

Estudio de la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205 (URE Y ER)

Diego Fernando Gutiérrez Martínez

Jhonattan Andrés Vargas Daza

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director:

Gabriel Ordóñez Plata

Doctor Ingeniero Industrial

Codirector:

Alejandra Martínez Peñaloza

Ingeniera Electricista

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios, por mi familia, por la salud y por todas las bendiciones con las que ha guiado mi vida y me ha permitido alcanzar esta meta.

A mi madre Teresa De Jesús Martínez Ramírez por su apoyo incondicional, su sacrificio, dedicación y por ser mi motivación para seguir adelante y lograr este objetivo.

A mis hermanas Martha y Leydi por creer en mí y darme su apoyo en los momentos más difíciles.

A mi familia tías, tíos y primos por su apoyo incondicional

A Don Vicente Rojas Ferrer por sus valiosos consejos y por ser la persona más influyente en la gran decisión de estudiar esta carrera

A mi amigo, compañero de proyecto y de carrera Jhonattan, gracias por su paciencia y comprensión.

A mis amigos por todas las anécdotas y experiencias vividas durante estos años.

DIEGO FERNANDO GUTIÉRREZ MARTÍNEZ

Quiero dedicar este proyecto de grado a Dios por darme la vida y siempre llenarme de sabiduría, a mis padres José Tiberio Vargas y María Eugenia Daza, por ser ese motor que me llenaron de fuerza cuando perdía el rumbo y quería desistir de alcanzar la meta, además de su incansable esfuerzo para convertirme en profesional.

A mis hermanas Mónica, Sindy y Karito por acompañarme en este camino siendo una voz de aliento en las adversidades, a mis dos sobrinas que con su ternura e inocencia me hacían sonreír a la distancia.

A mis abuelos Benigno, Mercedes y Ana Adelina que tenían todas sus ilusiones puestas en mí cada vez que tenía que dejar mi casa, a mi abuelo Nicanor que desde el cielo me guía en cada paso que doy.

A mis tíos por sus consejos y palabras de ánimo, por visualizarme como un gran Ingeniero Electricista, todos ellos son igual de importantes sin embargo Sonia, Sandra, Olivia, Jahir y Lucio fueron un pilar importante en la realización de este sueño.

A todos mis primos que son como mis hermanos, Jeffer que desde el cielo aun me acompaña, Lina, Santiago, Nicolas, Deisy y Walter por su cariño y comprensión. A toda mi familia que este triunfo es para ellos, aunque no los mencione a todos siempre los tengo en mi corazón.

A Camila González que me acompañó en los momentos más difíciles, con sus palabras de cariño y abrazos me llenaron de seguridad y valentía.

A mi compañero Diego Fernando Gutiérrez, que a pesar de las adversidades siempre tenía las palabras adecuadas para subir el ánimo.

A Brayan Guerrero por todas sus enseñanzas antes de partir de este mundo, a todos ellos que confiaron en mí e hicieron parte de este grandioso sueño.

JHONATTAN ANDRÉS VARGAS DAZA

Agradecimientos

*Al Doctor Gabriel Ordoñez Plata, director de este proyecto de grado,
por todos sus aportes para el desarrollo de este trabajo.*

*A la Ingeniera Alejandra Martínez Peñaloza, codirectora de este proyecto,
por la dedicación, paciencia, tiempo y sobre todo su valiosa colaboración.*

*A la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E³T)
por permitirnos crecer en sus aulas como profesionales y a todos sus docentes
que estuvieron presentes en nuestra formación académica.*

*A los laboratoristas que fueron de gran ayuda
en las actividades realizadas en el edificio de Alta Tensión.*

*A nuestros amigos, compañeros de clase y futuros colegas
que durante estos años hicieron más agradable
el paso por esta hermosa Universidad.*

DIEGO FERNANDO GUTIÉRREZ MARTÍNEZ

JHONATTAN ANDRÉS VARGAS DAZA

Contenido

	Pág.
Introducción	21
1. Definiciones y terminología de los principales parámetros de la calidad de la energía eléctrica, sistemas de puesta a tierra y calentamiento de conductores	23
1.1 Parámetros calidad de la energía eléctrica	24
1.1.1. Transitorio electromagnético.	26
1.1.2. Transitorio electromagnético tipo impulso.	26
1.1.3. Transitorio electromagnético tipo oscilatorio.	27
1.1.4. Variaciones de corta duración.....	28
1.1.5. Huecos de tensión (Sags).....	28
1.1.6. Elevaciones de tensión (Swells).....	29
1.1.7. Interrupciones temporales.	30
1.1.8. Variaciones de larga duración.....	31
1.1.9. Sobretensión.....	31
1.1.10. Subtensión.....	32
1.1.11. Interrupción sostenida.....	32
1.1.12. Desbalance de tensión.....	32
1.1.13. Desbalance de corriente.....	32
1.1.14. Distorsión de onda.	32
1.1.15. Distorsión armónica total de corriente (THDi).....	33

1.1.16. Distorsión armónica total de tensión (THDv).....	33
1.1.17. Componente en DC.....	33
1.1.18. Armónicos.....	33
1.1.19. Interarmónicos.	34
1.1.20. Muestras.....	34
1.1.21. Ruido.....	35
1.1.22. Flicker.	35
1.1.23. Variaciones de frecuencia de alimentación.....	36
1.2. Sistema de puesta a tierra.....	36
1.2.1. Neutro.	38
1.2.2. Tierra.	38
1.2.3. Suelo.	38
1.2.4. Resistividad eléctrica (ρ).	38
1.2.5. Conductividad eléctrica (χ).....	38
1.2.6. Puesta a tierra.	38
1.2.7. Conductor de puesta a tierra de los equipos.....	39
1.2.8. Conductor del electrodo de puesta a tierra.....	39
1.2.9. Barraje equipotencial.	39
1.2.10. Conexión de puesta a tierra.....	39
1.2.11. Conexión equipotencial.	39
1.2.12. Electrodo de puesta a tierra.....	40
1.2.13. Equipotencialidad o unión permanente.....	40
1.2.14. Telurómetro.....	40

1.3. Calentamiento de conductores	40
1.3.1. Conductor.....	40
1.3.2. Conductor aislado.	41
1.3.3. Efecto Joule.....	41
1.3.4. Esfuerzo dieléctrico.	41
1.3.5. Pantalla.....	41
1.3.6. Rigidez dieléctrica.	41
1.3.7. Ganancia de calor.....	41
2. Inspección de la instalación eléctrica del Laboratorio AT205 (URE Y ER).....	42
2.1 Normatividad y reglamentación.....	42
2.1.1. NTC 2050.....	42
2.1.2. RETIE.	43
2.2. Código de colores para conductores	43
2.3. Metodología para realizar la inspección de la instalación eléctrica.....	44
2.3.1. Inspección visual.....	44
2.3.2. Tablero de protección.	45
2.3.3. Circuitos.....	45
2.4. Metodología para dictaminar la inspección eléctrica.....	46
2.4.1. No conformidad leve (NCL).....	46
2.4.2. No conformidad grave (NCG).	46
2.4.3. No conformidad muy grave (NCMG).....	47
2.5. Resultados de la inspección al Laboratorio AT205	47
2.5.1. Disposiciones generales.....	48

2.5.2. Sistema de puesta a tierra.....	48
2.5.3. Tomacorrientes.	54
2.5.4. Canalizaciones.	56
2.5.5. DPS e interruptores.	57
2.5.6. Tableros de control y distribución.	59
3. Evaluación de las especificaciones de los parámetros de calidad de energía eléctrica requeridos por los equipos del Laboratorio	64
3.1. Criterios técnicos y normatividad	64
3.2. Análisis de los requerimientos para los equipos sensibles del Laboratorio AT205	71
4. Metodología para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205	75
4.1. Planteamiento del problema.....	75
4.2. Análisis preliminar.....	77
4.3. Equipos de medida.....	77
4.3.1. Analizador de redes PQube 3.....	78
4.3.2. Medidor de potencia trifásico UT267B.	78
4.3.3. Cámara termográfica Fluke TiS50.....	79
4.4. Establecer los parámetros de calidad de la energía eléctrica para su medición.....	80
4.5. Ubicación de los puntos y tiempo en el cual se va a realizar la medición.....	81
4.6. Configuración y conexión del equipo de medición	82
5. Análisis de resultados obtenidos en la monitorización de la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205	87
5.1. Mediciones realizadas con el analizador de redes de PQube 3.....	87

5.1.1. Análisis de la distorsión armónica individual IHD _v	90
5.1.2. Análisis de el desbalance de tensión.....	97
5.1.3. Análisis de la distorsión armónica total.....	98
5.1.4. Análisis de la forma de onda de tensión.	100
5.2. Mediciones realizadas con el equipo de medida UT267B.....	106
5.3. Mediciones realizadas con la cámara termográfica Fluke TiS50	111
6. Conclusiones.....	114
7. Recomendaciones	116
Referencias bibliográficas.....	117

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Transitorios impulsivos en el sistema eléctrico	27
<i>Figura 2.</i> Transitorio oscilatorio causado por la conmutación de condensadores consecutivos. .	28
<i>Figura 3.</i> Hueco de tensión.....	29
<i>Figura 4.</i> Elevación de tensión debido a falla u operación en el sistema.	30
<i>Figura 5.</i> Interrupción momentánea debido a falla u operación en el sistema.	31
<i>Figura 6.</i> Forma de onda de corriente y espectro armónico para la corriente de entrada	34
<i>Figura 7.</i> Muecas de tensión causada por un convertidor.....	35
<i>Figura 8.</i> Fluctuaciones de tensión causadas por el funcionamiento de un horno de arco.....	36
<i>Figura 9.</i> Pirámide de calidad de la energía.	37
<i>Figura 10.</i> Código de colores para conductores C.A.....	44
<i>Figura 11.</i> Conexión de un solo sistema de puesta a tierra	49
<i>Figura 12.</i> Conexión de puesta a tierra del edificio Alta tensión	49
<i>Figura 13.</i> Método de la caída de potencial.	50
<i>Figura 14.</i> Medidor de puesta a tierra METREL 2088	51
<i>Figura 15.</i> Medida de la resistencia de puesta a tierra	51
<i>Figura 16.</i> Sistemas con puesta a tierras dedicadas e interconectadas.	52

<i>Figura 17.</i> A. Tomacorriente monofásica 127 V, B. Tomacorriente monofásica 220 V, C. Tomacorriente monofásica 220 V, D. Toma de servicio 110 V, E. Tomacorriente regulado 20 A.....	55
<i>Figura 18.</i> Conductor encauchetado de las tomas reguladas.....	55
<i>Figura 19.</i> Canalizaciones	57
<i>Figura 20.</i> Suciedad en las canalizaciones	57
<i>Figura 21.</i> DPS del tablero principal	58
<i>Figura 22.</i> Tablero principal.....	60
<i>Figura 23.</i> Tapa frontal del tablero de distribución normal 2.....	61
<i>Figura 24.</i> Cierre del tablero de distribución normal 2	61
<i>Figura 25.</i> Suciedad sobre el tablero principal.....	62
<i>Figura 26.</i> Suciedad sobre el tablero de distribución normal 1	63
<i>Figura 27.</i> Suciedad sobre el tablero de distribución normal 2.....	63
<i>Figura 28.</i> Módulo de energía eólica de Lucas Nülle	68
<i>Figura 29.</i> Módulo de celdas solares fotovoltaicas de Lucas Nülle	70
<i>Figura 30.</i> Fuente Chroma 61701.....	71
<i>Figura 31.</i> Analizador de red PQube 3	78
<i>Figura 32.</i> Medidor de potencia trifásico UT267B	79
<i>Figura 33.</i> Cámara termográfica TiS50.....	79
<i>Figura 34.</i> Analizador de red PQube 3 conectado al tablero de distribución normal 1	84
<i>Figura 35.</i> Conexión de los PQube 3 a los tableros de distribución normal 1 y normal 2.....	85
<i>Figura 36.</i> Conexión de los medidores UT267B al tablero normal 2	86
<i>Figura 37.</i> Máximo IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido en el RVC.....	91

<i>Figura 38.</i> IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido del RVC registrado de mas	92
<i>Figura 39.</i> IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido de un <i>cambio</i> de forma de onda.....	93
<i>Figura 40.</i> IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido de un cambio de forma de onda.....	94
<i>Figura 41.</i> IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido de la baja frecuencia.	95
<i>Figura 42.</i> IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido de una instantánea.....	96
<i>Figura 43.</i> Desbalance de tensión en los tableros de distribución normal 1 y normal 2	98
<i>Figura 44.</i> THDv para el tablero de distribución normal 1	99
<i>Figura 45.</i> THDv para el tablero de distribución normal 2	100
<i>Figura 46.</i> Onda de tensión registrada antes del RVC	101
<i>Figura 47.</i> Espectro armónico de la onda de tensión registrada antes el RVC	102
<i>Figura 48.</i> Onda de tensión registrada durante del RVC.....	103
<i>Figura 49.</i> Espectro armónico de la onda de tensión registrada durante el RVC.....	104
<i>Figura 50.</i> Onda de tensión registrada después del RVC.....	104
<i>Figura 51.</i> Espectro armónico de la onda de tensión registrada después el RVC	105
<i>Figura 52.</i> Onda de corriente registrada por el PQube 3.....	106
<i>Figura 53.</i> Medición en el tablero normal 1 con la cámara termográfica.	111
<i>Figura 54.</i> Medición en el tablero normal 2 con la cámara termográfica.	112
<i>Figura 55.</i> Medición en el tablero general con la cámara termográfica.	112
<i>Figura 56.</i> Medición en el banco de trabajo 2 con la cámara termográfica.	113

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Categorías y características típicas de los fenómenos de calidad de la energía eléctrica</i>	24
Tabla 2. <i>Normas y estándares utilizados para la evaluación de los parámetros de calidad de la energía</i>	66
Tabla 3. <i>Parámetros obtenidos a partir de la operación habitual del Laboratorio</i>	72
Tabla 4. <i>Parámetros obtenidos a partir de los eventos registrados en horario no laboral del Laboratorio</i>	73
Tabla 5. <i>Configuración del equipo de medición utilizada para la monitorización en el Laboratorio AT205.</i>	82
Tabla 6. <i>Eventos presentados para el tablero de distribución normal 1 y normal 2</i>	88
Tabla 7. <i>RVC registrados en el tablero de distribución normal 1</i>	88
Tabla 8. <i>RVC registrados en el tablero de distribución normal 2</i>	89
Tabla 9. <i>Máximo IHD_v obtenido en los RVC</i>	90
Tabla 10. <i>Máximo IHD_v obtenido en los cambios de forma de onda</i>	92
Tabla 11. <i>Máximo IHD_v obtenido para una baja frecuencia.</i>	94
Tabla 12. <i>Máximo IHD_v obtenido para una instantánea</i>	96
Tabla 13. <i>Valores de corriente obtenidos del tablero de distribución normal 1</i>	107
Tabla 14. <i>Valores de corriente obtenidos del tablero de distribución normal 2</i>	108

Tabla 15. *Conductores utilizados en la instalación*..... 110

Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca de la UIS

Apéndice A. Registro fotográfico inspección del Laboratorio AT205 y medición de resistencia de puesta a tierra edificio alta tensión.

Apéndice B. Formatos de inspección.

Apéndice C. Tablas de resultados obtenidos para los tableros de distribución normal 1 y normal 2.

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL LABORATORIO AT205 (URE Y ER).*

AUTORES: DIEGO FERNANDO GUTIÉRREZ MARTÍNEZ.
JHONATTAN ANDRÉS VARGAS DAZA.**

PALABRAS CLAVE: Calidad de la energía, normatividad, sistema de puesta a tierra, cambio rápido de tensión, cambio de forma de onda, desbalance de tensión, distorsión armónica, orden armónico.

DESCRIPCIÓN:

El estudio de la calidad de la energía eléctrica del Laboratorio AT205 depende de las condiciones de operación de este, por esta razón se debe realizar el seguimiento a diferentes variables como tensión, corriente y frecuencia, con el fin de encontrar posibles afectaciones que se presenten en la red o en el funcionamiento de los equipos sensibles con los que cuenta la instalación eléctrica.

Este trabajo inicialmente realiza la revisión a los diferentes estándares y normas que establecen los parámetros de la calidad de la energía eléctrica y los límites admisibles. Además, estudia la influencia de la conexión del sistema de puesta a tierra del edificio con el Laboratorio, como también el impacto que puede generar el sobrecalentamiento de los conductores debido a la operación normal de la instalación o fallas en la red. Asimismo, realiza la inspección eléctrica del Laboratorio, con el fin de verificar el cumplimiento a los artículos del RETIE que apliquen a la instalación.

