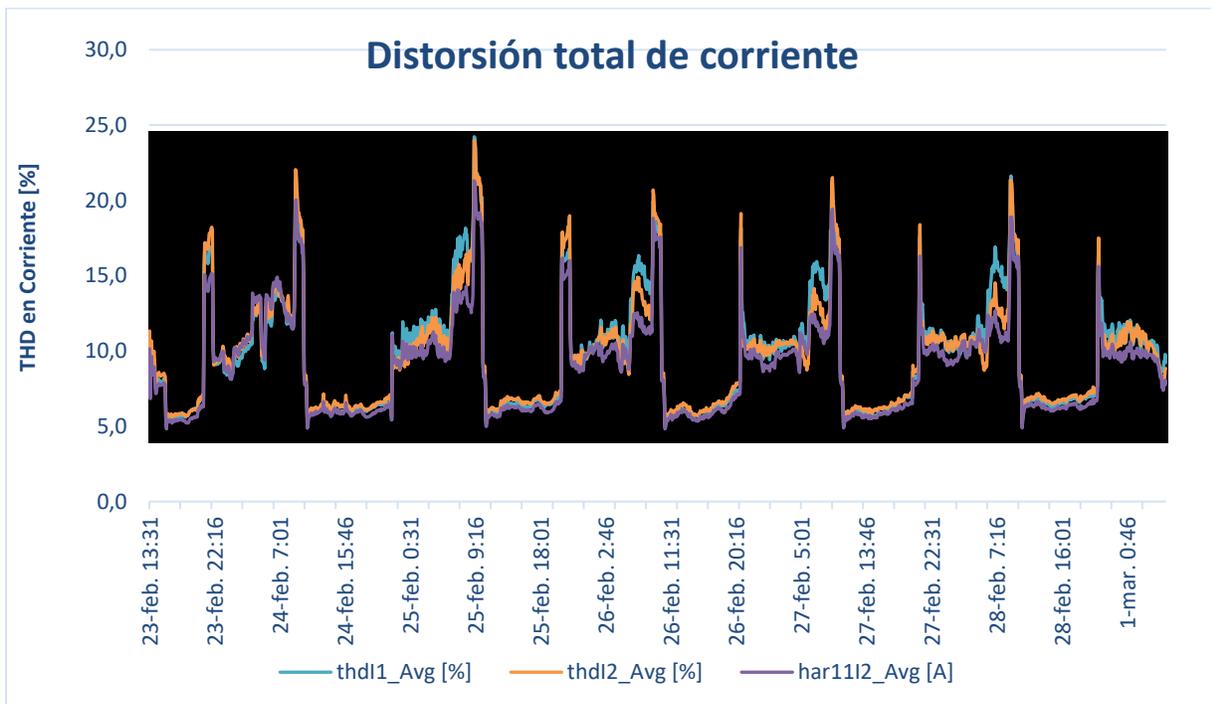
Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120V < Vn ≤ 69kV

Relación Isc/IL < 20*	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Nota. Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 7)

Que el valor máximo de TDD que debe tomar este sistema es de **8%**. El resultado obtenido para este parámetro en el punto de probabilidad del 95%, fue de **6,034 %**, lo anterior indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema se encuentra **dentro** del límite máximo permitido.

Figura 11 Forma de onda de corriente armónica



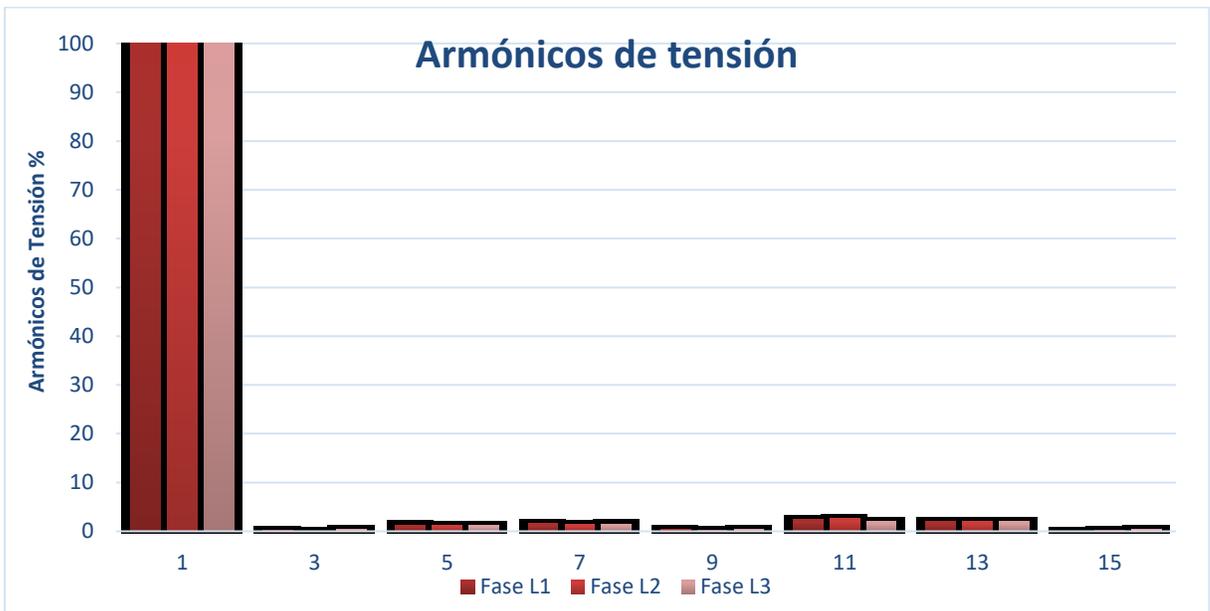
Nota. Fuente: Elaboración propia

Las posibles causas de la distorsión armónica en este punto común de conexión pueden ser por la presencia de cargas no lineales de origen electrónico, estas cargas no consumen corriente de forma progresiva, su consumo se da de forma brusca; sin embargo, este THD al 95 percentil no supera el límite máximo permitido.

- Armónicos individuales

En las siguientes figuras se representa el porcentaje de armónicos individuales de tensión y corriente con respecto a la fundamental.

**Figura 12** Armónicos individuales de tensión



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

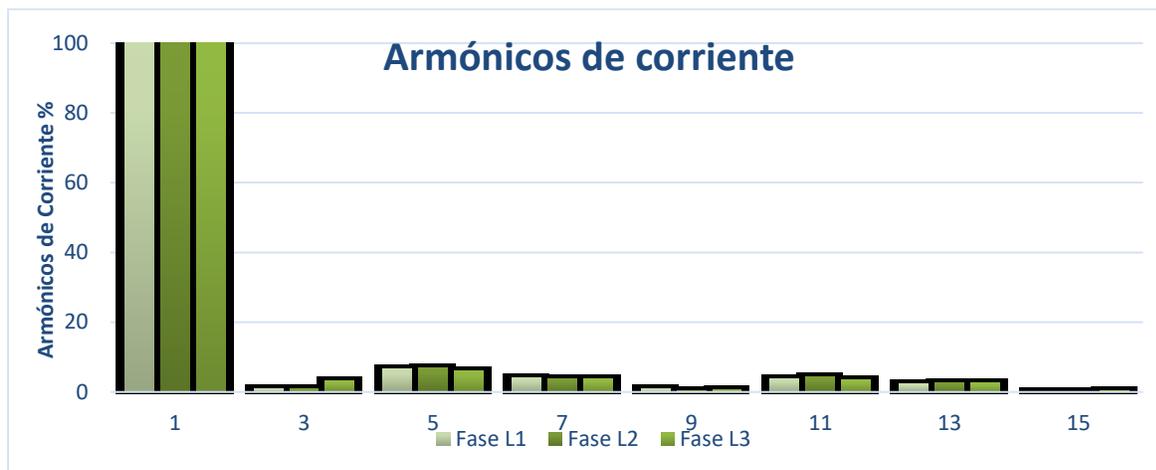
**Tabla 5** Armónicos de tensión

Armónicos				% THD voltaje total	IEEE std 519 - 2014
3 th	5 th	7 th	9 th	Promedio	
0,26	1,32	1,56	0,36	3,19	Si cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

El armónico de tensión de mayor influencia es el 7° con un valor del **1,56 %**, el cual se encuentra **DENTRO** de lo recomendado por el estándar como límite máximo de distorsión por componente armónico individual de voltaje (**5%**).

**Figura 13** Armónicos individuales de corriente



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 6** Análisis armónico de corriente

SCR=Isc/In	Armónicos				IEEE std 519 - 2014	% THD corriente total 95%	IEEE std 519 - 2014
	3 th	5 th	7 th	9 th			
25,8	1,05	6,53	4,02	0,80	Si cumple	6,034	Si cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

Los armónicos individuales de corriente de mayor influencia son el 5° y el 7° con valores de **6,53 %** y **4,02 %** respectivamente, lo que indica que se encuentra **POR DENTRO** de lo recomendado por el estándar que tiene como límite máximo de distorsión por componente armónica individual de corriente (**7%** para este nivel de relación Isc/In).