También se plantea una metodología con el fin de realizar la monitorización de la red del Laboratorio mediante el uso del analizador de red PQube 3, además de efectuar el análisis a las muestras obtenidas por este equipo. El tratamiento de los datos se realizó mediante el uso de MATLAB, con el fin de obtener parámetros como distorsión armónica y desbalance de tensión, para determinar si cumple con lo establecido por la normatividad. Asimismo, se empleó el medidor UT267B para la medición de corriente de cada circuito en la instalación, buscando establecer si se presenta algún tipo de afectación por este parámetro.

Finalmente, se proponen algunas recomendaciones basadas en una búsqueda en la literatura con el fin de solucionar los problemas encontrados en la inspección eléctrica, como la conexión del sistema de puesta a tierra, o no conformidades en la instalación.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordoñez Plata, Doctor Ingeniero Industrial. Codirectora: Alejandra Martínez Peñaloza, Ingeniera Electricista.

Abstract

TITLE: ANALYSIS OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE AT205 LABORATORY (URE AND ER).*

AUTHORS: DIEGO FERNANDO GUTIÉRREZ MARTÍNEZ.
JHONATTAN ANDRÉS VARGAS DAZA.**

KEY WORDS: Power quality, standards, grounding system, fast voltage change, waveform change, voltage imbalance, harmonic distortion, harmonic order.

DESCRIPTION:

The power quality study of the AT205 Laboratory depends on its operating conditions, for this reason, different variables such as voltage, current, and frequency must be monitored, to find possible damages that may occur in the network or in the operation of sensitive equipment that the electrical installation has.

This work initially reviews the different standards and norms that establish the power quality parameters and the admissible limits. Besides, it studies the influence of the building's grounding system connection with the Laboratory, as well as the impact that overheating conductors can generate due to the normal operation of the installation or network failures. Likewise, it carries out the electrical inspection of the Laboratory, to verify compliance with the RETIE articles that apply to the installation.

A methodology is also proposed to monitor the Laboratory's network using the PQube 3 network analyzer, in addition to carrying out the analysis on the samples obtained by this team. The data treatment was performed using MATLAB, to obtain parameters such as harmonic distortion and voltage imbalance, to determine if it complies with the provisions of the regulations. Likewise, the UT267B power meter was used to measure the circuit's current in the installation, seeking to establish if any type of affectation occurs due to this parameter.

Finally, some recommendations based on a literature search are proposed to solve the problems found in the electrical inspection, such as the connection of the grounding system, or non-conformities in the installation.

* Research work.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineerings, School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Gabriel Ordoñez Plata, PhD Industrial Engineer. Codirector: Alejandra Martínez Peñaloza, Electrical Engineer.

Introducción

La evolución en la industria con la implementación de nuevos equipos electrónicos hace necesario que los sistemas eléctricos requieran ser más estables, aumentando las especificaciones de calidad tanto para usuarios finales como para los distribuidores de energía eléctrica (Téllez Ramírez, 2019); esto implica que la calidad de la energía eléctrica contemple la continuidad del servicio, y se involucren estrategias para mantener la amplitud, frecuencia y forma de onda de las señales de tensión independientemente de las cargas que se conecten al sistema eléctrico.

Para realizar la evaluación de la calidad de la energía eléctrica, es necesario establecer los límites a parámetros como: los valores eficaces de tensión y de corriente, las distorsiones armónicas de estas señales, la forma de onda y la frecuencia fundamental. Además, se debe implementar una metodología donde se indique el procedimiento a seguir para realizar la inspección del estado de la instalación eléctrica, permitiendo conocer su condición actual.

Por otra parte, se debe resaltar la relación que existe entre la calidad de la energía eléctrica y la puesta a tierra, puesto que, al disponer con un correcto diseño de este sistema, las fallas que estén relacionadas a las interrupciones, eventos transitorios, variaciones en los parámetros fundamentales pueden disminuir su efecto y ocurrencia en la instalación eléctrica (Téllez, 2007).

Por lo tanto, se hace necesario realizar una monitorización a la red de baja tensión del Laboratorio AT205, tomando como base de estudio la evaluación de los parámetros de la calidad de la energía. Al implementar el diagnóstico a la instalación eléctrica, se recomienda el uso de

equipos de medida que cumplan con el método de medición clase A, tal como lo define el estándar IEC 61000-4-30 de 2015 (International Electrotechnical Commission, 2015).

Este trabajo de grado tiene como objetivo principal, realizar una caracterización de parámetros de calidad de la energía eléctrica a la red de baja tensión del Laboratorio AT205 (URE Y ER), el cual busca determinar el estado actual en la calidad de la energía eléctrica en la instalación, teniendo en cuenta los límites de los parámetros normativos y regulatorios propuestos por los diferentes organismos nacionales como internacionales.

Para cumplir a cabalidad el estudio de la calidad de la energía eléctrica se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: 1) Realizar una inspección y monitorización del sistema eléctrico de baja tensión del Laboratorio, con el fin de identificar posibles necesidades de mejoras en las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra de acuerdo con los requerimientos de los equipos instalados, 2) Evaluar las especificaciones de los parámetros de calidad de energía eléctrica requeridos por los equipos instalados y utilizados en el Laboratorio AT205 y 3) Realizar un diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica y proponer soluciones para mejorar la calidad de energía eléctrica del Laboratorio de acuerdo con los requerimientos de los equipos instalados.

Este trabajo de grado consta de cinco capítulos. El Capítulo 1 menciona la fundamentación teórica relacionada con los parámetros de calidad de la energía eléctrica, los límites admisibles por los diferentes estándares internacionales y normativas colombianas, los sistemas de puesta a tierra y el calentamiento de conductores.

El Capítulo 2 define la metodología para la inspección visual de la instalación eléctrica del Laboratorio tomando como referencia el RETIE (RETIE , 2013) y la NTC 2050 (ICONTEC, 1998). También se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los componentes de la instalación.

En el Capítulo 3 se realiza la evaluación de las especificaciones de los equipos del Laboratorio AT205, según los diferentes estándares nacionales e internacionales, para determinar la compatibilidad con los parámetros de la red y establecer si estos tienen un correcto funcionamiento.

El Capítulo 4 plantea la metodología para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica del Laboratorio, estrategia necesaria para el desarrollo de la monitorización y adquisición de datos requeridos para la implementación del diagnóstico.

El Capítulo 5 presenta el diagnóstico realizado a la red eléctrica del Laboratorio, donde se evalúan los diferentes parámetros ya establecidos por norma. A partir de la monitorización realizada utilizando los equipos de medida PQube 3 y UNIT UT267B, se determina el estado de calidad de la energía eléctrica del Laboratorio. Además de usar la cámara Fluke Thermography TiS50 para encontrar posibles puntos calientes en los conductores de la instalación eléctrica.

Finalmente se presentan las conclusiones del estudio de calidad de la energía eléctrica realizado en el Laboratorio AT205 y de acuerdo con los resultados obtenidos se proponen recomendaciones para posibles mejoras en la instalación eléctrica.

1. Definiciones y terminología de los principales parámetros de la calidad de la energía eléctrica, sistemas de puesta a tierra y calentamiento de conductores

En este capítulo se presentan las definiciones relacionadas con la calidad de la energía eléctrica, como distorsión en la forma de onda de tensión y corriente, desbalance y otros tipos de fenómenos.

También se presenta la relación que existe entre los sistemas de puesta tierra y la calidad de la energía eléctrica, puesto que en la actualidad su estudio es de gran interés para la mitigación de las perturbaciones de tipo transitorio que inciden en la operación de las instalaciones eléctricas.

1.1 Parámetros calidad de la energía eléctrica

Según la norma NTC 5000:2013 (ICONTEC, 2013), la calidad de la energía eléctrica abarca un conjunto de fenómenos electromagnéticos que se pueden presentar en las señales de tensión y corriente, para un instante determinado y un punto dado en un sistema eléctrico. Es por esto, que en esta sección se realiza una descripción de los principales fenómenos electromagnéticos, los límites de evaluación con respecto a los parámetros técnicos de referencia tomados de la norma NTC 5001:2008 (ICONTEC, 2008) y la norma IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015) como se evidencia en la Tabla 1.

En la Tabla 1 se presenta una descripción de los principales fenómenos que pueden afectar la calidad de la energía eléctrica, duración y magnitudes establecidas por el estándar IEEE 1159:2019 (IEEE Std 1159, 2019); con el fin de establecer los eventos que se pueden encontrar en durante la monitorización.

Tabla 1.

Categorías y características típicas de los fenómenos de calidad de la energía eléctrica.

Categoría	Espectro de frecuencia(típico)	Duración (típico)	Magnitud de la tensión (típica)
1. Transitorios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	tr = 5 ns	< 50 ns	

Categoría	Espectro de frecuencia(típico)	Duración (típico)	Magnitud de la tensión (típica)
1.1.2 Microsegundos	tr = 1 μ s	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	tr = 0,1 ms	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Frecuencia baja	< 5 KHz	0,3 - 50 ms	0 – 4 p.u
1.2.2 Frecuencia media	5 – 500 KHz	20 μ s	0-8 p.u
1.2.3 Frecuencia alta	0,5 – 5 MHz	5 μ s	0-4 p.u
2. Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0,5 ciclos - 30 s	0,1 – 0,9 p.u
2.1.2 Swell		0,5 ciclos - 30 s	1,1 – 1,8 p.u
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0,5 ciclos - 3 s	< 0,1 p.u
2.2.2 Sag		30 ciclos - 3 s	0,1 – 0,9 p.u
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 s	1,1 – 1,4 p.u
2.3 Temporales			
2.3.1 Interrupción		>3 s – 1 min	< 0,1 p.u
2.3.2 Sag		>3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u
2.3.3 Swell		>3 s – 1 min	1,1 – 1,2 p.u
2.3.4 RVC			6%
3. Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0,0 p.u
3.2 Subtensión		> 1 min	0,8 – 0,9 p.u
3.3 Sobretensión		> 1 min	1,1 – 1,2 p.u
4. Desbalance			
4.1 Voltaje		Estado estacionario	0,5 – 2%
4.2 Corriente		Estado estacionario	1 – 30%
5. Distorsión de onda			
5.1 Componente D.C		Estado estacionario	0 – 0,1%

Categoría	Espectro de frecuencia(típico)	Duración (típico)	Magnitud de la tensión (típica)
5.2 Armónicos	0 – 9 kHz	Estado estacionario	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 9 kHz	Estado estacionario	0 – 2%
5.4 Muecas		Estado estacionario	
5.5 Ruido	Banda ancha	Estado estacionario	0 – 1%
6. Flicker	< 25 Hz	Intermitente	0,1 – 7%

Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

A continuación, se hace una breve descripción de los diferentes fenómenos que afectan la calidad de la energía eléctrica.

1.1.1. Transitorio electromagnético. Un transitorio electromagnético se presenta cuando ocurre un cambio en la condición de estado estable de la tensión o de la corriente. Generalmente su duración típica es de 50 ms, se clasifica en dos categorías: tipo impulso y tipo oscilatorio (ICONTEC, 2013).

1.1.2. Transitorio electromagnético tipo impulso. Los transitorios electromagnéticos tipo impulso se identifican por tener una polaridad ya sea positiva o negativa, además se caracterizan por dos parámetros; tiempo de frente y tiempo de cola. La causa más común para que se produzcan transitorios de impulso son las descargas atmosféricas (ICONTEC, 2013).

La Figura 1 ilustra un transitorio de impulso provocado por un rayo, debido a la corta duración del evento, en su espectro de frecuencia se presentan valores de frecuencias altos.

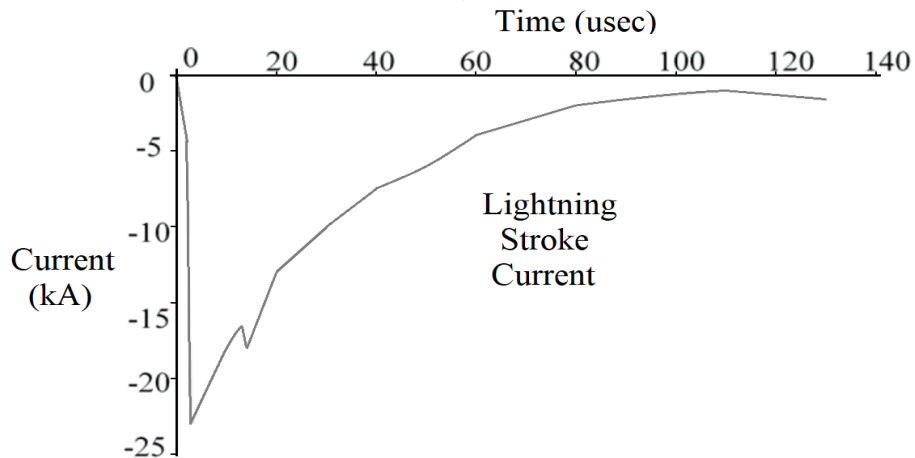


Figura 1. Transitorios impulsivos en el sistema eléctrico. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.3. Transitorio electromagnético tipo oscilatorio. Un transitorio electromagnético oscilatorio ocurre cuando se presenta un cambio en el valor instantáneo de la tensión o de la corriente y un cambio rápido en su polaridad. Este fenómeno se caracteriza por su contenido espectral, duración, magnitud y energía.

En la Figura 2, se ilustra un transitorio de tipo oscilatorio resultante a la conmutación de un condensador (ICONTEC, 2013).

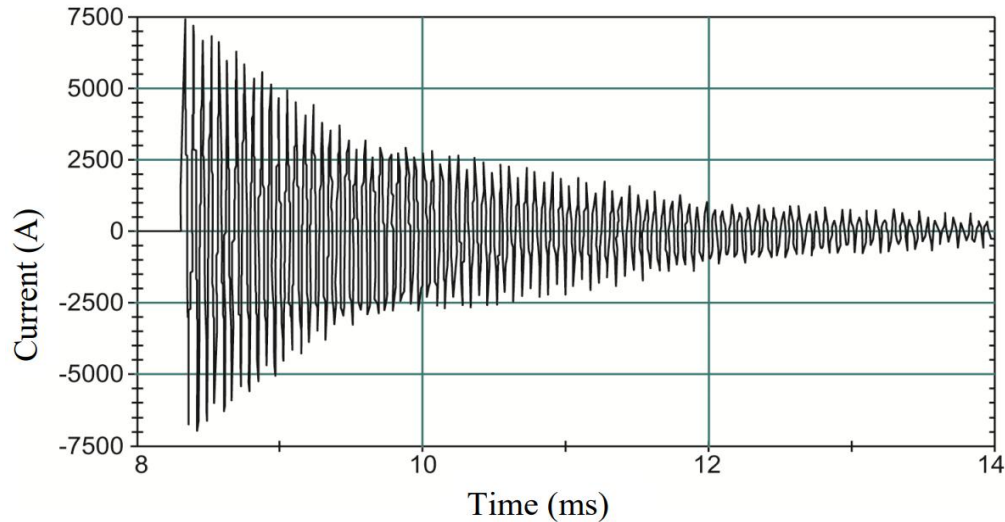


Figura 2. Transitorio oscilatorio causado por la conmutación de condensadores consecutivos. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.4. Variaciones de corta duración. Es la variación del valor eficaz en la tensión, para un tiempo mayor a medio ciclo de frecuencia nominal y menor o igual a un minuto.

Estas variaciones se pueden dividir en tres categorías: instantáneas, momentáneas y temporales (ICONTEC, 2013), son causadas por condiciones de falla o cuando se energizan grandes cargas que requieren altas corrientes de arranque. Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, pueden generar aumentos temporales en la tensión (Swells), huecos de tensión (Sags) o una pérdida completa de la tensión (interrupciones) (ICONTEC, 2008).

1.1.5. Huecos de tensión (Sags). Los huecos de tensión son caídas súbitas del valor eficaz de la tensión de alimentación entre el 0,1 y 0,9 p.u, puede oscilar entre los 8,33 ms hasta 1 minuto (ver Figura 3).