## ▪ **Conclusiones y recomendaciones de la medición**

Como resultado del análisis de los parámetros eléctricos se tienen las siguientes conclusiones.

- El comportamiento típico del lugar muestra entrada de equipos inductivos entre las 22:00 y las 11:00, generando un aumento de la potencia reactiva; este comportamiento puede generar multas por tener un factor de potencia por debajo de 0,9 y puede de igual manera aumentar el consumo energético del lugar.
- El comportamiento de los niveles de tensión en estado estable estuvo en óptimas condiciones. Las variaciones de la tensión con duración mayor a 1 minuto, no registran valores que se encuentren por fuera del  $\pm 10\%$  de la tensión nominal del punto de conexión común (PCC).
- Los desbalances de tensión se encuentran dentro de valores aceptables.
- La corriente no registra valores por fuera de la capacidad nominal del conductor, y los desbalances de corriente no están fuera de valores aceptables para la alimentación eléctrica de las cargas trifásicas del lugar.
- El nivel de distorsión armónica en corriente fue de 6,03 %, lo que indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema, se encuentra por dentro del intervalo establecido por la norma (8% para este nivel de relación  $I_{sc}/I_n$ ).
- Los armónicos individuales de corriente no presentan desviación, el 5° armónico fue el más representativo con 6,53 %, cuando el máximo permitido es de 7%.

## ▪ **Recomendaciones**

- Se recomienda instalar un banco de condensadores que compense el desfase mientras los equipos se encuentran en operación, dado que se observa una potencia reactiva alta y un factor de potencia por debajo de 0,9 lo que puede acarrear multas en la factura de energía.
- Se recomienda hacer una inspección de termografía a todo el sistema eléctrico de la planta, incluyendo tableros, banco de condensadores, ya que, con la identificación y corrección de puntos calientes, se puede mejorar la calidad de energía del sistema, evitando desbalances, fallas y demás por falsos contactos, además de otras consecuencias derivadas de dichos puntos calientes

- Se recomienda identificar con cinta de colores todos los conductores de las instalaciones como lo establece el RETIE, así se evitan conexiones erróneas y confusión entre conductores que puedan afectar la integridad de las personas y de los equipos.
- Se recomienda que la subestación disponga de un diagrama unifilar del sistema eléctrico tal como lo establece el RETIE en el artículo 10; Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas.

## **D. Anexo: Análisis medición Empresa 2**

**MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS  
EN TRANSFORMADOR DE 400 kVA**

**Empresa 2  
INFORME No. 02**

**Equipo utilizado:** Analizador de redes FLUKE 435 SII

**Realizado por:** Deiner López

**Fecha de Elaboración:** 05/10/20

**Fecha de medición:** De 08/03/2020 hasta 15/03/2020

- **Objetivos**

Presentar los resultados del monitoreo de parámetros eléctricos realizado en el transformador con capacidad de 400 kVA en EMPRESA 2; una vez analizados los resultados se emitirán observaciones y recomendaciones a las desviaciones halladas.

- **Alcance de los trabajos**

El alcance de las actividades ejecutadas en campo realizadas desde el 08 de marzo hasta el 15 de marzo de 2020, este proyecto incluye:

Monitoreo de parámetros eléctricos por un periodo de 161 horas dónde el PCC se ubica aguas abajo del transformador

- **Descripción del sistema**

El sistema eléctrico de la EMPRESA 2, parte de su sistema eléctrico es alimentado por un transformador de 400 kVA, donde la tensión de operación del sistema es de 216/125 V. Aguas abajo del transformador es donde se ubica el PCC.

- **Monitoreo realizado**

Los resultados se presentan en gráficas y tablas, en las que se realiza un análisis en el presente informe, observando el comportamiento de los parámetros de interés, como tensiones, corrientes, potencias, factor de potencia etc.

Se realizó Un (1) monitoreo con el analizador Fluke 435 S II

- **Medición**

Se realizó en el transformador de 400 kVA. Con la realización del monitoreo se evalúan los parámetros eléctricos que puedan estar afectando el sistema de la empresa y/o sistema eléctrico de los diversos procesos desprendidos del punto de acople común.

▪ **Normatividad pertinente**

**Tabla 1** Resumen normatividad a parámetros medidos

<b>Parámetro</b>	<b>Norma Vigente</b>	<b>Límites de evaluación</b>
FRECUENCIA	<p align="center"><b><u>Resolución CREG 070/98</u></b></p> <p align="center"><i>Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada.</i></p>	<p align="center"><i>La frecuencia nominal del SIN Colombiano es de 60 Hz y su intervalo de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones Normales de operación.</i></p> <p align="center"><i>El valor máximo recomendado para desbalances de tensión en Baja Tensión en sistemas trifásicos es 2% menores a 69 kV.</i></p>
DESBALANCE DE TENSION Y CORRIENTE	<p align="center"><b><u>NTC 5001</u></b></p> <p align="center"><i>Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común.</i></p>	<p align="center"><i>El valor recomendado para desbalances de Corriente en Baja Tensión en sistemas trifásicos es de 5 al 20%, para una fase.</i></p> <p align="center"><i>En condiciones normales de suministro de energía eléctrica en los sistemas de baja tensión, la máxima tensión no deberá superar el 10% de la nominal; y la tensión mínima no deberá superar el -10% de la nominal.</i></p>
TENSION	<p align="center"><b><u>NTC 5001</u></b></p> <p align="center"><i>Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en un punto de conexión común.</i></p>	<p align="center"><i>Los valores de corrientes deben estar por debajo de los valores Nominales de la capacidad de los conductores.</i></p>
CORRIENTE	<p align="center"><b><u>NTC 2050 CÓDIGO ELÉCTRICO PRIMERA ACTUALIZACIÓN</u></b></p> <p align="center"><b><u>RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas)</u></b></p> <p align="center"><i>Última actualización resolución No. 18 – 1294 del 6 de Agosto de 2008</i></p>	<p align="center"><i>El límite máximo recomendado de distorsión armónica en tensión para niveles de tensión nominal menores a 69 kV es de 8%.</i></p>
DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD)	<p align="center"><b><u>Resolución CREG 070/98</u></b></p> <p align="center"><i>Reglamento de distribución de energía eléctrica. Numeral 6, Calidad de potencia suministrada.</i></p> <p align="center"><b><u>ANSI/IEEE std 519 - 2014</u></b></p> <p align="center"><i>“Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”</i></p>	<p align="center"><i>El límite máximo recomendado de distorsión armónica en corriente para niveles de tensión nominal menores a 69 kV es de máximo 20%.</i></p>
FACTOR DE POTENCIA	<p align="center"><b><u>Resolución CREG No. 108 de 1997 / Factor de potencia</u></b></p> <p align="center"><b><u>Resolución CREG 047 de 2004 / Factor de potencia</u></b></p>	<p align="center"><i>El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0.90).</i></p>

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

▪ **Resumen de parámetros eléctricos**

El análisis se realizó aguas abajo de transformador de 400 kVA con salida de 216/125 V donde a partir de ahora se denominará el PCC (punto de conexión o acople común).

**Tabla 4** Resumen de parámetros eléctricos medidos

Parámetro medido	FASE	Mínimo	Promedio	Máximo
Tensiones de estado estable [V]	L1	204,500	211,829	216,900
	L2	202,800	211,011	216,400
	L3	202,900	210,002	215,400
Corriente [A]	L1	15,160	143,888	424,500
	L2	11,800	136,579	436,000
	L3	8,256	108,405	393,500
Frecuencia [Hz]		59,950	60,001	60,050
Distorsión Armónica en tensión THDV [%]	L1	1,205	1,883	3,652
	L2	1,184	1,950	3,810
	L3	1,108	1,857	3,525
Distorsión Armónica en corriente THDI [%]	L1	6,8	17,8	26,4
	L2	5,2	17,6	27,3
	L3	5,4	19,2	37,8
Distorsión Total en Demanda TDD [%]			<b>18,937</b>	
Potencia Aparente [kVA]		4,713	46,659	151,200
Potencia Activa [kW]		4,470	45,332	145,600
Potencia Reactiva [kVar]		0,000	10,594	41,080
Factor de potencia [p.u]		-1,000	0,966	1,000
Desbalance en tensión [%]		0,091	0,520	1,004
Desbalance en corriente [%]		0,000	0,003	0,025