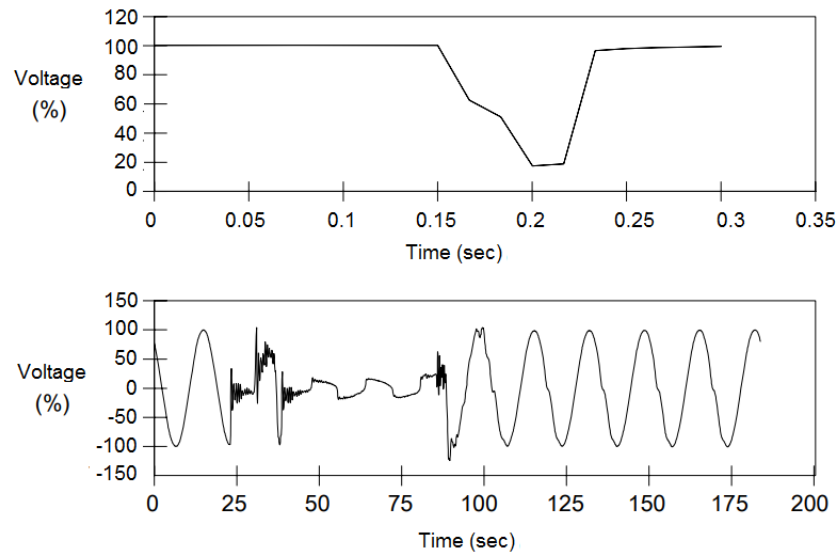


Figura 3. Hueco de tensión. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.6. Elevaciones de tensión (Swells). Las elevaciones de tensión son aumentos súbitos en el valor eficaz de la tensión de alimentación por encima del 1,1 p.u del valor nominal; el tiempo de duración puede oscilar entre 8,33 ms y 1 minuto, como se muestra en la Figura 4. Generalmente este fenómeno suele estar asociados a condiciones de falla del sistema, desconexión de grandes cargas o la conexión de bancos de condensadores al sistema (IEEE Std 1159, 2019).

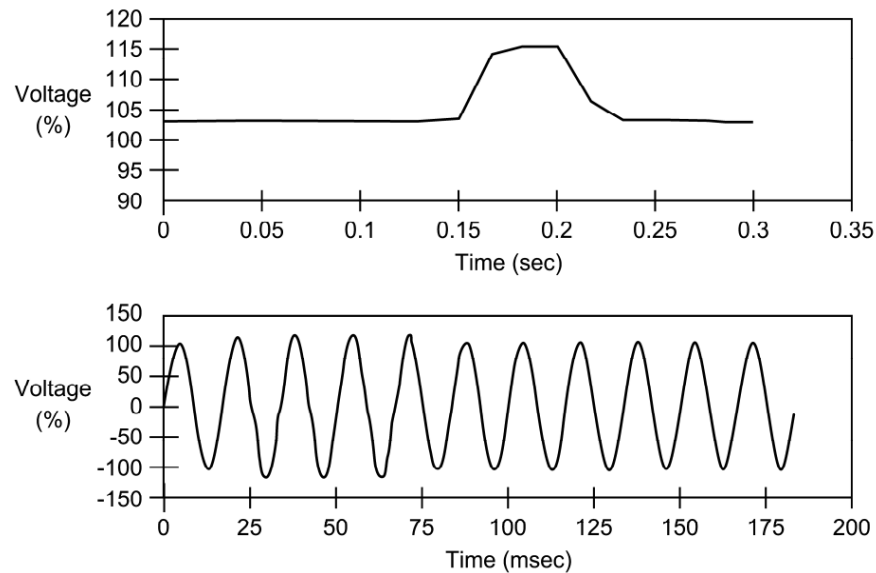


Figura 4. Elevación de tensión debido a falla u operación en el sistema. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.7. Interrupciones temporales. Las interrupciones temporales se generan cuando el valor eficaz de la tensión de alimentación disminuye a menos de 0,1 p.u del valor nominal, para un tiempo no mayor a un minuto, ver Figura 5. Generalmente suelen presentarse por fallas en el sistema de potencia o fallas en los equipos; estas interrupciones se miden por el tiempo de duración, debido a que el valor eficaz de la tensión generalmente es menor al 10% del valor nominal (IEEE Std 1159, 2019).

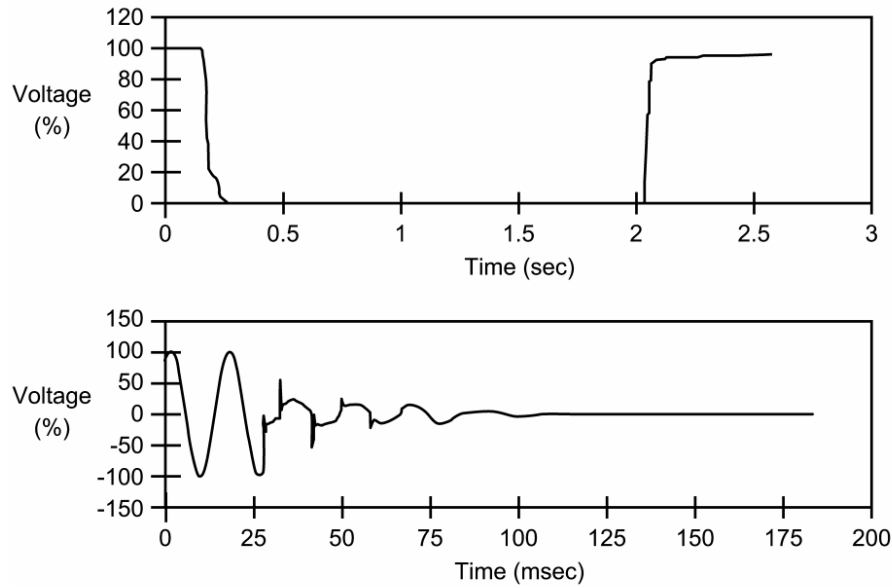


Figura 5. Interrupción momentánea debido a falla u operación en el sistema. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.8. Variaciones de larga duración. Las variaciones de larga duración abarcan desviaciones en el valor eficaz de la tensión a una frecuencia nominal de 60 Hz, las cuales suelen tener una duración superior a un minuto (IEEE Std 1159, 2019).

Existen tres tipos de variaciones: sobretensiones, subtensiones e interrupciones sostenidas. Dependiendo de la causa de variación, las sobretensiones y caídas de tensión son causadas por las variaciones de carga en la operación del sistema (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.9. Sobretensión. Las sobretensiones hacen referencia al aumento en 1,1 p.u en el valor eficaz de la tensión, con una duración mayor a un minuto. Estas pueden ser el resultado de la desconexión de una gran carga o el resultado de las variaciones de la compensación de potencia reactiva en el sistema de potencia (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.10. Subtensión. Una subtensión es la disminución de la tensión eficaz en un rango entre 0,8 - 0,9 p.u de la tensión nominal y por lo general tiene una duración mayor a 1 minuto. Las subtensiones se pueden presentar por circuitos sobrecargados, la conexión de grandes cargas o de bancos de capacitores (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.11. Interrupción sostenida. Esta interrupción se presenta cuando el valor eficaz de la tensión disminuye a un valor menor del 0,1 p.u del valor nominal, por más de un minuto (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.12. Desbalance de tensión. El desbalance de tensión es la condición en un sistema polifásico para el cual los valores eficaces de la tensión (componente fundamental) y los ángulos de fase entre tensiones de línea consecutivas, no son iguales (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.13. Desbalance de corriente. El desbalance de corriente es producido cuando las tres fases de un sistema trifásico no operan con las mismas intensidades, lo cual genera sobrecalentamiento de los conductores y que circule corriente por el neutro (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.14. Distorsión de onda. Es la deformación que se puede presentar en la forma de onda de las señales de tensión y corriente en estado estable. Se caracteriza principalmente por su contenido espectral, la cual se presenta por la conexión de cargas no lineales o variantes en el tiempo.

1.1.15. Distorsión armónica total de corriente (THDi). Es un indicador del contenido de componentes armónicas en la onda de corriente respecto de la onda senoidal típica, expresada en porcentaje como se observa en la Ecuación 1 (Comisión De Regulación De Energía y Gas (CREG), 1997).

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (1)$$

1.1.16. Distorsión armónica total de tensión (THDv). Es un indicador del contenido de las componentes armónicas en la onda de tensión distorsionada en comparación con la onda senoidal típica, expresada en porcentaje como se muestra en la Ecuación 2 (Comisión De Regulación De Energía y Gas (CREG), 1997).

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (2)$$

1.1.17. Componente en DC. Es el parámetro del valor promedio diferente de cero para las señales de tensión o corriente directa en un sistema eléctrico de corriente alterna (ICONTEC, 2013). Este fenómeno se puede presentar cuando la señal pasa a través de un sistema de rectificación de media onda.

1.1.18. Armónicos. Las componentes armónicas (armónicos) son una representación matemática de señales periódicas de tensión y de corriente distorsionadas en las Series de Fourier donde las frecuencias de estas señales son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. En la Figura 6 se observa una señal de corriente distorsionada y la amplitud de cada componente armónica, la cual disminuye en este ejemplo en la medida que aumenta su frecuencia (Comisión De Regulación De Energía y Gas (CREG), 1997)

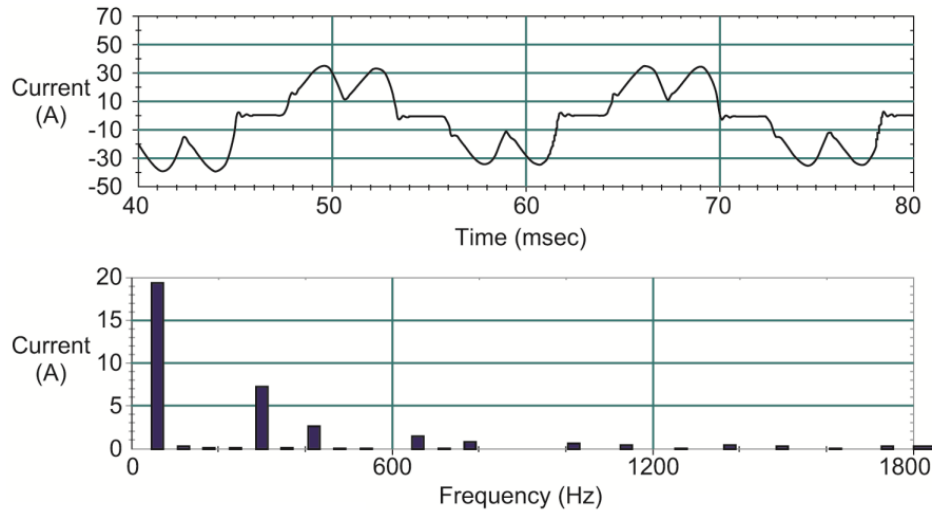


Figura 6. Forma de onda de corriente y espectro armónico para la corriente de entrada. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.19. Interarmónicos. Los interarmónicos representan en el modelo matemático de las Series de Fourier de las señales periódicas de tensión y de corriente ondas senoidales, cuya frecuencia no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Cuando la frecuencia de esta onda es menor que la frecuencia fundamental del sistema se conoce como subarmónicos. Estas ondas se pueden encontrar en cualquier nivel de tensión, siendo producidas por hornos de inducción y equipos de control que no se encuentran sintonizados con la frecuencia del sistema (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.20. Muestras. Las muescas son perturbaciones electromagnéticas que se presentan en la forma de onda de la tensión, haciendo que disminuya o incremente el valor instantáneo de la onda periódica. Esta perturbación se presenta por el funcionamiento normal de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente conmuta una fase con otra. En la Figura 7, se puede observar un ejemplo de una señal de tensión de un convertidor electrónico (IEEE Std 1159, 2019).

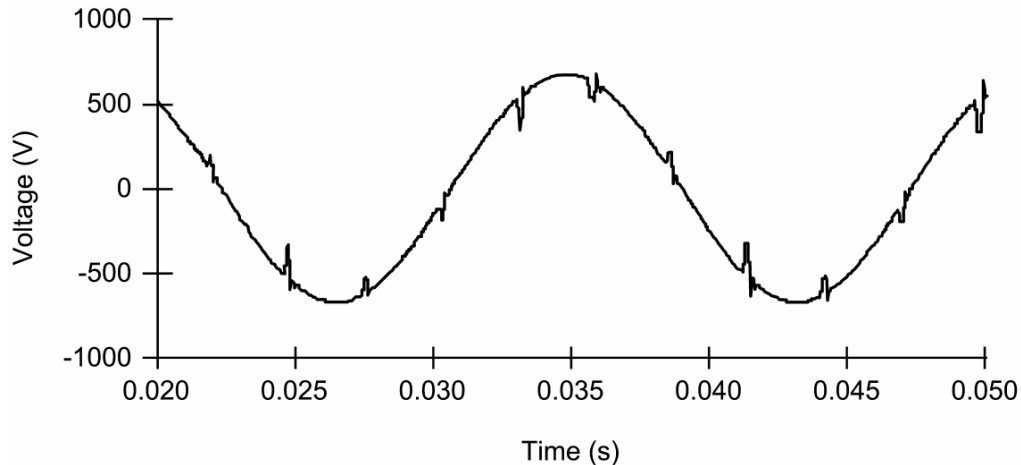


Figura 7. Muestras de tensión causada por un convertidor. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.21. Ruido. Es una señal eléctrica no deseada con un contenido espectral de banda ancha, generalmente a una frecuencia menor de 200 kHz, la cual se sobrepone a las señales de tensión o de corriente. El ruido se caracteriza por ser aleatorio y de magnitud menor al 0,01 p.u del valor nominal de la señal. Este fenómeno es provocado por algunos dispositivos de potencia, el cual perturba equipos electrónicos; pero pueden ser mitigados con el uso de filtros, transformadores de aislamiento o acondicionadores de línea (IEEE Std 1159, 2019).

1.1.22. Flicker. El flicker es la variación en la magnitud del valor eficaz de la tensión, que no debe exceder límites inferiores a 0,95 p.u y superiores a 1,05 como se observa en la Figura 8; esta perturbación es percibida por los seres humanos al observar los cambios en la intensidad de una lámpara de iluminación.

Las fluctuaciones de tensiones son producidas generalmente por cargas que presentan variaciones cíclicas significativas, especialmente en el componente reactivo asociado principalmente a los sistemas de distribución y transmisión (IEEE Std 1159, 2019).

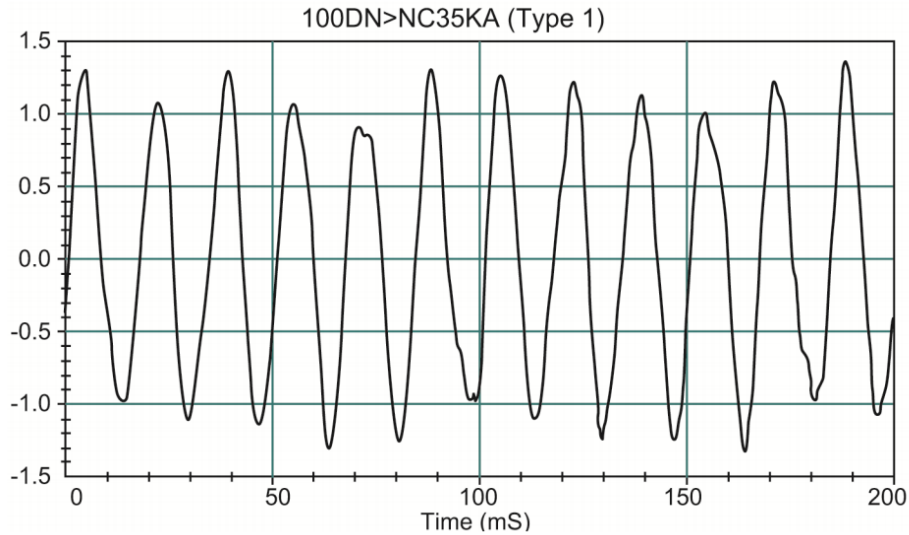


Figura 8. Fluctuaciones de tensión causadas por el funcionamiento de un horno de arco. Tomada de la IEEE 1159 de 2019 (IEEE Std 1159, 2019)

1.1.23. Variaciones de frecuencia de alimentación. Es la desviación que presenta la frecuencia de operación del sistema con respecto al valor nominal (60 Hz en el sector eléctrico colombiano). La frecuencia de alimentación depende del equilibrio que hay entre la carga y la capacidad de generación, es por esto que, cuando ocurre un cambio en el equilibrio se producen variaciones en la frecuencia debido a que están relacionadas directamente con la velocidad de rotación de los generadores de la red (IEEE Std 1159, 2019).

1.2. Sistema de puesta a tierra

La calidad de la energía eléctrica también puede ser definida como el proceso de energizar y poner a tierra los equipos sensibles de una manera adecuada para la operación de estos (Téllez, 2007).

En la Figura 9, se muestra la pirámide de calidad de la energía eléctrica, donde se observa que la base son los sistemas de puesta a tierra. Contar con un adecuado diseño e implementación de un

sistema de puesta a tierra y que se ajuste a las normas, permite la disminución de fallas que estén asociadas con las interrupciones, eventos transitorios y variaciones en los parámetros fundamentales (Téllez, 2007).

Generalmente la mala calidad de la energía eléctrica ocurre cuando hay presencia de perturbaciones, se ha encontrado en gran parte que estos problemas están relacionados con las instalaciones eléctricas y no con el suministro eléctrico. Existen dos tipos de problemas en la calidad de la energía eléctrica: aquellos que se crean por interrupciones de cargas eléctricas y los que causan pérdidas en la operación de los equipos (Téllez, 2007).

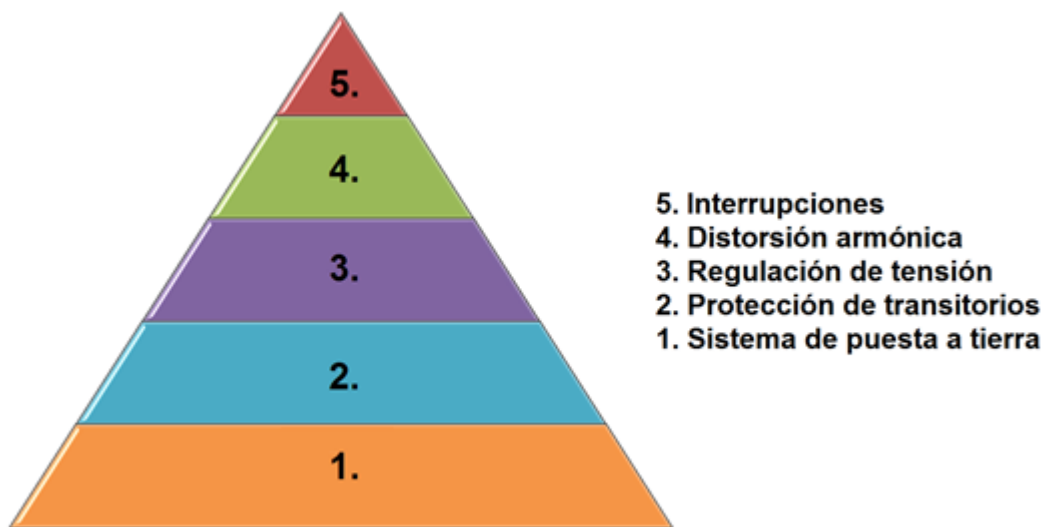


Figura 9. Pirámide de calidad de la energía. Adaptado de IEEE Standard 1100 de 2005 (IEEE Standard 1100, 2005)

A continuación, se presentan algunas definiciones de sistemas de puesta a tierra, relacionadas con la calidad de la energía eléctrica.

1.2.1. Neutro. Conductor de retorno para todas las corrientes de los equipos eléctricos. Es de suma importancia unir el neutro de una instalación con la tierra en un solo punto (ICONTEC, 2001).

1.2.2. Tierra. Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa o armazón. El término “masa” sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos, los carros y otros (ICONTEC, 2001).

1.2.3. Suelo. Es la capa superior de la corteza terrestre, que está compuesta por una mezcla de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos (ICONTEC, 2001)

1.2.4. Resistividad eléctrica (ρ). Se entiende como la oposición al paso de la corriente que generan diferentes tipos de materiales, su unidad son los ohm/m (ICONTEC, 2001).

1.2.5. Conductividad eléctrica (γ). Hace referencia a la capacidad que tiene un material o una sustancia para permitir el paso de la corriente. Es el recíproco o inverso de la resistividad y su unidad es el S/m (ICONTEC, 2001)

1.2.6. Puesta a tierra. Hace referencia al conjunto de elementos equipotenciales que se encuentran en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, distribuyendo las corrientes eléctricas de falla al suelo (ICONTEC, 2001)

1.2.7. Conductor de puesta a tierra de los equipos. Alambre o cable conductor que interconecta cada uno de los puntos de una instalación eléctrica que lo requieran con la línea principal de tierra (ICONTEC, 2001).

1.2.8. Conductor del electrodo de puesta a tierra. El conductor del electrodo de puesta a tierra es aquel que se aterriza sólidamente, con el propósito de distribuir la tierra a diferentes sitios de la instalación (ICONTEC, 2001).

1.2.9. Barraje equipotencial. Conductor de tierra colectiva, el cual generalmente es una barra de cobre o un cable de diámetro equivalente al de la barra de cobre (ICONTEC, 2001).

1.2.10. Conexión de puesta a tierra. Sistema de conexión de los diferentes puntos de puesta a tierra de una instalación o edificio, el cual desvía las corrientes eléctricas potencialmente peligrosas hacia tierra. Para realizar estas conexiones es necesario usar soldadura exotérmica, lengüetas certificadas, conectores a presión destinados a asegurar dos o más componentes de un sistema de puesta a tierra (SPT) (ICONTEC, 2001).

1.2.11. Conexión equipotencial. La conexión equipotencial es la unión permanente de las partes metálicas del SPT, para formar una trayectoria eléctricamente conductora; permitiendo asegurar la continuidad eléctrica y la capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente potencialmente peligrosa (ICONTEC, 2001).

1.2.12. Electrodo de puesta a tierra. Es un conductor o grupo de ellos que está en contacto con el suelo, para proporcionar una conexión eléctrica con el terreno. Puede ser una varilla, un tubo, una placa, una cinta o un cable (ICONTEC, 2001).

1.2.13. Equipotencialidad o unión permanente. Principio que debe ser aplicado ampliamente en los sistemas de puesta a tierra, el cual indica que cada punto debe ser aterrizado y estar interconectado a través de una mínima resistencia (ICONTEC, 2001).

1.2.14. Telurómetro. Equipo empleado para medir la resistencia de la puesta a tierra, así como también se encarga de calcular la resistividad del terreno en el cual está siendo instalado (ICONTEC, 2001).

1.3. Calentamiento de conductores

El calentamiento de conductores es uno de los factores que afecta la calidad de la energía eléctrica, por lo que la seguridad y disponibilidad de operación bajo condiciones extremas, son una de las principales cualidades que deben tener los conductores de energía eléctrica de baja tensión, para garantizar la continuidad del servicio y el correcto funcionamiento de los equipos; a continuación, se presentan algunas definiciones relacionadas al calentamiento de los conductores.

1.3.1. Conductor. Es un conjunto de alambres no aislados entre sí, los cuales ofrecen poca resistencia al movimiento de la carga eléctrica y están destinados a conducir la corriente (IEEE. 1283, 2004).

1.3.2. Conductor aislado. Es un conductor recubierto con un material dieléctrico que desempeña una función aislante (IEEE. 1283, 2004).

1.3.3. Efecto Joule. Fenómeno que se presenta cuando una corriente eléctrica circula por un conductor y produce un aumento de temperatura. Es decir, la energía eléctrica se transforma en energía térmica (IEEE. 1283, 2004).

1.3.4. Esfuerzo dieléctrico. Esfuerzo que ocurre en un material aislante debido a la acción de un campo eléctrico (IEEE. 1283, 2004).

1.3.5. Pantalla. Cubierta conductora, aplicada sobre un conductor aislado o sobre un conjunto de conductores aislados, destinada a eliminar corrientes inductivas (IEEE. 1283, 2004).

1.3.6. Rigidez dieléctrica. Propiedad de un material aislante para resistir el esfuerzo dieléctrico (IEEE. 1283, 2004).

1.3.7. Ganancia de calor. La ganancia de calor por efecto joule depende del cuadrado de la corriente eléctrica y del valor de la resistencia del conductor, como se muestra en la Ecuación 3; esta puede variar con la frecuencia de operación, el promedio de la densidad de corriente o la temperatura (IEEE. 1283, 2004).

$$P = I^2 * R \quad (3)$$

2. Inspección de la instalación eléctrica del Laboratorio AT205 (URE Y ER)

En este capítulo se realiza la descripción de las principales normas como el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE (RETIE , 2013) y la norma NTC 2050 (ICONTEC, 1998), las cuales establecen las exigencias que garantizan la seguridad de la instalación eléctrica y protección de las personas que hacen uso de la electricidad. Tomando como base esta normatividad se diseñó una metodología para la evaluación en la instalación eléctrica del Laboratorio AT205, con el fin de determinar la conformidad y el cumplimiento de los artículos seleccionados para la inspección.

2.1 Normatividad y reglamentación

En el sector eléctrico colombiano hay una norma y un reglamento técnico que establecen los requisitos y principios de selección de los productos y materiales de la infraestructura eléctrica. A continuación, se hace una breve descripción de la norma NTC 2050 (ICONTEC, 1998) y del RETIE (RETIE , 2013).

2.1.1. NTC 2050. Tiene como objetivo salvaguardar a las personas y los bienes contra los riesgos que pueden surgir por el uso de la electricidad. Además, este código contiene disposiciones que se consideran necesarias para la seguridad de la instalación eléctrica. El cumplimiento y el mantenimiento adecuado darán lugar a una instalación prácticamente libre de riesgos, pero no

necesariamente eficiente, conveniente o adecuada para el buen servicio o para ampliaciones futuras en el uso de la electricidad (ICONTEC, 1998).

También tiene como objeto de estudio y reglamentación: Las instalaciones de conductores y equipos eléctricos en edificios públicos y privados, las instalaciones de conductores y equipos que se conectan con fuentes de suministro de electricidad y las instalaciones de cables y canalizaciones de fibra óptica (ICONTEC, 1998).

2.1.2. RETIE. En el reglamento técnico de instalaciones eléctricas se determinan los requisitos que permiten garantizar la protección contra los riesgos eléctricos, para lo cual se han recopilado los preceptos esenciales que definen el ámbito de aplicación y las características básicas de las instalaciones eléctricas. Para efectos del RETIE las palabras deber y tener, deben entenderse como “estar obligado” (RETIE , 2013).

El reglamento tiene como principal objetivo establecer medidas que garanticen la seguridad de las personas, de la vida humana y vegetal, además de la preservación del medio ambiente, reduciendo o eliminando los riesgos de origen eléctrico. Se aplica para todas las instalaciones de corriente continua y alterna, con tensiones mayores o iguales a 25 V y menores o iguales a 500 kV. Para dar cumplimiento al RETIE se establece la certificación de conformidad de productos e inspección y certificación de conformidad de instalaciones (RETIE , 2013).

2.2. Código de colores para conductores

Con el propósito de evitar accidentes por una errónea interpretación de tensión y tipo de sistema utilizado, se debe dar cumplimiento al código de colores para conductores aislados de potencia,

establecido en el Artículo 6.3 del RETIE Tabla 6.5 “Código de colores para conductores C.A”, como se muestra en la Figura 10. Se tomará como válido para determinar este requisito el color propio del acabado exterior, marcación clara en las partes visibles (con pintura, cinta o rótulos adhesivos) del color respectivo de conductor de la instalación eléctrica.

SISTEMA	1 Φ	1 Φ	3 Φ Y	3 Φ Δ	3 Φ Δ -	3 Φ Y	3 Φ Y	3 Φ Δ	3 Φ Δ
TENSIONES NOMINALES (Voltios)	120	240/120	208/120	240	240/208/120	380/220	480/440	480/440	Mas de 1000 V
CONDUCTORES ACTIVOS	1 fase 2 hilos	2 fases 3 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 3 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 3 hilos	3 fases
FASES	Negro trifásico	Negro Rojo	Amarillo Azul Rojo	Negro Azul Rojo	Negro Naranja Azul	Café Negro Amarillo	Café Naranja Amarillo	Café Naranja Amarillo	Violeta Café Rojo
NEUTRO	Blanco	Blanco	Blanco	No aplica	Blanco	Blanco	Gris	No aplica	No aplica
TIERRA DE PROTECCIÓN	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde	Desnudo o verde
TIERRA AISLADA	Verde o Verde/ amarillo	Verde o Verde/ amarillo	Verde o Verde/ amarillo	No aplica	Verde o Verde/ amarillo	Verde o Verde/ amarillo	No aplica	No aplica	No aplica

Figura 10. Código de colores para conductores C.A. Tomado de RETIE (RETIE , 2013)

2.3. Metodología para realizar la inspección de la instalación eléctrica

Para realizar una inspección eléctrica se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

2.3.1. Inspección visual. Está definida como una evaluación en los materiales de los conductores y los componentes de la instalación eléctrica como tomacorrientes, canalizaciones,

dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) e interruptores; permitiendo valorar su conformidad, usando algunos sentidos como el oído, el olfato, la vista o mediante el uso de algún instrumento. Con este tipo de inspección se puede establecer algunos defectos de tipo visual como desgaste de los conductores, corrosión, decoloración, entre otros.

Se realiza con el objetivo de avalar el cumplimiento de los artículos establecidos por el RETIE (RETIE , 2013) y la NTC 2050 (ICONTEC, 1998), y de esta forma determinar si la instalación eléctrica es apta para la operación. Generalmente las inspecciones suelen realizarse desde el lugar de alimentación, hasta el último elemento de la instalación eléctrica, permitiendo reconocer y establecer el estado en el cual se encuentra ésta.

2.3.2. Tablero de protección. En la inspección se deben verificar las siguientes características: ubicación, altura del montaje de fijación y presentación; componentes, protecciones, alambrado, llegada y salida de conductos y barras; estructura de la caja, pintura, terminación y el tamaño de esta.

2.3.3. Circuitos. Se debe revisar la selección de los conductores y la ductería teniendo en cuenta su diámetro. Además, se debe inspeccionar la continuidad de las líneas, el estado mecánico de los conductores, el código de colores y el aislamiento de las conexiones. Para las cajas de interruptores y tomacorrientes, se debe verificar la calidad de los dispositivos.

Asimismo, para el sistema de puesta a tierra se debe inspeccionar la selección de conductores, código de colores, la llegada al tablero, calidad de las uniones de puesta a tierra y la unión a las barras de tierra de servicio y protección.

2.4. Metodología para dictaminar la inspección eléctrica

En general cualquier tipo de instalación eléctrica es diseñada y construida basada en un reglamento, en nuestro caso el RETIE (RETIE , 2013), el cual especifica los requerimientos mínimos de seguridad para las personas que hagan uso del Laboratorio y según sea su cumplimiento se determina la conformidad. En caso de existir no conformidades, se establece un plazo para que el usuario las corrija. Los tipos de no conformidades se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.4.1. No conformidad leve (NCL). Puede considerarse una no conformidad leve sí:

- Los gabinetes, cajas, tableros, interruptores y tomacorrientes fueron ubicados inadecuadamente, siempre y cuando no estén expuestos a riesgos mayores.
- Conlleva a la utilización de partes dañadas que puedan afectar negativamente al buen funcionamiento de los equipos, como piezas rotas, deterioradas por la corrosión o recalentamiento.
- No se cuenta con la señalización de seguridad, según sea el requerimiento de la instalación.

2.4.2. No conformidad grave (NCG). Es considerada una situación de no conformidad grave si se encuentra:

- Ausencia de conexiones equipotenciales (SPT), cuando son requeridas.
- Falta de aislamiento de la instalación.
- Inexistencia de medidas mínimas de seguridad contra contactos indirectos.
- Falta o una inadecuada protección contra cortocircuitos y sobrecargas en los conductores, de acuerdo con sus características y condiciones de instalación.

- Valores no conformes con los establecidos para la resistencia de puesta a tierra, campos electromagnéticos, tensiones de paso y de contacto, resistencia de aislamiento y niveles de iluminación.
- Falta de sección de los conductores, en relación con las caídas de tensión admisibles para las cargas previstas.
- Falta de identificación de los conductores “neutro” y “protección”.
- No existencia de planos y memorias de cálculo.
- No coincidencia de planos y otra información técnica con lo existente en la instalación.

2.4.3. No conformidad muy grave (NCMG). Se entiende como el incumplimiento de un requisito, el cual constituye un peligro inmediato para la seguridad de las personas o los bienes, como ausencia del sistema de puesta a tierra, riesgo de incendio o explosión, fraude de energía, incumplimiento de distancias de seguridad, entre otros.

2.5. Resultados de la inspección al Laboratorio AT205

La inspección del Laboratorio se desarrolló teniendo en cuenta los requerimientos del RETIE (RETIE , 2013). Esta se realizó por categorías siguiendo la distribución establecida como disposiciones generales, sistema de puesta a tierra, tomacorrientes, canalizaciones, DPS e interruptores, y finalmente tableros de control o distribución para los diferentes equipos instalados en el Laboratorio.

2.5.1. Disposiciones generales. Para realizar la inspección de las disposiciones generales se tuvo en cuenta el Artículo 10.3 “Condiciones de la envolvente o encerramientos”, El formato diligenciado se encuentra en el *Apéndice B. Formato de inspección 1.*

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

Todos los equipos, tomacorrientes, canaletas, interruptores, tableros y fusibles deben estar acreditados para ser instalados y usados en el Laboratorio. Como se encuentran en una institución de educación superior, deben cumplir con los requerimientos establecidos por norma, atendiendo a los niveles admisibles para la tensión, frecuencia y posibles condiciones extremas de operación.

2.5.2. Sistema de puesta a tierra. En la inspección del sistema de puesta a tierra se tuvieron en cuenta las consideraciones especificadas por el RETIE (RETIE , 2013), como se puede observar en el *Apéndice B. Formato de inspección 2.*

- Artículo 15 - Sistema de puesta a tierra.
- Artículo 15.1 - Requisitos generales del sistema de puesta a tierra.
- Artículo 15.3.3 - Conductor de electrodo de puesta a tierra.