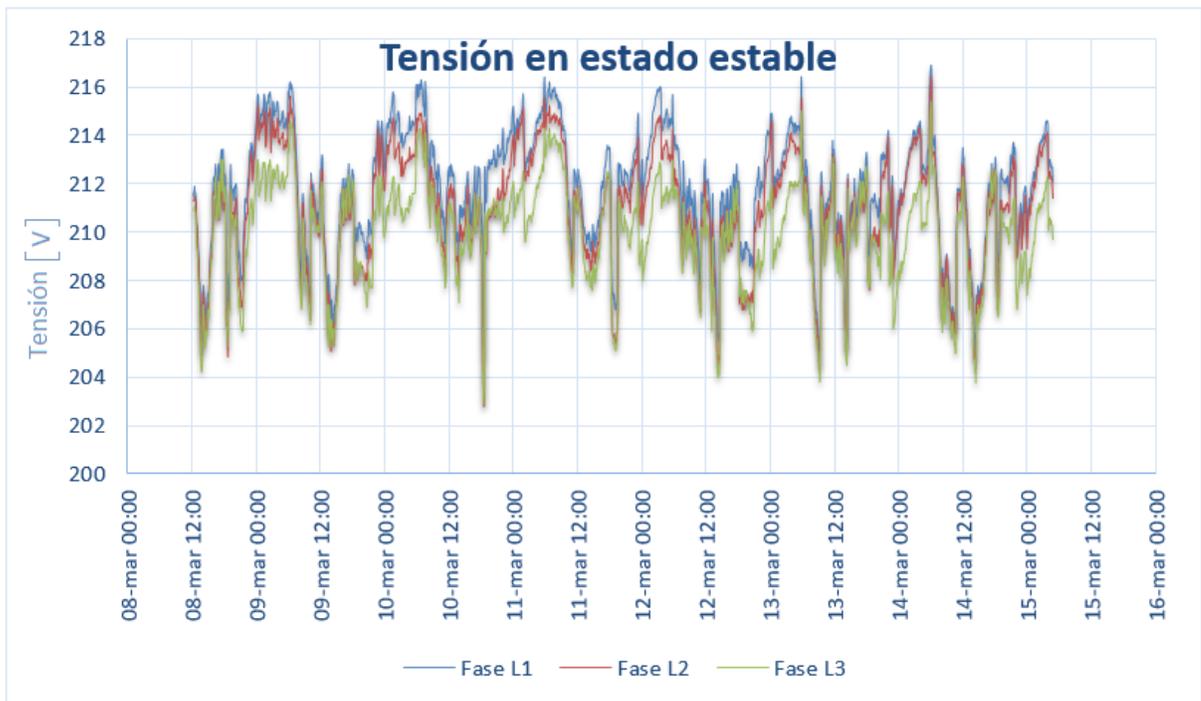
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## Análisis de la información de la medición

- Tensión en estado estable

Según la NTC 5001 los valores de tensión en estado estable son  $\pm 10\%$  de la tensión nominal, durante el monitoreo se registraron valores de tensión en la acometida principal que variaron entre 216,9 V y 202,8 V. Estos valores se consideran aceptables, dado que la tensión nominal en la salida es 216 V<sub>L-L</sub>. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de las tensiones del sistema; las tensiones más bajas presentadas se dieron cuando entró en operación la mayor parte de equipos de la compañía, sin embargo, no se presentaron desviaciones de tensión por grandes entradas de carga o perturbaciones momentáneas durante la medición que estén sobre o bajo del límite permitido.

**Figura 1** Perfil de tensión de línea



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Desbalance de tensión

Para un sistema trifásico el desbalance es definido como la diferencia entre los niveles de tensión de cada fase con referencia a la tensión nominal del sistema. Es recomendable que en un sistema eléctrico trifásico las tensiones sean lo más similares y cercanas al valor nominal. La principal causa que ocasiona el desbalance de tensión son las cargas monofásicas no balanceadas sobre sistemas trifásicos o defectos de operación en bancos de condensadores. Un desbalance de tensión puede reducir la capacidad de cargas de equipos inductivos como motores reduciendo la vida útil del aislamiento por sobretemperatura, etc. El desbalance de tensión promedio registrado fue de 0,52 %, teniendo en cuenta que la NTC 5001, establece un límite máximo de 2%, es posible determinar que este parámetro es aceptable para las acometidas bajo análisis. En el siguiente gráfico se muestra el registro del perfil de desbalance de tensión.

**Figura 4** Perfil de desbalance de tensión

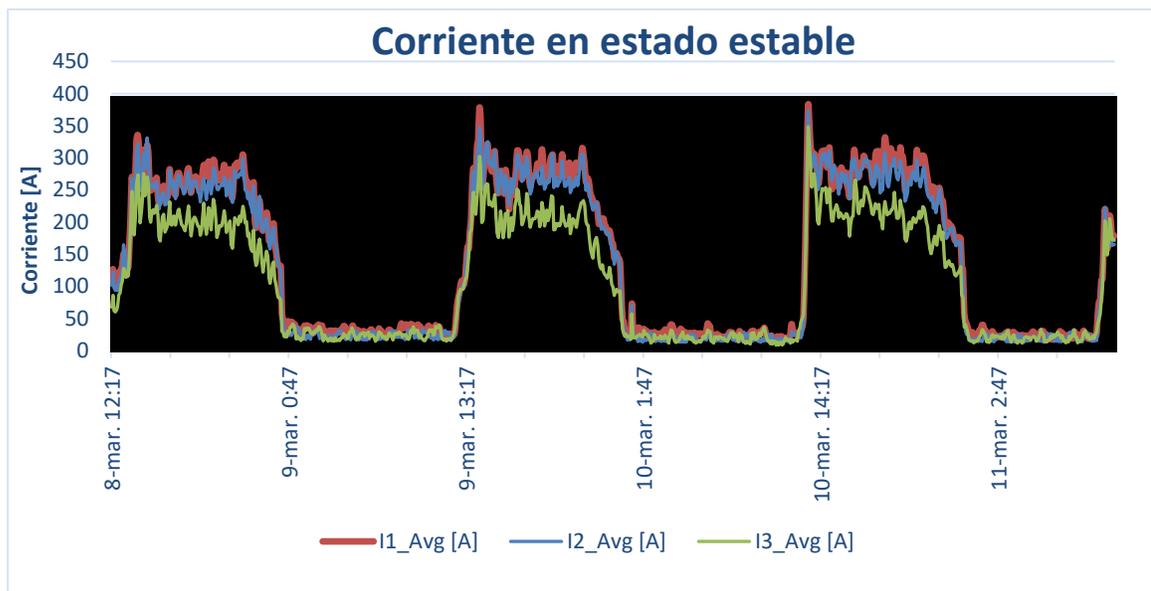


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Corriente

Durante el monitoreo la corriente máxima registrada fue de 380 A, la corriente máxima soportada por el conductor de 500 A lo que no implica inconvenientes y el valor de corriente promedio durante los momentos de carga fue de 260 A, se puede observar que sigue por debajo de la corriente nominal del transformador 1070 A. Este comportamiento de la corriente es similar en cada uno de los días de la medición, mostrando los valores pico entre las 13:00 hasta las 01:00 aproximadamente, esta característica de carga se va a ver reflejado en los demás parámetros como la potencia, factor de potencia, armónicos, etc.

**Figura 3** Perfil de corriente



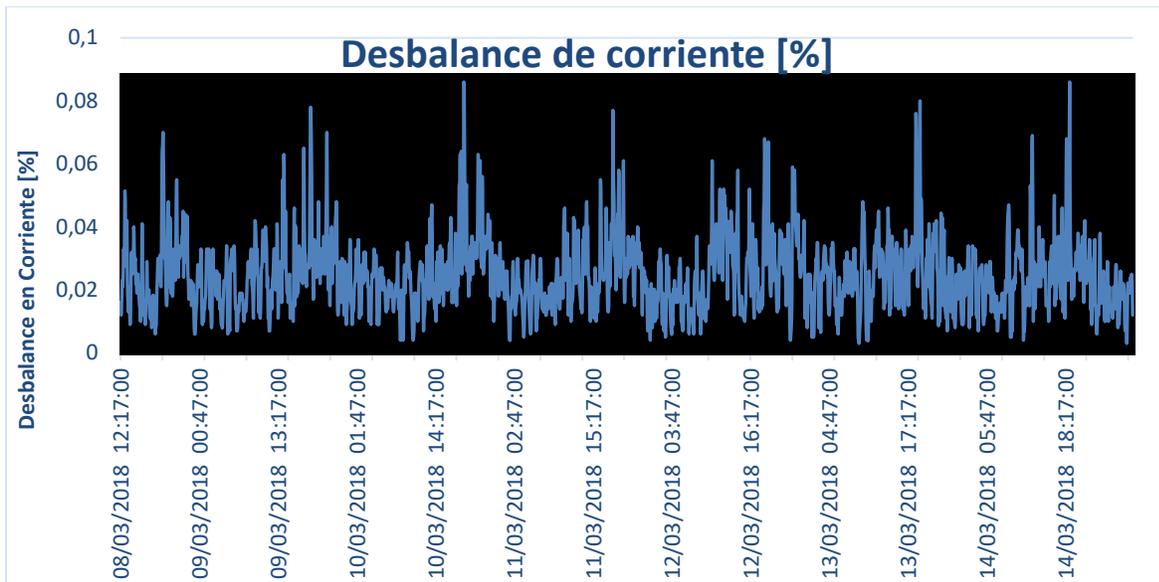
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Desbalance de corriente

El factor de desbalance de corriente se define usando la teoría de componentes simétricas, relacionando la componente de secuencia positiva y negativa. De acuerdo con la NTC 5001, los desbalances de corriente no deben ser superiores al 20 % en periodos no mayores a 10 minutos para niveles de tensión  $\leq$  a 62 kV.

En la figura siguiente se muestra los valores de desbalances en corriente registrados durante el monitoreo. Se verifica que el desbalance está dentro del intervalo permitido por la normatividad ya referida.

**Figura 4** Perfil de Desbalance de Corriente

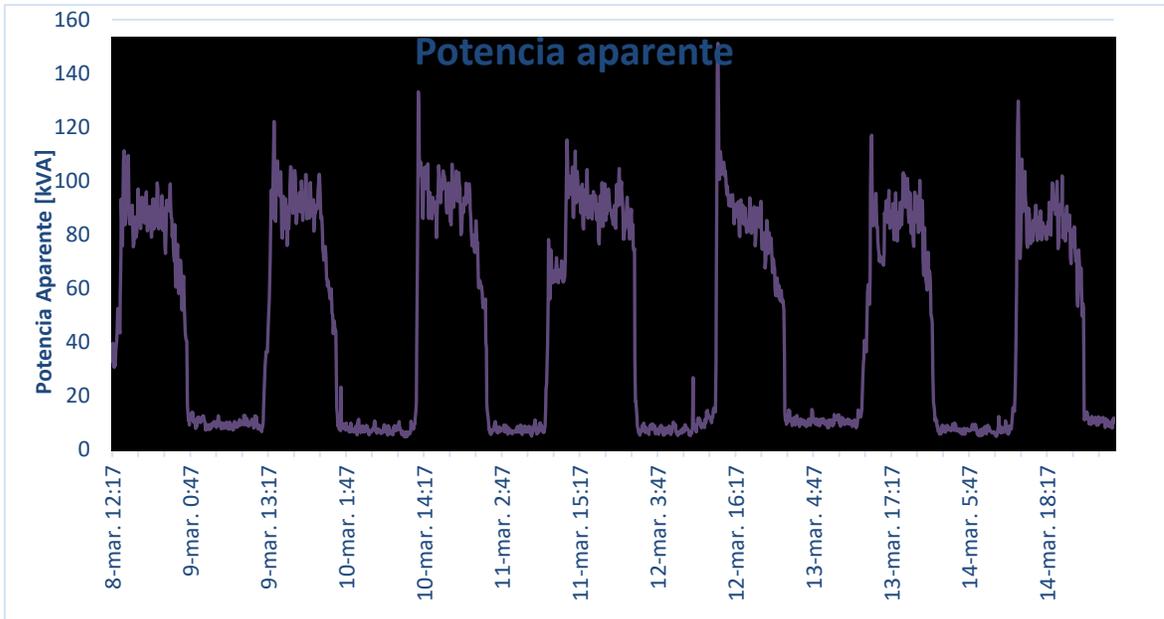


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia aparente

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 151.2 kVA a plena carga; el transformador es de 400 kVA, por lo que su cargabilidad está en un 37,8 %, cargabilidad Aceptable.

**Figura 5** Perfil de potencia aparente

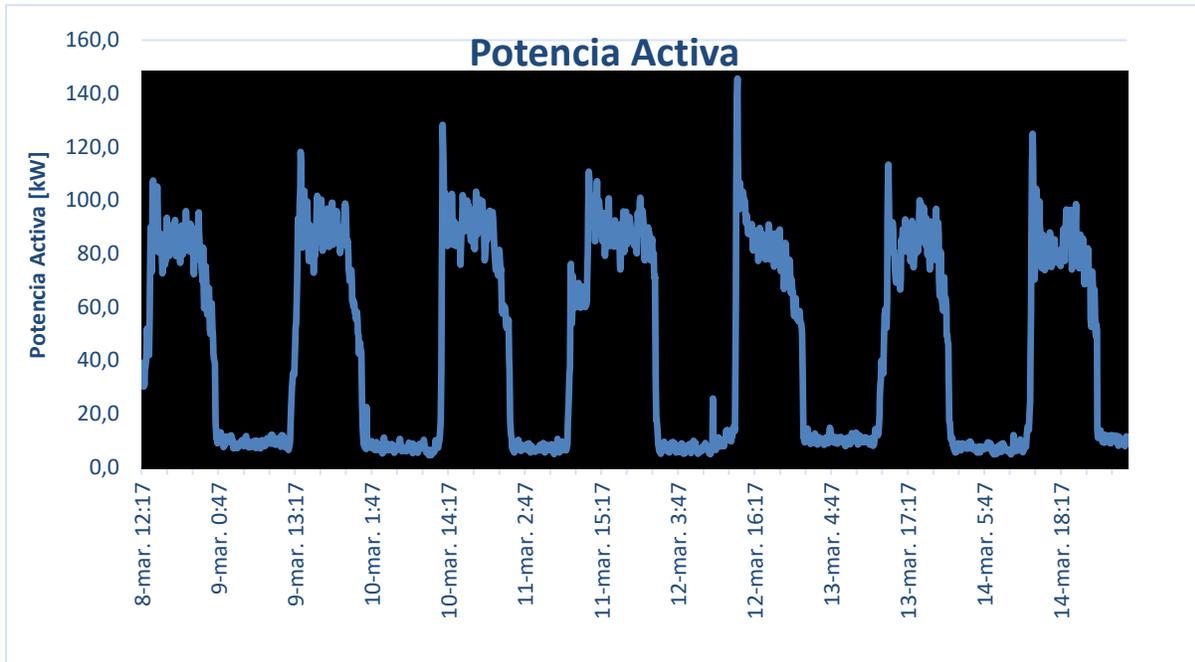


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia activa

Se puede observar que la potencia activa promedio máxima registrada fue de 145,6 kW a plena carga, se observa normalidad en el comportamiento.

**Figura 6** Perfil de potencia activa

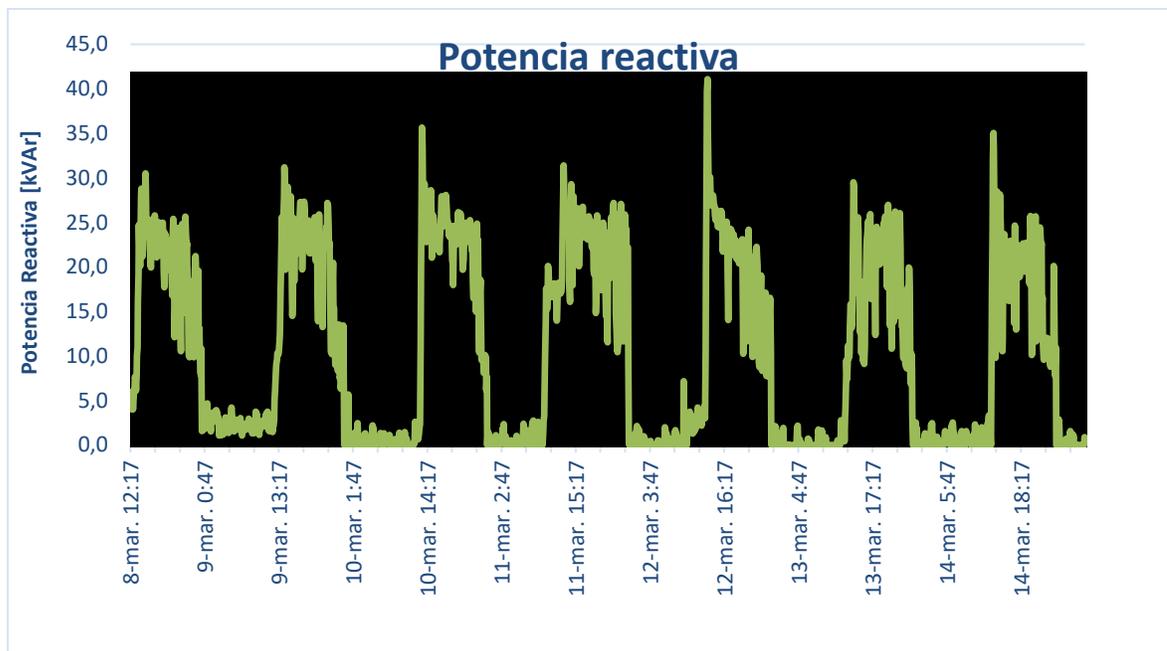


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Potencia reactiva

Se puede observar que la potencia aparente promedio máxima registrada fue de 101,603 KVAR a plena carga, lo que no supera en 50% la carga activa por lo tanto no presenta penalización basándose en la Resolución (CREG 108, 1997)/ Factor de potencia, que indica que si la energía reactiva es mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida, el exceso sobre este límite, se considerará como consumo de energía activa para la factura.