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

El cableado en el sistema de puesta a tierra garantiza la seguridad para las personas y la protección de los equipos que se encuentran en el Laboratorio, dando cumplimiento al código de colores en los conductores utilizados. Al contar con equipos sensibles en el Laboratorio se recomienda que la instalación cuente con su propio sistema de puesta a tierra, tal como se establece en la NTC 2050 (ICONTEC, 1998) y el RETIE (RETIE , 2013) dónde queda expresamente prohibido una sola puesta a tierra para todas las necesidades como se observa en la Figura 11 y se emplea en el edificio de Alta Tensión Figura 12.

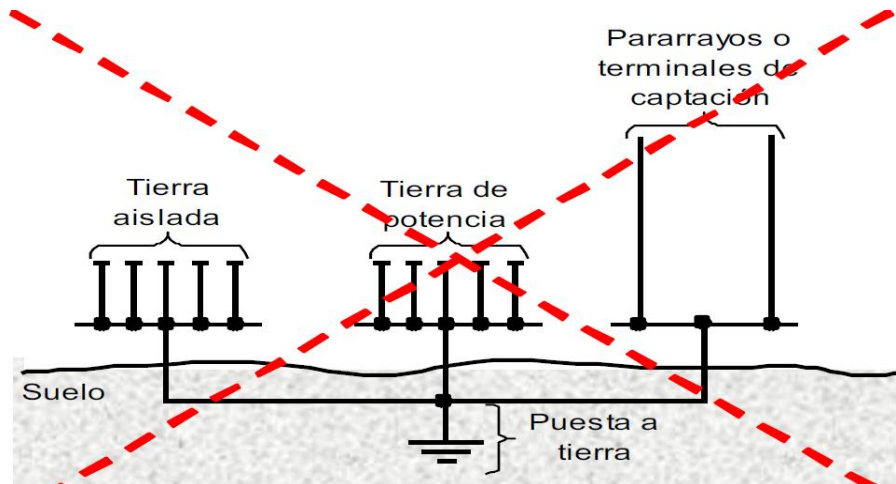


Figura 11. Conexión de un solo sistema de puesta a tierra, tomada de RETIE (RETIE , 2013)

En la Figura 12, se observa el punto en común para la conexión de puesta a tierra para todos los Laboratorios del edificio de Alta Tensión.

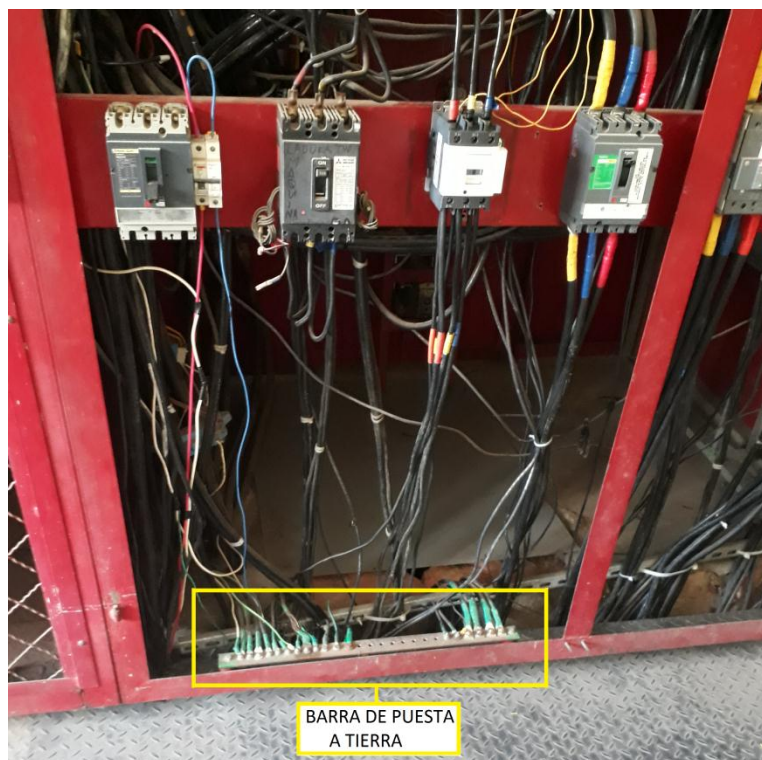


Figura 12. Conexión de puesta a tierra del edificio Alta tensión

Al no cumplirse con todos los requerimientos dispuestos por el RETIE (RETIE , 2013), se desarrolló un estudio en el sistema de puesta a tierra del edificio, utilizando el método de caída de potencial.

Este método consiste en hacer circular una corriente a través del sistema de puesta a tierra y un electrodo de corriente auxiliar **C**, registrando la tensión entre la puesta a tierra que está bajo prueba y un electrodo de potencial auxiliar **P** cómo se puede observar en la Figura 13, generalmente esta distancia debe ser 6.5 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra bajo estudio (RETIE , 2013).

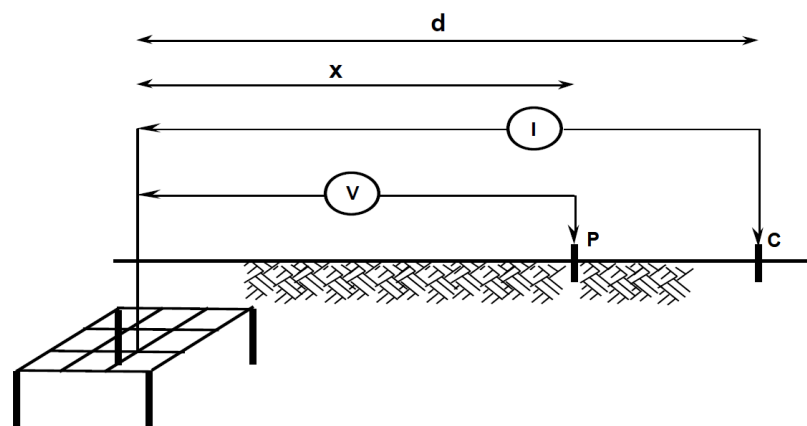


Figura 13. Método de la caída de potencial. Tomado de RETIE (RETIE , 2013)

El valor de la resistencia de puesta a tierra que se debe tomar aplicando este método, será el medido cuando el electrodo auxiliar de tensión se encuentre a 61,8 % de la distancia del electrodo auxiliar de corriente (RETIE , 2013).

Para la medición de la resistencia se utilizó el equipo METREL MI 2088 (ver Figura 14), ubicando el electrodo auxiliar de corriente a una distancia de 75 m del electrodo de puesta a tierra de la subestación del Edificio de Alta Tensión. Se realizaron mediciones en intervalos de 5 m con el electrodo auxiliar de tensión hasta alcanzar la totalidad de la distancia establecida.



Figura 14. Medidor de puesta a tierra METREL 2088

De la medición realizada se obtuvo la gráfica típica de resistencia contra distancia del electrodo de potencial **P** como se observa en la Figura 15. La curva muestra como la resistencia es cercana a cero cuando el electrodo de potencial se acerca al sistema de puesta a tierra, y tiende a infinito hacia la localización del electrodo de corriente **C**.

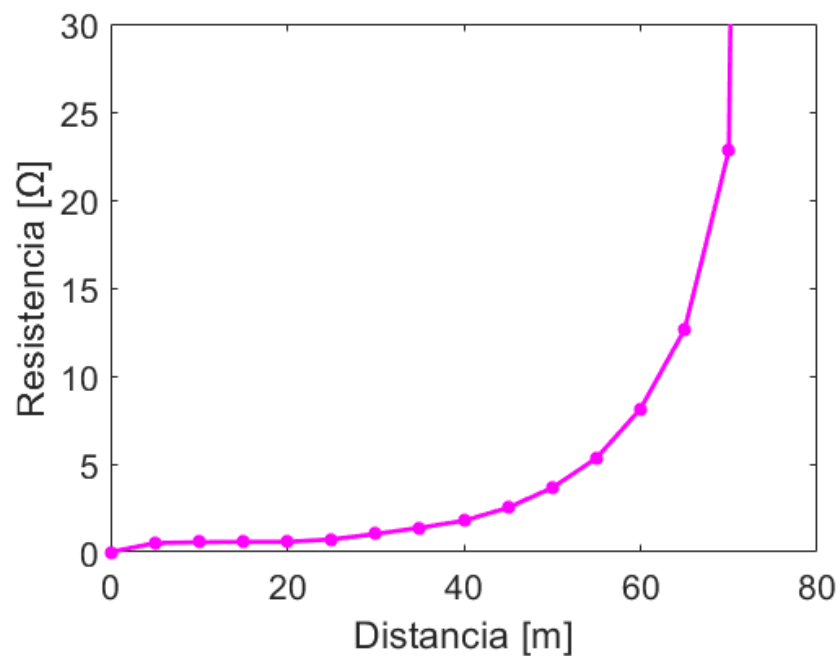


Figura 15. Medida de la resistencia de puesta a tierra

El valor de resistencia obtenido a partir de las mediciones fue $1,03 \Omega$ y aunque se ajusta a lo establecido para subestaciones de alta tensión, se deben considerar en su totalidad las exigencias establecidas por el RETIE (RETIE , 2013) y las recomendaciones del estándar IEEE 1100:2005 (IEEE Standard 1100, 2005) para la conexión de puesta a tierra a equipos sensibles. Por lo que se recomienda realizar actividades de mejora dentro de las cuales se pueden considerar las siguientes opciones:

- Para garantizar la integridad y operación de los equipos, se propone implementar un sistema de puesta a tierra independiente para cada necesidad del edificio, la cual cumpla con los requerimientos establecidos por el RETIE (RETIE , 2013), los estándares IEEE 1100:2005 (IEEE Standard 1100, 2005) y IEEE 142:2007 (IEEE Standard 142 , 2007) tal como se muestra en la Figura 16.

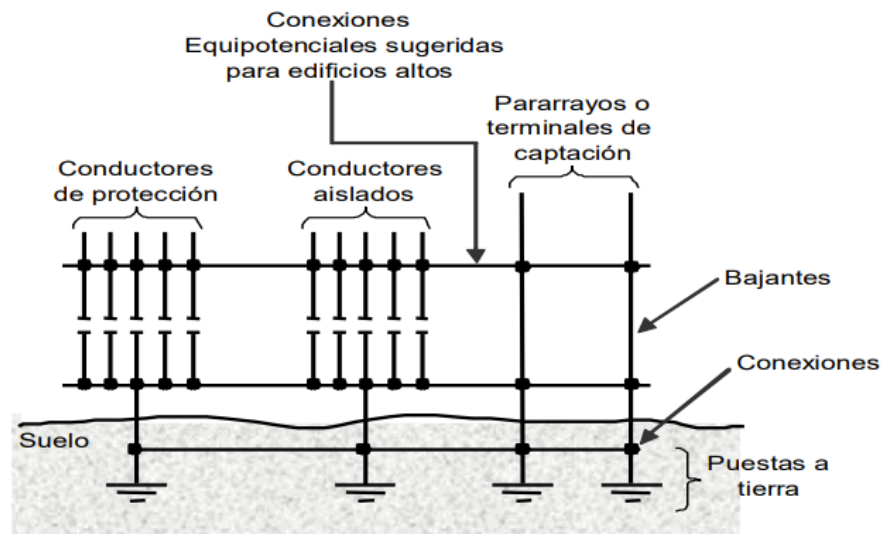


Figura 16. Sistemas con puesta a tierras dedicadas e interconectadas. Tomado del RETIE (RETIE , 2013).

Donde se deben interconectar todas las puestas a tierra del edificio, es decir, aquellas partes del sistema que están bajo el nivel del terreno y diseñadas para cada aplicación particular, tales como fallas a tierra de baja frecuencia, evacuación de electrostática, protección contra rayos o protección catódica. Esta interconexión puede hacerse por encima o por debajo del nivel del terreno (RETIE , 2013).

- En el estándar IEEE 1100 “Libro esmeralda” pueden encontrarse diferentes configuraciones que pueden ser utilizadas para instalaciones con equipos sensibles, donde se recomienda usar dos transformadores distintos: un transformador para cargas sensibles y otro para cargas de sistemas de potencia, cada uno con su conexión a tierra de manera independiente e interconectadas entre sí (IEEE Standard 1100, 2005).
- Se recomienda utilizar un transformador con aislamiento electrostático entre el sistema de distribución del edificio y los equipos de carga electrónica sensible. La ubicación del transformador debe estar cerca del panel del circuito derivado y unirse a la misma referencia de tierra que los equipos de carga electrónica (IEEE Standard 1100, 2005).
- En la subestación del edificio se recomienda implementar dos barrajes, uno para cargas sensibles y otro para las cargas más significativas, los cuales deben estar interconectados a través de un transformador de aislamiento. Este transformador proporcionará la capacidad de compensar la alta o baja tensión en estado estacionario, además de atenuar las perturbaciones en los conductores de alimentación. El transformador deberá estar equipado con un blindaje electrostático magnético que garantice la reducción de los efectos de acoplamiento capacitivo entre los devanados primarios y secundarios mejorando la capacidad de aislamiento del transformador (IEEE Standard 1100, 2005).

2.5.3. Tomacorrientes. La inspección de los tomacorrientes comprende el estudio de los siguientes artículos establecidos por el RETIE:

- Artículo 20.10.1 - Requisitos de producto.
- Artículo 20.10.2 - Clavijas y tomacorrientes: Requisitos de instalación.
- Artículo 20.12.1 - Conectores, terminales y empalmes para conductores eléctricos: Requisitos de producto.

Para cada artículo se evaluaron los diferentes numerales correspondientes a la instalación, descartando los no aplicables. Estos pueden ser consultados con detalle en el *Apéndice B. Formato de inspección 3*.

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

Se observó que la instalación cuenta con diferentes niveles de tensión como 110V, 127V y 220V, para los cuales cada tipo de tomacorriente es diferente dependiendo de su uso, como se evidencia en la Figura 17. Además, se verificó que la posición en la cual fueron instalados es la correcta. En las tomas de 127V la entrada del neutro siempre se encuentra en la parte superior como un requisito establecido para la instalación.

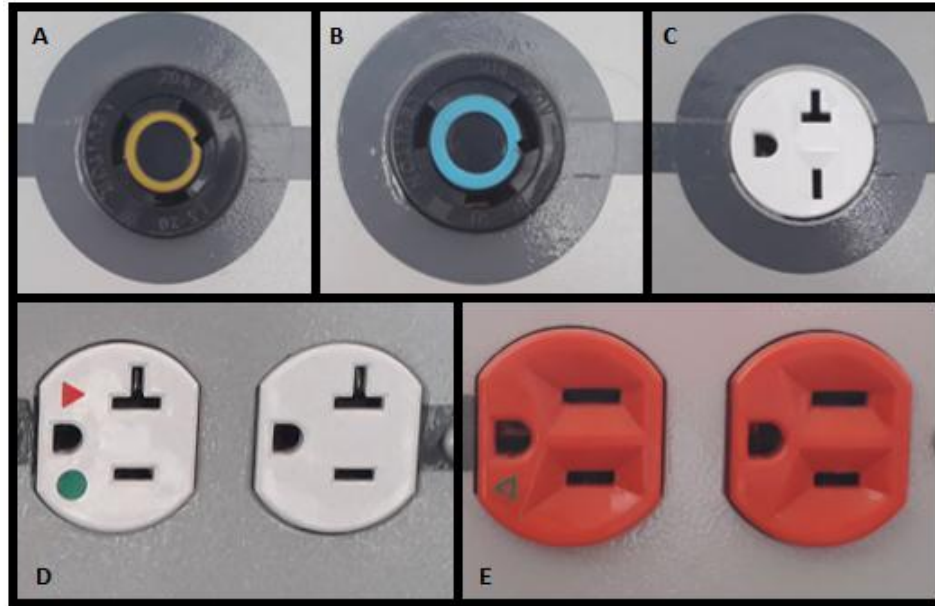


Figura 17. A. Tomacorriente monofásica 127 V, B. Tomacorriente monofásica 220 V, C. Tomacorriente monofásica 220 V, D. Toma de servicio 110 V, E. Tomacorriente regulado 20 A.

Asimismo, en la Figura 18 se observa que el conductor encauchetado de la toma regulada no está bien asegurado y puede entrar en contacto, con los diferentes conductores de las tomas monofásicas o trifásicas al interior del banco de trabajo número 1.