**Figura 7** Perfil de potencia reactiva



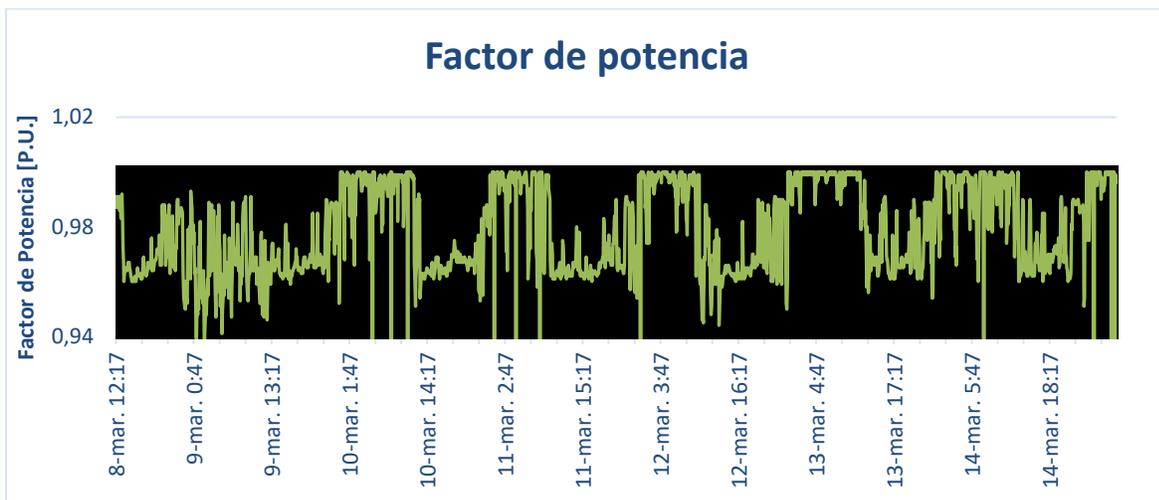
*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Factor de potencia

Es la relación entre la potencia útil consumida por una carga y la potencia aparente del mismo. El factor de potencia puede ser Inductivo (+) o puede ser capacitivo (-). La Norma técnica colombiana (NTC 5001, 2008) recomienda que, bajo operación normal, el factor de potencia debe permanecer entre 0,9 y 1 para factor de potencia inductivo y entre 0,9 y 1 para factor de potencia capacitivo durante el 95% de la operación. Los valores que se encuentran por debajo de 0,9 normalmente es causado por exceso de demanda de potencia reactiva en un sistema eléctrico producido por equipos inductivos como hornos, motores, generadores, entre otros.

En el monitoreo, se registraron valores de factor de potencia promedio de 0,966 lo que indica que este valor es aceptable. Hubo momentos en que se presentaron los valores más bajos de factor de potencia capacitivo, posiblemente entraron al sistema sistemas inductivos, sin embargo, no representa incremento en la reactiva del sistema.

**Figura 8** Perfil de factor de potencia

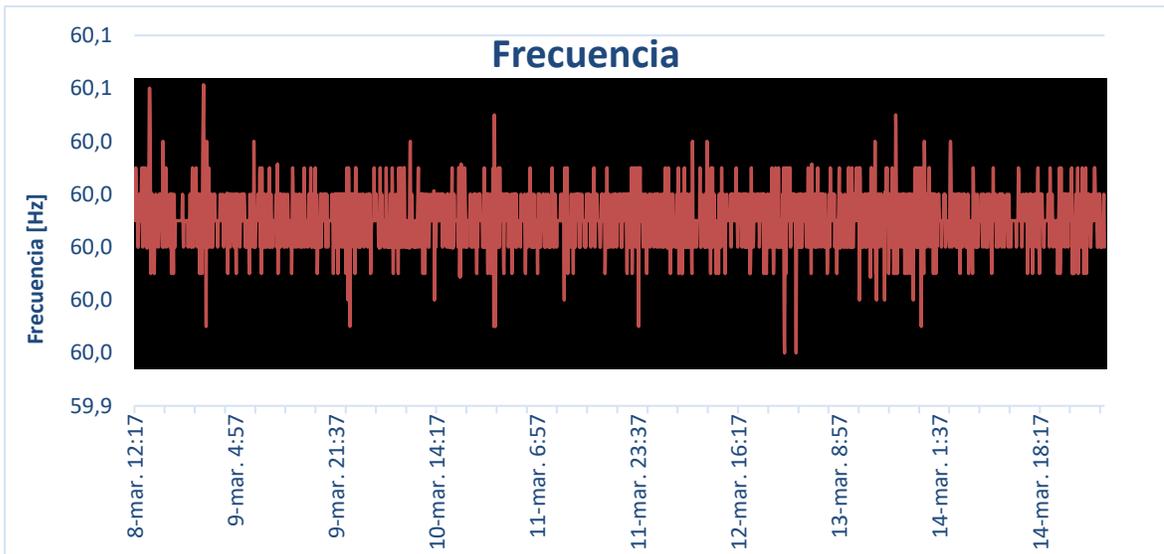


*Nota. Fuente: Elaboración propia*

## Frecuencia

Para Colombia es 60 Hz. Este valor es determinado por la velocidad de los alternadores en las estaciones de generación. Las fluctuaciones de frecuencia pueden ocasionar errores de sincronización en usuarios que tienen cargas de grandes rectificadores, comportamientos erróneos en equipos de cómputo, equipos electrónicos, entre otros. A continuación, se observa que la variación de la frecuencia se encuentra dentro de los valores admitidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC 5001, 2008) y resolución (CREG 070, 1998), dónde indica una frecuencia mínima de 59,8 Hz y máxima de 60,2 Hz, ubicándose para el caso en un mínimo de 59,95 Hz y un máximo de 60,050 Hz.

**Figura 9** Perfil de Frecuencia



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Distorsión armónica en forma de onda

Cuando la onda de corriente o de tensión en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada comparada con la onda sinusoidal ideal, se trata de una onda con componentes armónicos.

La calidad de la onda eléctrica se evalúa a través de los siguientes parámetros; (THDv) y (TDD).

- Distorsión armónica total en tensión (THDv)

Los armónicos de tensión son ondas sinusoidales dónde las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), causados normalmente por dispositivos con tensión y corriente no lineal.

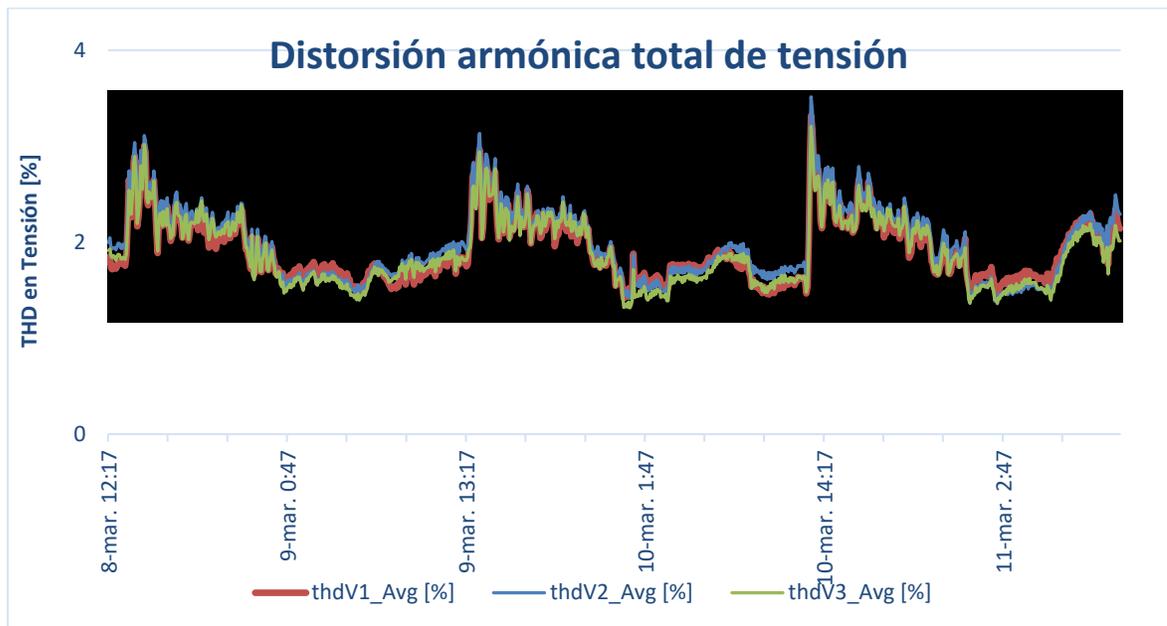
**Tabla 3** Límite de distorsión de tensión para sistemas desde 120V hasta > 161 kV

Rango de Tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica Total- THDv (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

*Nota. Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 6)*

La IEEE 519 del 2014 tiene como límite de referencia **8%** para la distorsión armónica total en tensión en estado estable, para tensiones menores a 1 kV. De acuerdo a los datos del monitoreo al calcular los porcentuales al 95 % de los valores de distorsión armónica total de tensión (THDv) se obtiene como resultado **2.242 %**, lo cual se puede decir que el valor se encuentra **dentro** del rango permitido por la norma.

**Figura 10** Distorsión armónica total de tensión



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

- Distorsión total de la demanda (TDD)

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante también es baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma (IEEE Std 519, 2014).