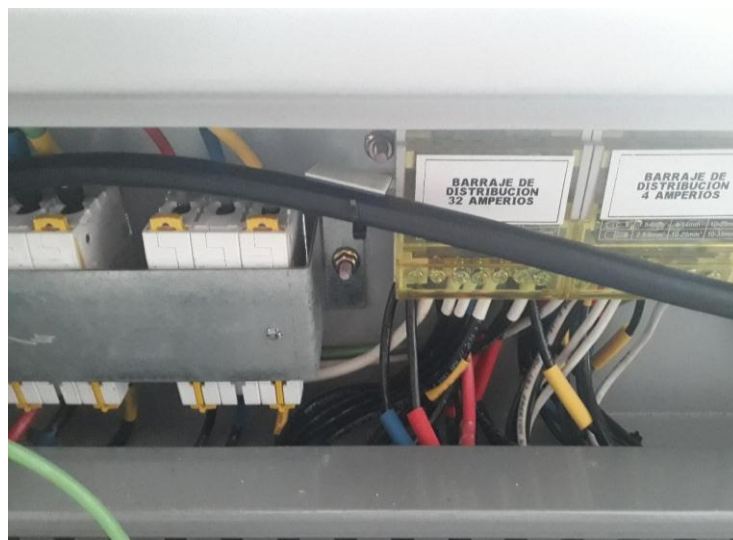


Figura 18. Conductor encauchetado de las tomas reguladas

En conclusión, se llega al dictamen de cumplimiento para los tomacorrientes, empalmes para los conductores y clavijas, la instalación se ajusta correctamente a las disposiciones establecidas por el RETIE (RETIE , 2013) Se recomienda que el conductor encauchetado de las tomas reguladas sea asegurado de una manera resistente para evitar contactos con otros conductores.

2.5.4. Canalizaciones. Para las canalizaciones los artículos evaluados son:

- Artículo 20.5.2.1 - Cajas y conduletas: Requisitos del producto
- Artículo 20.5.2 - Cajas y conduletas: Requisito de la instalación
- Artículo 20.6 - Canalizaciones

Para cada artículo se evaluaron los numerales aplicables a las canalizaciones, cajas y conduletas, los cuales pueden ser observados en el *Apéndice B. Formato de inspección 4*.

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

En general las canalizaciones y las cajas utilizadas en la instalación cumplen con los requerimientos dispuestos, a excepción de una No Conformidad Leve (NCL) presentada en la instalación, donde los conductores de comunicaciones no cuentan con la separación física recomendada de los conductores eléctricos como se evidencia en la Figura 19. También, se observó que las canalizaciones tienen suciedad lo cual puede afectar su vida útil, ver Figura 20.

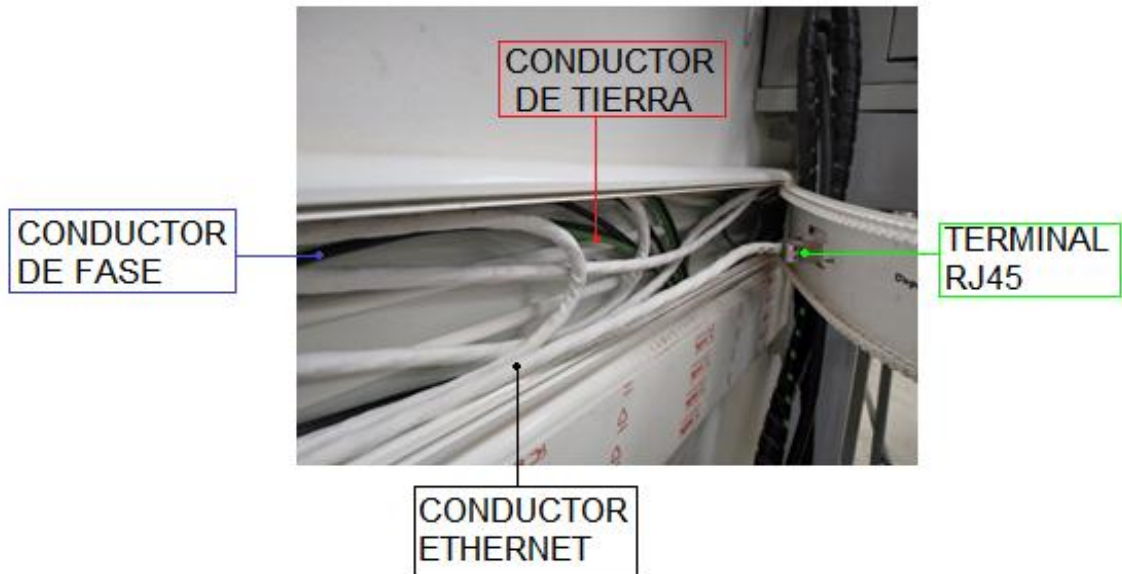


Figura 19. Canalizaciones



Figura 20. Suciedad en las canalizaciones

2.5.5. DPS e interruptores. En la inspección de los DPS se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones del RETIE (RETIE , 2013). El formato se puede observar en el *Apéndice B*.

Formato de inspección 5.

- Artículo 20.14.1 - DPS: Requisitos del producto.
- Artículo 20.14.2 - DPS: Requisitos de instalación.

Para la inspección de los interruptores de baja tensión se evaluaron los siguientes artículos:

- Artículo 20.16.2 - Interruptores automáticos de baja tensión: Requisitos de instalación.
- Artículo 20.16.3.1 - Interruptores de baja tensión: Requisitos de producto.
- Artículo 20.16.3.2 - Interruptores de baja tensión: Requisitos de instalación.
- Artículo 20.19 - Fusibles.

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

La instalación del Laboratorio cuenta con un DPS en el tablero general, el cual cumple con la marcación necesaria en cuanto a los parámetros básicos de operación y es inaccesible para personas no calificadas, como se muestra en la Figura 21. Al no ser posible realizar la inspección en el interior del tablero, se verificó por especificaciones del fabricante la disposición de conexión dando cumplimiento a lo requerido por el RETIE (RETIE , 2013).

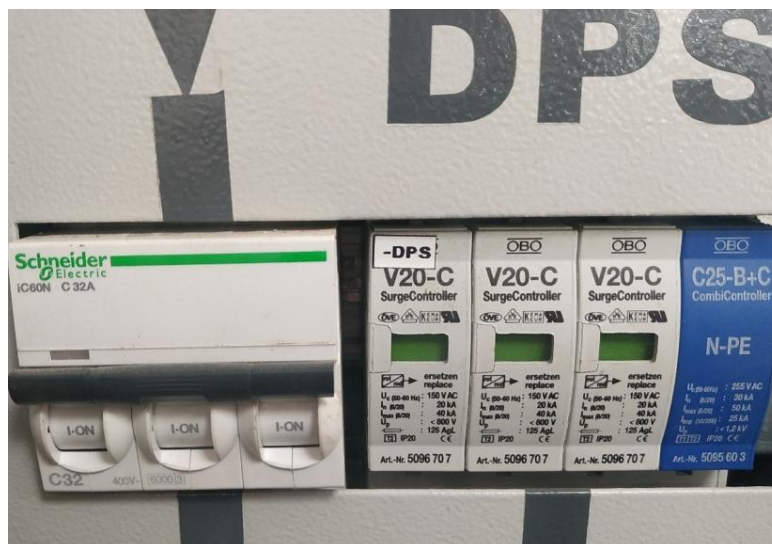


Figura 21. DPS del tablero principal

Se comprobó que cada circuito ramal cuenta con su correspondiente protección contra sobrecorrientes. Los interruptores instalados son de fácil acceso y cuentan con las especificaciones técnicas según lo establece el RETIE (RETIE , 2013). Su instalación es correcta y no presentan ningún tipo de riesgo eléctrico para las personas que realicen actividades en el Laboratorio.

En general los interruptores y los DPS instalados en el Laboratorio cumplen con las especificaciones establecidas.

2.5.6. Tableros de control y distribución. En el desarrollo de la inspección para los tableros de distribución se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Artículo 20.23.1.1 - Condiciones de la envolvente o encerramientos.
- Artículo 20.23.1.3 - Tableros eléctricos y celdas: Terminales de alambrado.
- Artículo 20.23.1.4 - Tableros eléctricos y celdas: Rotulado e instructivos.

El formato diligenciado se encuentra en el *Apéndice B. Formato de inspección 6.*

✓ **Resultado obtenido en la inspección.**

Todos los tableros del Laboratorio están contruidos de tal forma que las partes energizadas se encuentren totalmente aisladas. Asimismo, cuentan con la señalización visible del riesgo eléctrico y todos los circuitos están identificados para hacer más fácil su operación, conforme con los requerimientos establecidos por el RETIE (RETIE , 2013). Como se observa en la Figura 22, el tablero principal cuenta con interruptores, DPS y conexión a tierra.

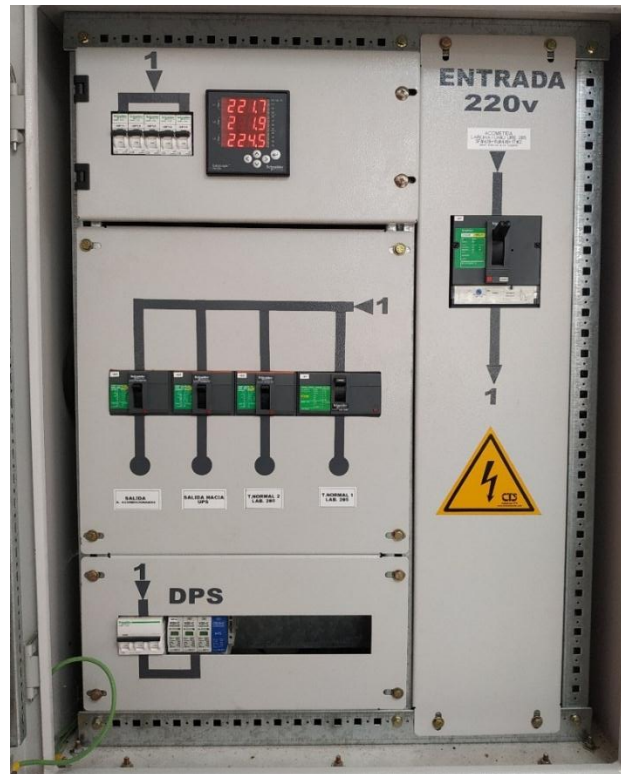


Figura 22. Tablero principal

En los tableros de distribución normal 1 y normal 2 una modificación que afecta su estructura, provocando corrosión en la superficie exterior de la cubierta protectora, como se observa en la Figura 23.



Figura 23. Tapa frontal del tablero de distribución normal 2

También, se pudo evidenciar en la Figura 24 que la tapa protectora del tablero de distribución normal 2 tiene el cierre dañado. Se recomienda realizar actividades de mantenimiento para evitar el acceso y manipulación al tablero por personal no autorizado.

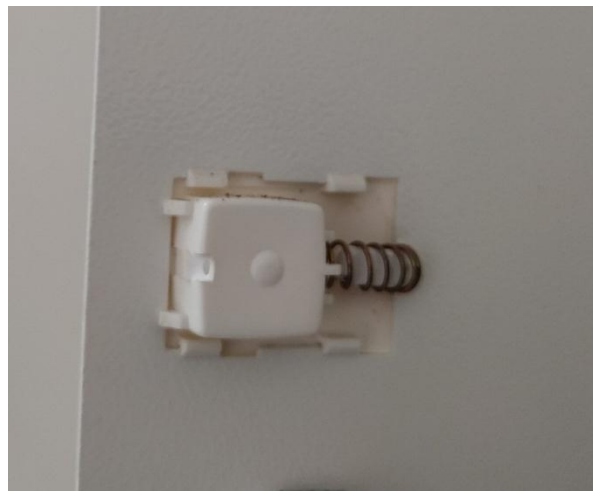


Figura 24. Cierre del tablero de distribución normal 2

Como se puede observar en las figuras 25, 26 y 27 los tableros de distribución tienen una capa de suciedad, producidas por el polvo además heces de los animales que se encuentran sobre el techo del Laboratorio, por lo que se recomienda realizar limpieza en los tableros para prevenir el deterioro en su estructura.



Figura 25. Suciedad sobre el tablero principal



Figura 26. Suciedad sobre el tablero de distribución normal 1



Figura 27. Suciedad sobre el tablero de distribución normal 2

3. Evaluación de las especificaciones de los parámetros de calidad de energía eléctrica requeridos por los equipos del Laboratorio

La normatividad correspondiente a los parámetros de calidad de la energía eléctrica relacionados con la compatibilidad electromagnética entre equipos especiales y la red del Laboratorio se presenta en este capítulo. Además, se realiza la evaluación de las especificaciones requeridas por los módulos de emulación de generación fotovoltaica y de energía eólica, determinando si presentan afectaciones por el trabajo normal en la instalación.

3.1. Criterios técnicos y normatividad

Los equipos electrónicos que se encuentran en el Laboratorio AT205, pueden estar presentes en cualquier tipo de instalación eléctrica; debido a su construcción electrónica utilizan señales con bajos niveles de potencia, haciéndolos susceptibles a tensiones por debajo de los niveles perceptibles por los humanos y que no tienen ningún efecto en los equipos de potencia eléctrica.

Por otra parte, las corrientes inyectadas en el sistema de puesta a tierra por efecto de las descargas atmosféricas pueden causar daños en los equipos electrónicos, incluso si la descarga se presenta a varios kilómetros de distancia, a menos que exista un mecanismo de mitigación.

Con el fin de dar solución a esta problemática se ha encontrado que una adecuada conexión al sistema de puesta a tierra permite enfrentar los problemas de calidad de la energía eléctrica y en general, mitigar las perturbaciones electromagnéticas en los equipos y sistemas electrónicos, manteniendo la seguridad de la instalación, como se presentó en el Capítulo 2 (Sección 2.5.2).

Además, a nivel de norma se realizó la revisión del artículo No. 11 de Compatibilidad Electromagnética del RETIE (RETIE , 2013), en donde se presentan algunas definiciones importantes del tema, pero no incluye información relacionada a los problemas causados por la incompatibilidad, ¿cómo se genera? y ¿De qué manera mitigar?

Por su parte, el ICONTEC ha realizado algunos trabajos con el propósito de mejorar la reglamentación y control correspondiente a la compatibilidad electromagnética y calidad de la energía eléctrica, la cual ha tenido en cuenta algunas normas internacionales como:

- IEEE Std 1100 Emerald Book. Powering and grounding electronic equipment.
- IEEE Std 519 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- IEC 61000-1-2: (CEM) Generalidades. Metodología para el logro de la seguridad funcional de los sistemas eléctricos y electrónicos.
- IEC 61000-2-2: (CEM) Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro en baja tensión.
- IEC 61000-2-4: (CEM) Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.
- IEC 61000-2-8: (CEM) Entorno. Huecos de tensión e interrupciones breves en las redes eléctricas de suministro público, con inclusión de resultados de medidas estadísticas.
- IEC 61000-6-3: (CEM) Norma de emisión de entornos residenciales, comerciales y de industria ligera.

A partir de las cuales se han obtenido las siguientes reglamentaciones para la norma colombiana:

- NTC 5000: Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales

- NTC 5001: Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común
- NTC-IEC-61000-1-1: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1. Generalidades. Sección 1: aplicación e interpretación de definiciones y términos fundamentales.

Gracias a estas normas se tienen importantes definiciones, parámetros y niveles admisibles para los diferentes fenómenos que afectan la calidad de la energía. A si mismo indican como se puede realizar la identificación, medición y coordinación de estrategias de mitigación a los fenómenos que puedan presentarse en una instalación de uso final.

Como se observa en la Tabla 2, al efectuar la revisión de las normas mencionadas con anterioridad, se realizó la selección de los diferentes límites establecidos a los principales parámetros que presentan afectación a la calidad de la energía eléctrica, generando un impacto en la confiabilidad y operación de los equipos. Donde la selección de los rangos admisibles para el índice de THDv y IHDv se remite a la norma IEC 61000-2-2 y el estándar IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992), puesto que se encontraron errores de traducción en la norma colombiana 5001:2008 (ICONTEC, 2008) para niveles de baja tensión, debido a que son adaptaciones de la norma IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992). Lo cual implica la aplicación de estándares internacionales debido a la ausencia de las normas nacionales.

Tabla 2.