Para este caso tomando el valor de corriente de corto circuito  $I_{sc}$ : 16,97 kA del transformador y una corriente 95 percentil en estado estable de 260 A durante los, es posible determinar la relación  $I_{sc}/I_L$ : 61,48; relacionando este valor en la tabla de límites en la Distorsión de la Corriente de la IEEE 519 para tensiones entre 120 V – 69000 V, se observa:

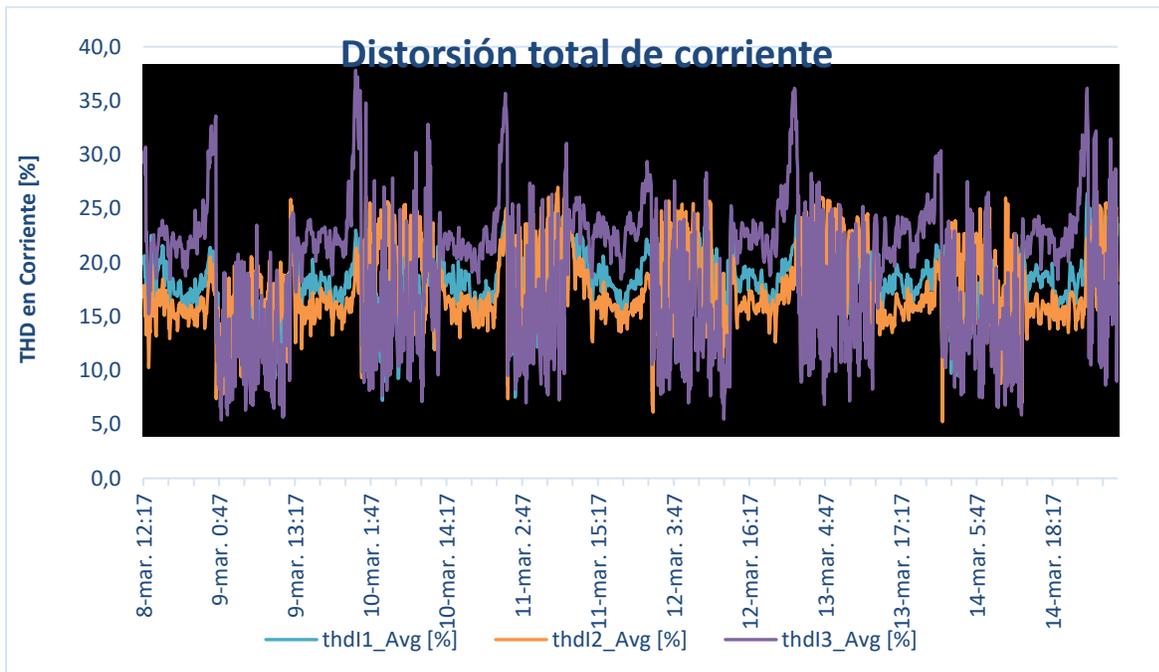
**Tabla 4** Límites de distorsión armónica de corriente

Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución 120V < Vn ≤ 69kV						
Relación Isc/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Nota. Adaptado (IEEE Std 519, 2014, pág. 7)

Que el valor máximo de TDD que debe tomar este sistema es de **12%**. El resultado obtenido para este parámetro en el punto de probabilidad del 95%, fue de **18,93%**, lo anterior indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema se encuentra **por fuera** del límite máximo permitido.

**Figura 11** Forma de onda de corriente armónica



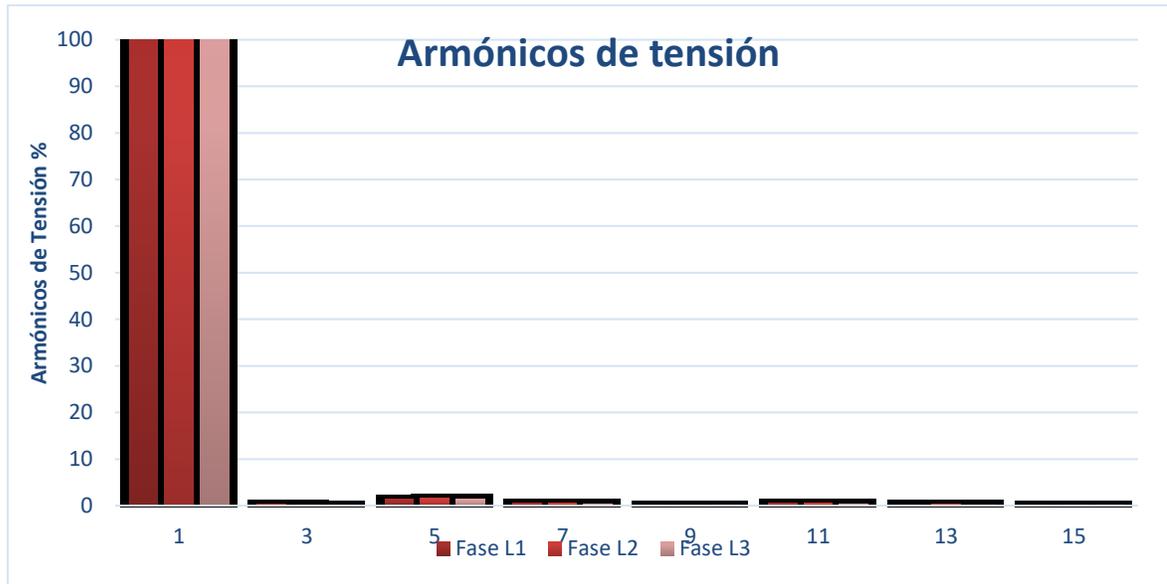
Nota. Fuente: Elaboración propia

Las posibles causas de la distorsión armónica en este punto común de conexión pueden ser por la presencia de cargas no lineales de origen electrónico, estas cargas no consumen corriente de forma progresiva, su consumo en momentos es alto y repentino.

- Armónicos individuales

En las siguientes figuras se representa el porcentaje de armónicos individuales de tensión y corriente con respecto a la fundamental.

**Figura 12** Armónicos individuales de tensión



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

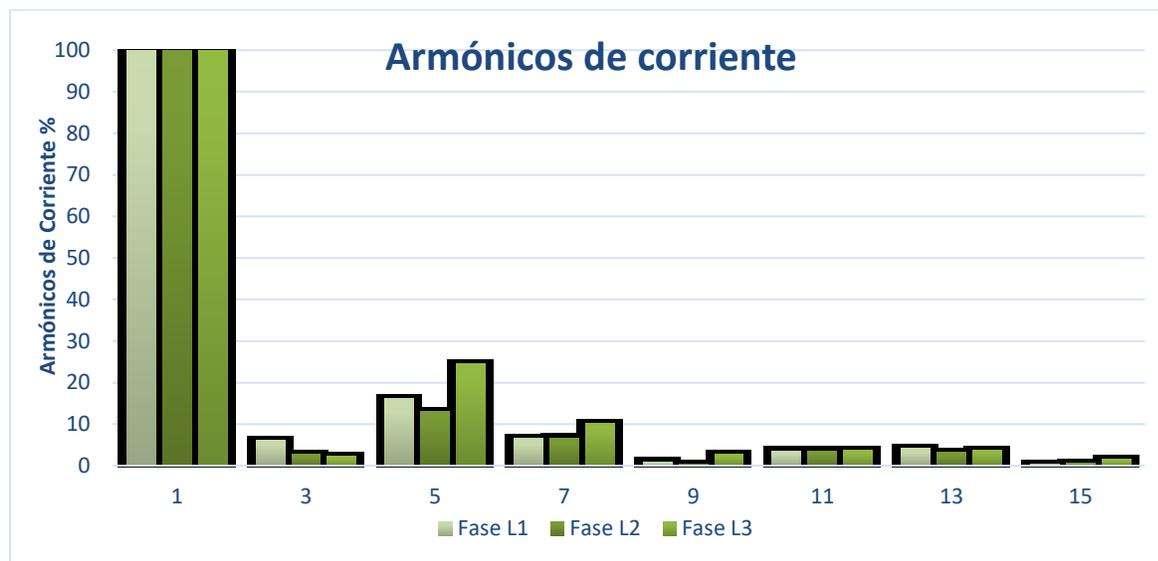
**Tabla 5** Armónicos de tensión

Armónicos				% THD voltaje total	IEEE std 519 - 2014
3 th	5 th	7 th	9 th	Promedio	
0,31	1,30	0,48	0,16	2,24	Si cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

El armónico de tensión de mayor influencia es el 5° con un valor del **1,30 %**, la cual se encuentra **DENTRO** de lo recomendado por el estándar como límite máximo de distorsión por componente armónico individual de voltaje (**5%**).

**Figura 13** Armónicos individuales de corriente



*Nota. Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 6** Análisis armónico de corriente

SCR=Isc/In	Armónicos					IEEE std 519 - 2014	% TDD corriente total	IEEE std 519 - 2014
	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th		95%	
61,48	6,18	16,08	6,51	0,97	3,61	No cumple	18,93	No cumple

*Nota. Fuente: Elaboración propia*

El armónico individual de corriente de mayor influencia es el 5° con un valor de 16,08 %, lo que indica que se encuentra **POR FUERA** de lo recomendado por el estándar que tiene como límite máximo de distorsión por componente armónica individual de corriente (10% para este nivel de relación Isc/In)

## ▪ **Conclusiones y recomendaciones de la medición**

Como resultado del análisis de los parámetros eléctricos se tienen las siguientes conclusiones.