Normas y estándares utilizados para la evaluación de los parámetros de calidad de la energía

Parámetro	Normas	Límites
Tensión	ICONTEC 1347:2013	127/220 V Max 10% Min 10%
Frecuencia	ICONTEC 1347:2013	59.8 Hz - 60.2 Hz
	IEEE 519:1992	8%

Parámetro	Normas	Límites	
Distorsión armónica total THDv	NTC 5001:2008	5%	
	IEEE 519:1992	5%	
	NTC 5001:2008	3%	
Distorsión armónica individual IHDv	EN50160:2010	Orden h	Amplitud
		3	5%
		5	6%
		7	5%
		9	1.50%
		11	3.50%
Desbalance de tensión	NTC 5001:2008	2%	
	EN50160:2010		

Estos parámetros serán la base para realizar la evaluación de las especificaciones de calidad de energía, requeridos por los equipos especiales del Laboratorio AT205. Los equipos de mayor importancia a evaluar serían:

➤ Módulo de energía eólica interconectada

Este equipo analiza la estructura y el funcionamiento de las plantas eólicas, la influencia de la velocidad del viento y la estructura mecánica de la planta. Se puede emular con fidelidad los detalles por medio del banco de pruebas de servomotores; la unidad de control de la máquina asíncrona de doble alimentación (el generador de la planta eólica) permite una visualización de los procesos durante la experimentación. Como se observa en la Figura 28, el módulo cuenta con los siguientes componentes:

1. CO3301-5R: Doble unidad de barra trifásica- alimentador entrada- salida.
2. CO5127-1Z: Multímetro analógico/digital, vatímetro y medidor de factor de potencia
3. CO3212-5U7: Alimentación de corriente para máquina eléctrica.

4. CO3208-3B7: Transformador trifásico de aislamiento de 1 kW para planta eólica.
5. CO3208-3A7: Control de generador asíncrono, doble alimentación para planta eólica.
6. CO3636-6W7: Banco de prueba de servo motores de 1kW.
7. CO3208-3C2: Simulador dinámico de fallo de red.

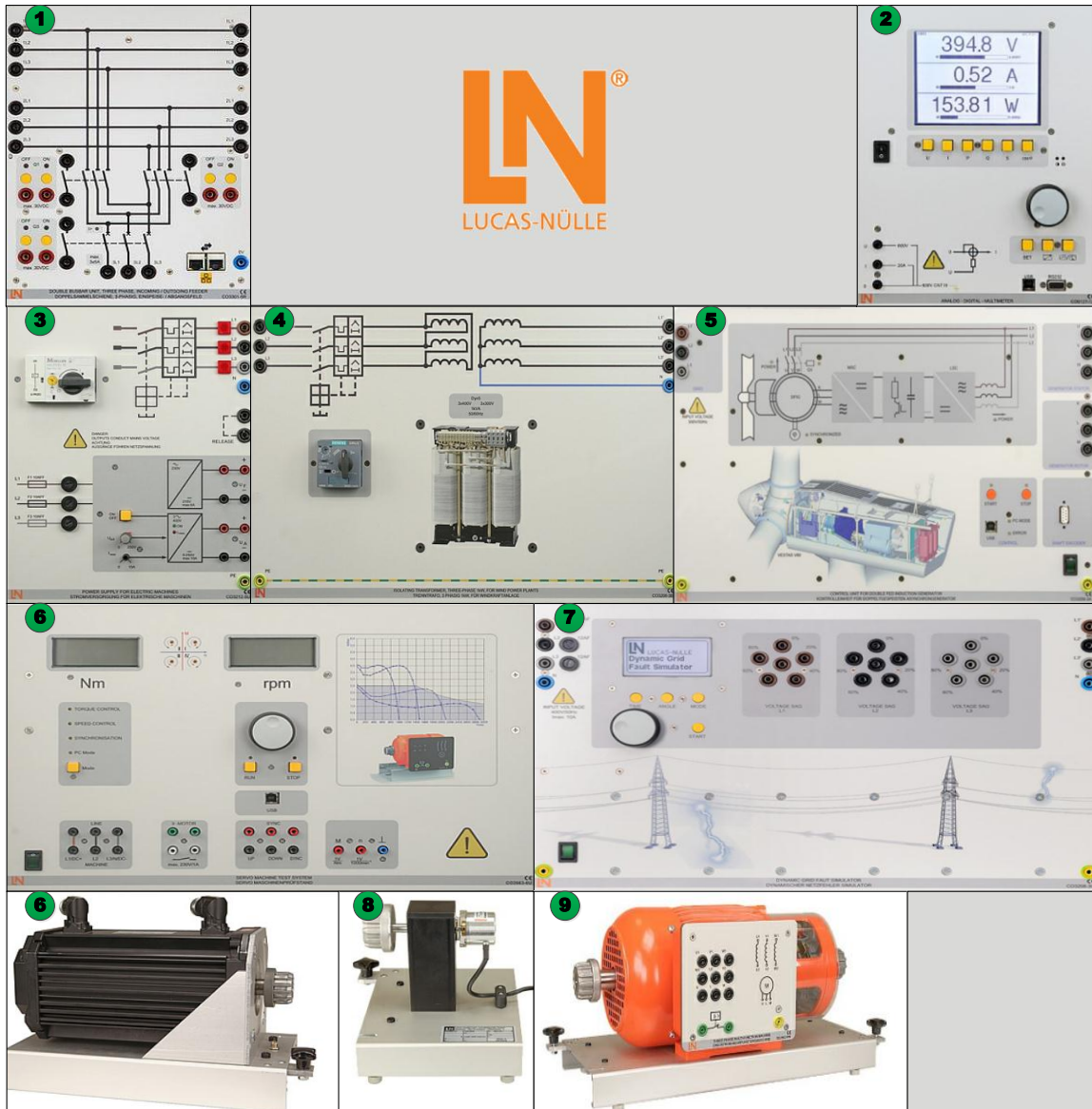


Figura 28. Módulo de energía eólica de Lucas Nülle

➤ Modulo de celdas solares fotovoltaicas

Este equipo permite analizar y emular de manera más cercana a la práctica, la estructura de las instalaciones fotovoltaicas que operan en paralelo con la red. En la Figura 29, se observa el módulo el cual está conformado por los siguientes componentes;

1. CO3301- 3P7: Transformador trifásico de regulación con acoplamiento de motor.
2. CO3301-3N: Transformador aislante trifásico 1kW.
3. CO5127-1Z: Multímetro analógico/digital, vatímetro y medidor de factor de potencia
4. CO5127-1S: Medidor de calidad de potencia con display gráfico y almacenamiento de datos.
5. CO3301-3F: Carga óhmica variable trifásica de 1kW.
6. CO3208-1N: Inversor trifásico fotovoltaico de uso industrial.
7. CO3212-5U: Alimentación de corriente para maquinas eléctricas.
8. CO3208-1N7A: Estación de transformación 208V/400V
9. CO3208-1P: Reproducción de celda solar de 1,5 kW y 500 V

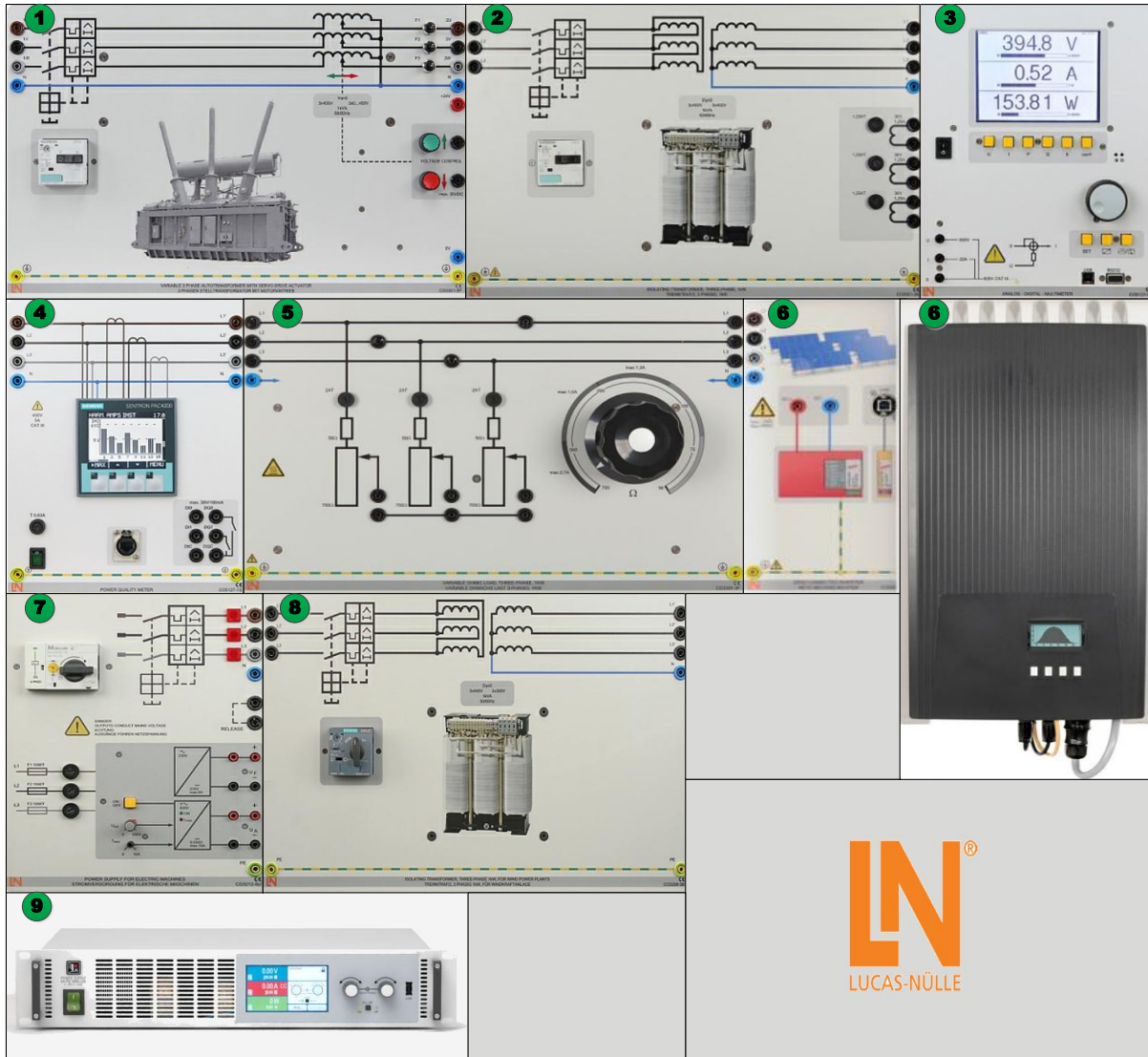


Figura 29. Módulo de celdas solares fotovoltaicas de Lucas Nülle

➤ Fuente Chroma 61701

La fuente programable Chroma serie 61701 ofrece alimentación de CA trifásica de 5 hilos, con una potencia de 1500 VA. A diferencia de la fuente de CA trifásica tradicional, incluye modelos de baja potencia con un costo muy bajo. Los usuarios pueden programar la tensión y la frecuencia, medir las características críticas de la salida en su pantalla LCD. Ofrece la solución

adecuada para simular todo tipo de condición de entrada. También es adecuado para aplicaciones comerciales, desde pruebas de Laboratorio hasta producciones en masa.



Figura 30. Fuente Chroma 61701

Al realizar la revisión de los manuales de usuario y hojas de datos para cada uno de los equipos, no se encontró información relacionada con los parámetros de calidad de la energía eléctrica que establecieran las condiciones de operación para estos equipos; como los módulos fueron importados por la Universidad Industrial De Santander, fue necesario que el fabricante los adaptara según las especificaciones de la norma colombiana.

3.2. Análisis de los requerimientos para los equipos sensibles del Laboratorio AT205

Si se requiere realizar la evaluación de los parámetros de calidad para equipos sensibles, se deben utilizar las normas descritas en la Tabla 2, donde se establecen los límites admisibles por las

diferentes entidades de control nacional e internacional. Para ello, se hace necesario conocer el estado de la instalación y determinar si se da cumplimiento a lo establecido por norma y requerido por los equipos para su funcionamiento.

Para determinar el estado en el cual se encuentra la instalación se realizó un diagnóstico donde se obtuvieron los diferentes parámetros de calidad mencionados anteriormente, durante un periodo de medición de una semana que se presenta en detalle en el Capítulo 5.

Los parámetros obtenidos de la monitorización son utilizados para evaluar las especificaciones requeridas por los equipos y de esta forma determinar su compatibilidad con la red y su adecuado funcionamiento, tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros obtenidos a partir de la operación habitual del Laboratorio

Parámetros	Limites	Fase	Operación normal - Horario laboral
Tensión	90-110% Vn	N/A	Cumple
Frecuencia	59.8-60.2 Hz	N/A	Cumple
THD _v -TN1	8%	Fase A	3,2268
		Fase B	3,1837
		Fase C	3,2885
IHD _v -TN1 (5° orden armónico)	6%	Fase A	3,1867
		Fase B	3,1449
		Fase C	3,2396
Desbalance- TN1	2%	N/A	0,5541
THD _v -TN2	8%	Fase A	3,2209
		Fase B	3,1392
		Fase C	3,2524

Parámetros	Limites	Fase	Operación normal - Horario laboral
IHDv-TN2 (5° orden armónico)	6%	Fase A	3,1745
		Fase B	3,0947
		Fase C	3,1964
Desbalance- TN2	2%	N/A	0,5786

En la Tabla 3, se observan los máximos valores obtenidos para los diferentes parámetros durante el diagnóstico realizado a la instalación para los días laborales, lunes a viernes en horarios 6:00 a 20:00. Estos resultados corresponden a las capturas instantáneas realizadas para los dos tableros de distribución normal 1 y normal 2 en condiciones normales de operación, donde se evidencia el cumplimiento a los parámetros requeridos por los equipos.

Además, como se observa en la Tabla 4 se realiza la revisión de los parámetros para eventos tipo RVC, cambio de forma de onda y baja frecuencia que se presentaron en la instalación durante la monitorización.

Tabla 4.

Parámetros obtenidos a partir de los eventos registrados en horario no laboral del Laboratorio

Parámetros	Limites	Fase	Eventos- Horario laboral	Eventos- Horario no laboral
Tensión	90-110% Vn	N/A	Cumple	Cumple
Frecuencia	59.8-60.2 Hz	N/A	Cumple	Cumple
THDv-TN1	8%	Fase A	2,6078	5,3934
		Fase B	2,5953	6,7143
		Fase C	2,8723	6,5399

Parámetros	Limites	Fase	Eventos- Horario laboral	Eventos- Horario no laboral
IHDv-TN1 (5° orden armónico)	6%	Fase A	2,5868	3,9563
		Fase B	2,5880	4,7477
		Fase C	2,8642	5,1951
Desbalance- TN1	2%	N/A	1,4880	2,9633
THDv-TN2	8%	Fase A	2,5853	5,3926
		Fase B	2,5906	6,7140
		Fase C	2,8710	6,5420
IHDv-TN2 (5° orden armónico)	6%	Fase A	2,6066	5,1864
		Fase B	2,5833	4,7465
		Fase C	2,8629	5,1964
Desbalance- TN2	2%	N/A	1,4953	2,9596

Los máximos valores presentados por los eventos se registraron en horario no laboral, donde se da cumplimiento a la normatividad y a los requerimientos para la operación de los equipos. Pero no son válidos para la evaluación puesto que la instalación no se encontraba en operación.

En general se determina que los equipos sensibles del Laboratorio bajo condiciones de operación normal en la instalación, no presentan afectaciones puesto que se dan cumplimiento a los requerimientos de funcionamiento establecidos por la normatividad.

4. Metodología para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205

Este capítulo presenta la metodología propuesta para el seguimiento y la adquisición de datos, necesarios en el desarrollo del diagnóstico y evaluación de la calidad de la energía eléctrica para una instalación eléctrica de uso final. Durante la etapa de desarrollo, se tomó como punto de partida los parámetros y rangos admisibles definidos por el estándar internacional IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015), IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992) y la norma colombiana NTC 5000:2013 (ICONTEC, 2013), con el fin de realizar una evaluación a los diferentes fenómenos que afectan la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205. A continuación, se presentan los pasos de la metodología.

4.1. Planteamiento del problema

En esta etapa se conoció el estado de la instalación eléctrica, obteniendo información de las actividades que se realizan en el Laboratorio. De esta forma se verificó la ocurrencia y duración de los eventos que afectan la calidad de la energía eléctrica.

Se planteó una serie de preguntas a los usuarios y encargados del Laboratorio, como, por ejemplo:

- ¿Qué equipos tiene el Laboratorio?

El Laboratorio AT205 tiene equipos de cómputo con características de investigación, emulador de sistemas fotovoltaicos aislados e interconectados, emulador de energía eólica interconectada, emuladores de celdas solares fotovoltaicas, disposición de conexión de equipos especiales monofásicos, bifásicos o trifásicos trifilar o tetrafilar, una bicicleta estática generadora, una fuente de tensión o corriente programable y controlable, tableros de conexión para cargas residenciales monofásico, bifásico y trifásico tetrafilar, comúnmente se energizan medidores de energía eléctrica de altas prestaciones investigativas.

- ¿Cuándo fue la última vez que se realizó mantenimiento a los equipos?

No se evidencia mantenimiento a los equipos desde hace 2 años, tiempo en que la persona entrevistada hace uso del Laboratorio.