- El comportamiento de los niveles de tensión en estado estable estuvo en óptimas condiciones. Las variaciones de la tensión con duración mayor a 1 minuto, no registran valores que se encuentren por fuera del  $\pm 10\%$  de la tensión nominal del punto de conexión común (PCC). Los desbalances de tensión se encuentran dentro de valores aceptables.
- La corriente no registra valores por fuera de la capacidad nominal del conductor, y los desbalances de corriente no están por fuera de valores aceptables para la alimentación eléctrica de las cargas trifásicas del sistema.
- El nivel de distorsión armónica en corriente fue de 18,93 %, lo que nos indica que la deformación de la onda de corriente ocasionada por las cargas del sistema, se encuentra **por fuera del intervalo establecido por la norma** (12% para este nivel de relación  $I_{sc}/I_n$ )
- Los armónicos individuales de corriente presentan una desviación, pues el 5° armónico muestra un porcentaje de 16.08 %, cuando el máximo permitido es de 10%. Estos armónicos tienen muchas implicaciones en motores eléctricos pues son de secuencia negativa, lo que representa que se cree un campo magnético inverso que tiende a frenar el equipo y aumentar la demanda de corriente, pues la potencia que debe entregar es la misma, también a disminuir la vida útil del aislamiento del motor, pues trabajará a mayores temperaturas.

## ▪ **Recomendaciones**

- Se recomienda instalar un filtro de armónicos, para la eliminación o mitigación de los mismos, así evitar penalizaciones por reinyección de armónicos al sistema, como también evitar daños en equipos, paradas no programadas por disparo de protecciones, evitar errores en equipos electrónicos sensibles, etc.
- Se recomienda hacer una inspección de termografía a todo el sistema eléctrico de la planta, incluyendo tableros, banco de condensadores, ya que, con la identificación y corrección de puntos calientes, se puede mejorar la calidad de

energía del sistema, evitando desbalances, fallas y demás por falsos contactos, además de otras consecuencias derivadas de dichos puntos calientes.

- Se recomienda identificar con cinta de colores todos los conductores de las instalaciones como lo establece el RETIE, así se evitan conexiones erróneas y confusión entre conductores que puedan afectar la integridad de las personas y de los equipos.
- Se recomienda que la subestación disponga de un diagrama unifilar del sistema eléctrico tal como lo establece el RETIE en el artículo 10; Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas.

## **E. Anexo: Configuración y conexión analizador**

### **▪ Conexión del analizador**

La conexión y configuración de los analizadores de calidad de energía son similares independiente de la marca o tipo, las diferencias básicamente radican en la interfaz en la pantalla para su uso. En este segmento se usará como referencia el analizador FLUKE 435 Series II, que fue usado para el desarrollo de este proyecto.

### **▪ Criterios de seguridad para el uso del equipo**

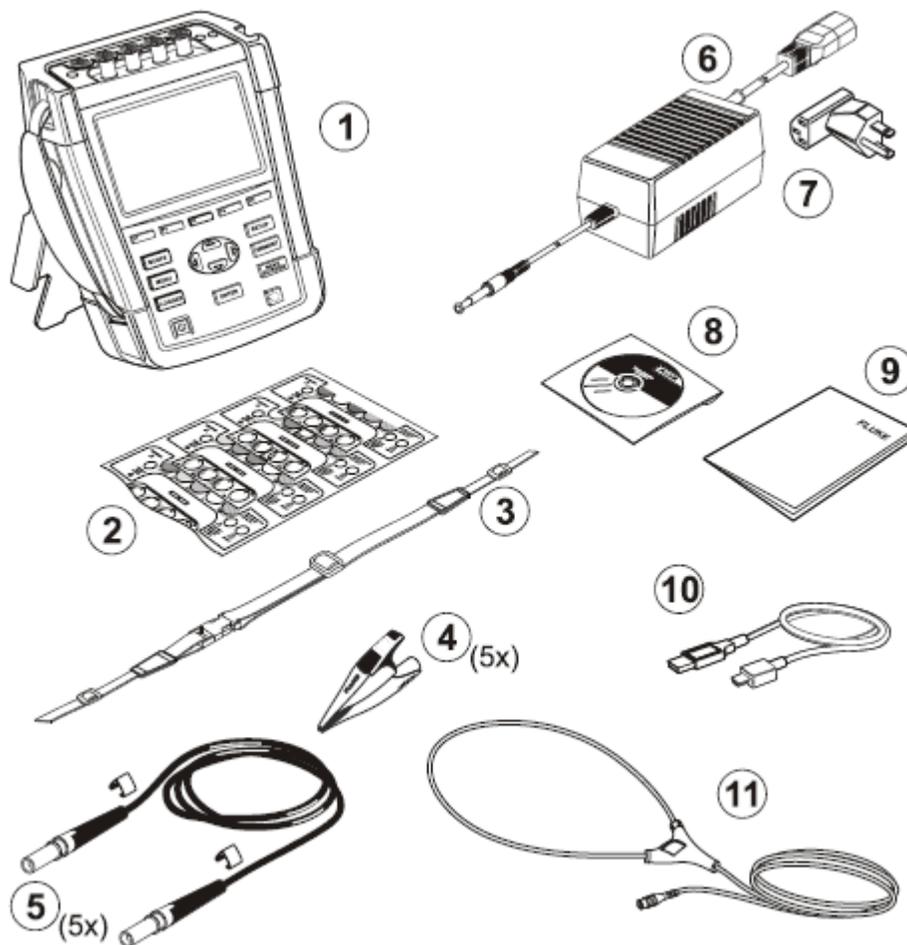
Para evitar que se produzcan incidentes eléctricos:

- Leer el manual del usuario antes de maniobrar el equipo.
- Revise las instrucciones.
- Siempre trabaje acompañado.
- No usar el equipo cercano a fuentes de gas o vapores de alta ignición, de igual manera evitar ambientes con alta humedad.
- Use únicamente las sondas flexibles aisladas, cables y demás accesorios exclusivos del equipo Fluke 434-II/435-II/437-II.
- Evite ubicar los dedos por delante de los protectores de las sondas.
- Antes de cada actividad es necesario inspeccionar el equipo y sus accesorios, revisando que no haya fisuras, falta de aislante, etc. En caso de encontrar daño, evite usar y llevar a revisión.
- Verifique el nivel de tensión al que va a ser sometido el analizador.
- No use el equipo con tensiones superiores a la indicada en el equipo.
- Los accesorios que no estén en uso deben estar desconectados del analizador.
- Primero conecte el adaptador a la fuente de corriente alterna antes de conectar al analizador.

- Cumpla las normas de seguridad del sitio de la medición.
- Es necesario el uso de equipos de protección personal, como guantes de acuerdo al nivel de tensión, careta de protección y ropa de acuerdo a le energía incidente del lugar con el fin de evitar lesiones mayores en caso de arco eléctrico.
- Procure trabajar sin tensión al momento de instalar la sonda flexible de corriente o use los elementos de protección personal adecuados.

▪ **Partes del analizador**

**Figura 1** Contenido del kit del analizador



*Nota. (Fluke manual de uso, 2012, pág. 9)*

**Tabla 1** Contenido del kit del analizador

N°	Descripción
1	Analizador de calidad de la energía eléctrica Fluke 43x Serie II
2	Etiquetas
3	Correa.
4	Juego de 5 pinzas de tensión
5	Juego de 5 cables de prueba
6	Adaptador de red.
7	Juego de adaptadores para conectar a la red eléctrica
8	Manual de seguridad
9	CD-ROM manuales, software y USB
10	Cable de interfaz
11	Ampflex de CA 6.000 A

*Nota. Adaptado (Fluke manual de uso, 2012, pág. 10)*

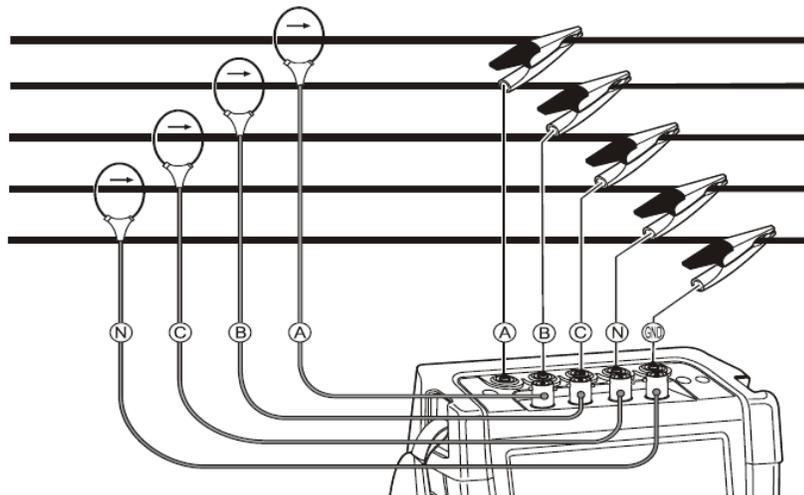
▪ **Configuración de parámetros**

Los analizadores miden diferentes tipos de parámetros, es posible escoger cuales se requieren de acuerdo a la necesidad, capacidad de memoria y tiempo de medición.

- **Esquema de conexión**

A continuación, se muestra un ejemplo de conexión del analizador en un sistema trifásico, donde cada pinza de tensión va conectada a cada una de las fases, al neutro y la tierra; y las de corriente a cada fase y neutro del sistema.

**Figura 2** Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico



*Nota. Adaptado (Fluke manual de uso, 2012, pág. 36)*

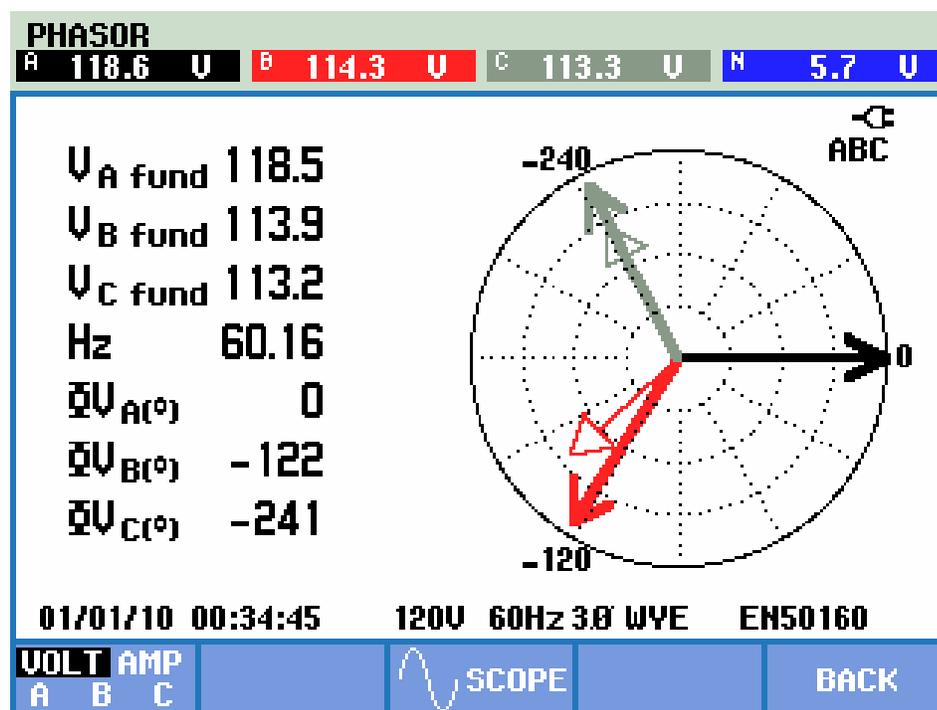
Primero se disponen las pinzas amperimétricas en los conductores de fase y neutro verificando con la flecha que la dirección del flujo de corriente sea el correcto, en caso de ser conectadas al revés, en el diagrama de fasores se puede evidenciar una corriente negativa. Luego, conecte las pinzas de tensión, se debe empezar por la de tierra para protección personal y del equipo, después conecte en las fases y neutro.

- **Verificación de conexión – Diagrama fasorial – Osciloscopio**

Una vez el dispositivo esté conectado, se debe verificar que la conexión sea la correcta, que las pinzas de tensión correspondan a las de corriente, que el contacto de las pinzas de tensión sea firme.

Las tensiones de fase y las corrientes, deben aparecer secuencialmente en el sentido de las agujas del reloj como se muestra a continuación.

**Figura 3** Diagrama de vectores correspondiente al analizador correctamente conectado

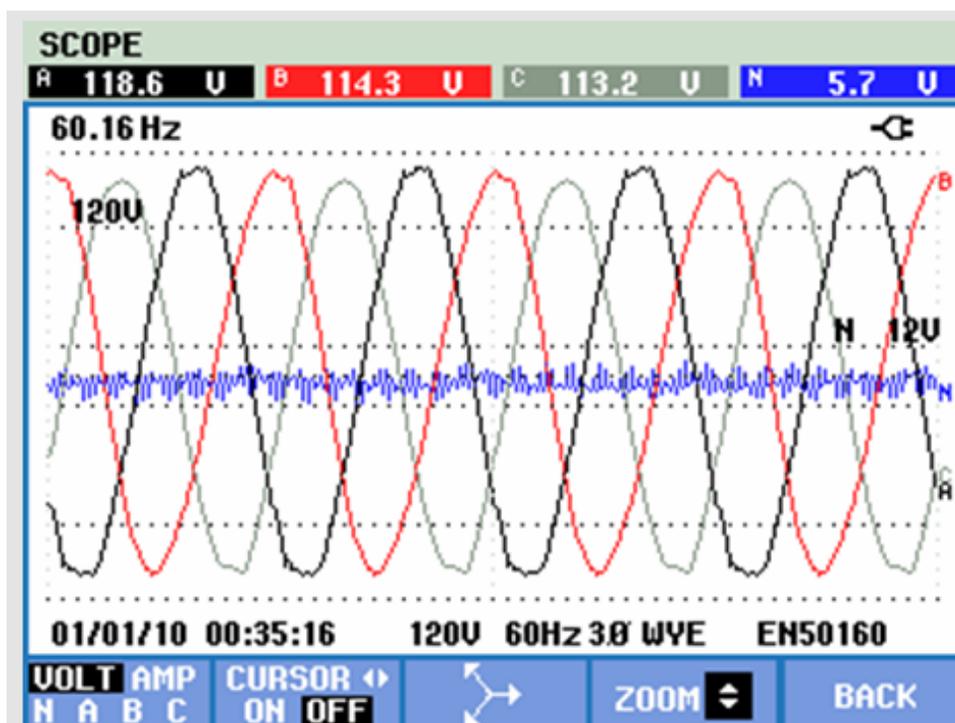


*Nota. Adaptado (Fluke manual de uso, 2012, pág. 37)*

Esta interfaz permite comprobar si los cables de tensión y las sondas flexibles de corriente están conectadas debidamente. Las tensiones de fase F1, F2 y F3 deben estar en secuencia y a una distancia no mayor a 120 grados, los vectores de corriente y tensión deben tener la misma dirección con un cambio de fase que no sea superior a 30 grados normalmente, si fuese mayor, se debe revisar su correcta conexión o verificar el contenido de armónicos en el sistema.

La interfaz osciloscopio muestra claramente las formas de onda de tensión y de corriente, si estas se encuentran distorsionadas, es recomendable ver los armónicos, se debe verificar también que el nivel de tensión mostrado sea cercano al nivel de tensión nominal del lugar dónde se hace la medición de calidad de energía.

**Figura 4** Osciloscopio



*Nota.* Adaptado (Fluke manual de uso, 2012, pág. 39)

## Bibliografía

- CREG 047. (2004). *Comisión de regulación de energía y gas*. Bogotá D.C, Colombia.
- CREG 070. (1998). *Comisión de regulación de energía y gas*. Bogotá D.C, Colombia.
- CREG 108. (1997). *COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS*. Bogotá D.C, Colombia.
- ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. (2002). *El abc de la calidad de la energía eléctrica*. Mexico D.F: Limusa.
- Fluke manual de uso. (2012). *Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica*. Obtenido de <https://docs.rs-online.com/2119/0900766b815db111.pdf>
- Gruzs, T. M. (1990). *A survey of neutral currents in three-phase computer power systems*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL 26, NO. 4, JULY/AUGUST.
- IEC 61000-4-30. (2003). *Técnicas de ensayo y medición - Métodos de medición de calidad de potencia*.
- IEEE 1159. (2009). *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. Estados Unidos.
- IEEE Std 519. (2014). *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York, USA.
- IEEE, S. (1998). *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.
- INCOMBUSTIÓN, U. (2014). *DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LOS SUBSECTORES MANUFACTUREROS CÓDIGOS CIIU 10 A 18 EN COLOMBIA*. Medellín.
- NTC 5000, N. (2002). *CPE, definiciones y términos fundamentales*. Bogotá D.C: ICONTEC. Bogotá D.C: ICONTEC.
- NTC 5001, N. (2008). *CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. LÍMITES Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EN PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN*. Bogotá D.C. : ICONTEC.

PDMA. (s.f.). *Análisis por zonas de falla*. Obtenido de [https://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis\\_de\\_Zonas\\_de\\_Falla.pdf](https://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis_de_Zonas_de_Falla.pdf)

Schneider Electric. (s.f.). *Manual de usuario Filtro activo de armónicos AccUSine PCS*. Obtenido de [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=NHA96841-00\\_AccuSine%2B\\_User-Manual\\_ES.pdf&p\\_Doc\\_Ref=NHA96841-00](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=NHA96841-00_AccuSine%2B_User-Manual_ES.pdf&p_Doc_Ref=NHA96841-00)

Schneider, E. (2019). *Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos*. Obtenido de [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=ESMKT01182E19\\_SE\\_c ompensacion-energia-2019+%28web%29.pdf&p\\_Doc\\_Ref=ESMKT01182A16](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=ESMKT01182E19_SE_c ompensacion-energia-2019+%28web%29.pdf&p_Doc_Ref=ESMKT01182A16)

UPME. (s.f.). *Corrección de factor de potencia y control de la demanda*.