- ¿El Laboratorio cuenta con los planos eléctricos?

Sí, los planos eléctricos están en poder de planta física de la UIS, los cuales no muestran de manera detallada la disposición de la instalación eléctrica del Laboratorio.

- ¿Qué equipos están presentando inconvenientes?

El emulador de energía eólica, la bicicleta estática generadora y el emulador FV.

- ¿Qué tipo de problemas presentan los equipos y con qué frecuencia?

El emulador de energía eólica no recibe señal de tensión en la entrada del generador; por tanto, no se interconecta con la red. La bicicleta estática generadora, no está en uso por falta de mantenimiento y elementos que fueron retirados para otros usos de investigación. Sobretensión en la red, detectada por la protección del emulador FV

- ¿Coinciden algunos problemas al mismo tiempo?

No

Conociendo esta información, se realizó una primera evaluación en cuanto a las condiciones en las que se encuentra la instalación y los equipos con los que cuenta el Laboratorio. Además, se estableció qué fenómenos se presentan cuando el Laboratorio está en funcionamiento y cuáles fallas son las causantes de los problemas en la instalación.

4.2. Análisis preliminar

Este análisis se realizó mediante la identificación de las cargas más sensibles ante las perturbaciones de la calidad de la energía eléctrica, además de reconocer donde están instaladas en el Laboratorio. De igual forma, se hizo un inventario de los equipos y una inspección física de la instalación eléctrica, con la finalidad de establecer posibles conexiones defectuosas que puedan afectar el funcionamiento de los equipos.

Asimismo, se eligieron los equipos de medida necesarios para desarrollar el estudio de la calidad de la energía eléctrica. La selección de estos se llevó a cabo identificando las necesidades del Laboratorio y teniendo en cuenta la información recolectada en el Capítulo 2.

4.3. Equipos de medida

Uno de los fundamentos de un estudio de calidad de la energía eléctrica son los equipos de medición. Para el diagnóstico realizado en este Laboratorio se utilizaron una serie de equipos de medición que se describen a continuación.

4.3.1. Analizador de redes PQube 3. El analizador de redes PQube 3, cumple con los estándares IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015) e IEEE 1159:2019 (IEEE Std 1159, 2019) para realizar monitorización de la calidad de la energía.



Figura 31. Analizador de red PQube 3

El medidor cuenta con exactitud 0,2s y medición clase A; esto permite una configuración automática o personalizada de acuerdo con los umbrales de calidad de la energía eléctrica para las señales de tensión y corriente; los datos pueden ser descargados de forma remota a través de la red o transferirlos al computador por medio de un dispositivo USB.

4.3.2. Medidor de potencia trifásico UT267B. Para la toma de muestras de corriente se utilizó el medidor trifásico UNIT UT267B, el cual permite realizar mediciones de corriente hasta 20 A, con una resolución de 0,1 mA y una exactitud $\pm(1,5\%rdg+3dgt)$, mediciones de tensión hasta 600 V, con una resolución de 0,01 V y una exactitud de $\pm(1,5\%rdg+3dgt)$. También, permite transferir los datos al computador para realizar un análisis posterior.



Figura 32. Medidor de potencia trifásico UT267B

4.3.3. Cámara termográfica Fluke TiS50. La cámara termográfica es utilizada principalmente para el mantenimiento preventivo y predictivo de equipos o instalaciones eléctricas cuando se detectan puntos calientes que pueden afectar la operación normal del sistema. Esta tiene rangos de medida para temperaturas desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; también, permite almacenar las imágenes en la memoria interna de 4GB y posteriormente ser extraídas mediante tarjeta microSD.



Figura 33. Cámara termográfica TiS50

Este equipo se empleó para la ubicación de puntos calientes al momento de poner en funcionamiento las cargas del Laboratorio y de esta forma observar si se presentan aumentos en la temperatura de los conductores que puedan afectar la calidad de la energía.

Otro de los equipos utilizado es el medidor METREL MI 2088 (ver Figura 14) para la realización de las mediciones del sistema de puesta a tierra.

4.4. Establecer los parámetros de calidad de la energía eléctrica para su medición

Con el propósito de conocer el estado de los indicadores establecidos por la norma NTC 5000:2013 (ICONTEC, 2013) y el estándar IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015), se tuvo en cuenta la revisión del planteamiento del problema y el análisis preliminar, en donde se establecieron las variables eléctricas a ser monitorizadas en diferentes puntos de la instalación. Los parámetros monitorizados en la instalación eléctrica fueron:

- Variaciones de corta duración; Huecos de tensión (Sags), Elevaciones de tensión (Swells).
- Variaciones de larga duración; sobretensión, subtensión e interrupciones sostenidas.
- Desbalance de tensión.
- Desbalance de corriente.
- Distorsión armónica total de corriente y de tensión, componente de DC, armónicos, interarmónicos, muescas y ruido.

4.5. Ubicación de los puntos y tiempo en el cual se va a realizar la medición

Para la selección de los puntos donde fueron instalados los equipos de medida, fue necesario conocer el objeto del estudio, es decir, si se desea diagnosticar un problema de funcionamiento de algún equipo u operación de la instalación eléctrica.

En el desarrollo de la monitorización y ubicación de los equipos de medida, se establecieron dos etapas de medición. La primera etapa comprendió las mediciones en la entrada de los tableros de distribución normal 1 y normal 2 con dos analizadores de red PQube 3. En este punto se obtiene la información general que permite conocer el comportamiento de la instalación eléctrica.

De manera simultánea se hicieron mediciones con la cámara termográfica en busca de posibles puntos calientes en la instalación eléctrica del Laboratorio.

En la segunda etapa se realizó un seguimiento a cada uno de los circuitos de los tableros de distribución normal 1 y normal 2, con el fin de conocer en detalle la distribución de la carga y el dimensionamiento de la instalación. Las mediciones se desarrollaron con dos medidores UNIT UT267B conectados de manera simultánea en cada uno de los circuitos.

Para cada una de las etapas, se realizaron una serie de maniobras en la instalación:

- A. Inicialmente la operación del sistema se hizo sin las cargas más sensibles, luego se conectaron las cargas más representativas una a una, con la finalidad de observar y establecer cuáles son las cargas que pueden estar afectando la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio.
- B. Operación del sistema con carga normal durante al menos un día de trabajo. Durante este periodo se realizó la conexión y desconexión de las diferentes cargas asociadas a la

instalación eléctrica, por intervalos de tiempo que se correlacionaron con los tiempos de captura de datos programados en los equipos de monitorización.

De acuerdo con la información estudiada en el estándar IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015), la medición se llevó a cabo durante una semana, registrando datos continuamente.

4.6. Configuración y conexión del equipo de medición

El analizador de redes PQube 3 se configuró de acuerdo con los rangos admisibles para cada fenómeno; además, se contó con el acompañamiento de personal familiarizado en el uso de este equipo y en el manejo software *PQube 3 Configurator*, donde se establecieron los parámetros de medición, mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Configuración del equipo de medición utilizada para la monitorización en el Laboratorio AT205.

Sección	Configuración del dispositivo PQube 3
Avanzado	Registro de desbalance de tensión: Activado
	Método para el cálculo de desbalance: IEC
	Grabación de voltaje THD: Activado
Activación de voltaje	Hundimiento de tensión: 90%
	Elevación de tensión: 110%
	Límite de interrupción: 10%
	Eventos fase-neutro
	Eventos de histéresis: 2%
Eventos fase-fase	Hundimiento de tensión: 90%
	Elevación de tensión: 110%

Sección		Configuración del dispositivo PQube 3	
		Límite de tensión: 10%	
		Eventos de histéresis: 2%	
		Baja frecuencia: 99,6666%	
		Sobre frecuencia: 100,3333%	
		Eventos de frecuencia	Eventos de histéresis: 0,20%
		Límite de tensión nominal: 5%	
		Límite de duración del ciclo: 5%	
		Eventos fase - neutro	Activado límite de RVC: 5%
		RVC	Eventos de histéresis: 2%
		Eventos fase - fase	Activado
RVC	Límite de RVC: 5%		
		Eventos de histéresis: 2%	
Eventos	Grabaciones de eventos	Muestras registradas por ciclo: 512	
		Capturar el final del evento: Activado	
		Grabación del evento RMS: Urms1	

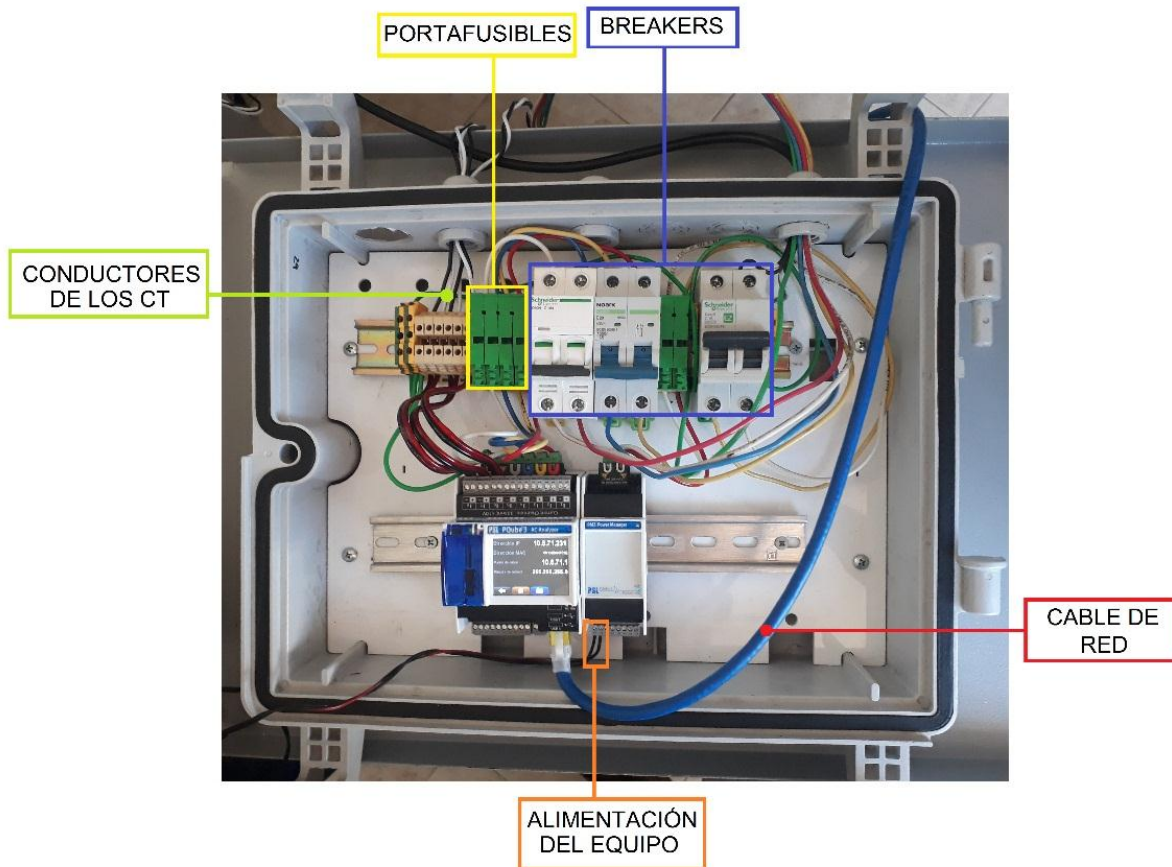


Figura 34. Analizador de red PQube 3 conectado al tablero de distribución normal 1

En la Figura 34 se muestra la conexión interna del analizador de red PQube 3, el cual cuenta con dos tipos de protecciones; los breakers permiten proteger a la persona que opera el equipo contra fallas de tensión y los fusibles protegen los canales de entrada del medidor para fallas por sobrecorriente preservando su vida útil. Asimismo, el medidor fue conectado a la red con el fin de monitorizar su continuo funcionamiento y la captura de datos de manera remota.

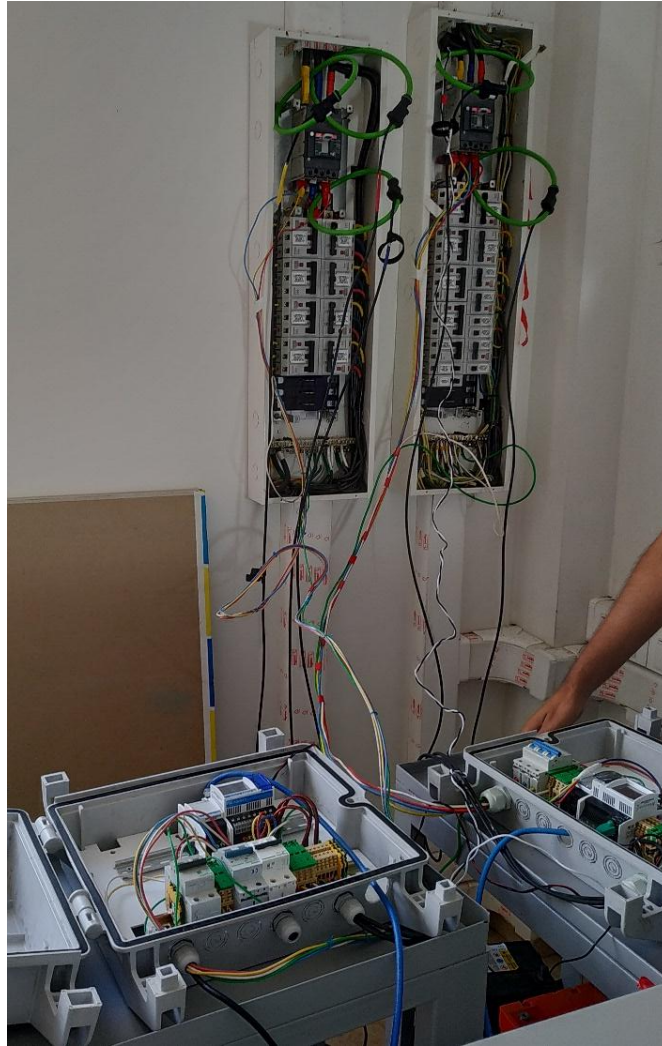


Figura 35. Conexión de los PQube 3 a los tableros de distribución normal 1 y normal 2

En la Figura 35 se observa la instalación de los analizadores de red PQube 3, los cuales estaban conectados de manera independiente en la entrada de los tableros de distribución normal 1 y normal 2. Para realizar la conexión de los medidores fue necesaria la presencia del personal adecuado y calificado en el manejo y la instalación de estos equipos.

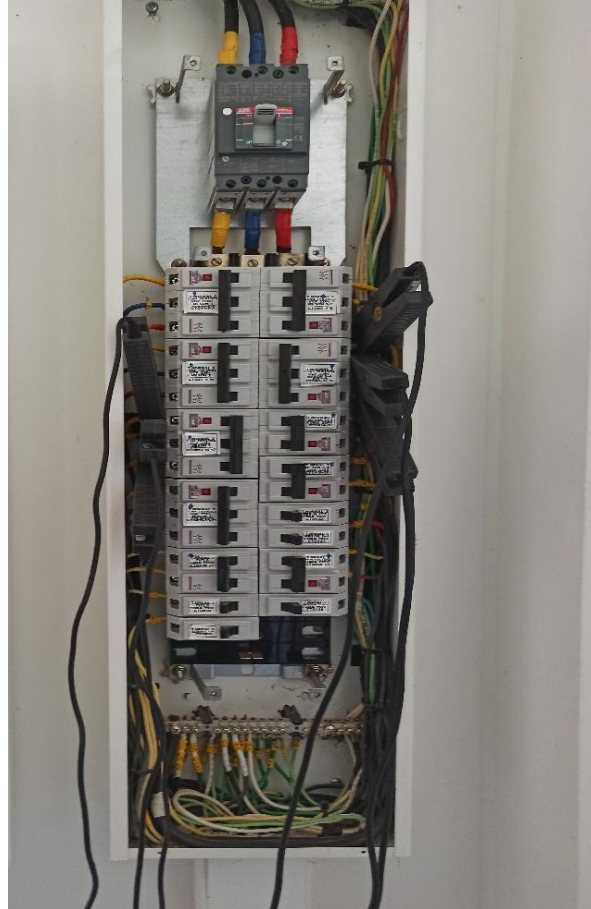


Figura 36. Conexión de los medidores UT267B al tablero normal 2

En la Figura 36 se observa la conexión de los medidores de potencia trifásicos UT267B en el tablero de distribución normal 2. El seguimiento se llevó a cabo para cada uno de los circuitos de la instalación del Laboratorio y de esta forma poder obtener la corriente que fluye por cada uno de los circuitos y su posterior análisis.

5. Análisis de resultados obtenidos en la monitorización de la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio AT205

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en la monitorización del Laboratorio AT205, donde tomando como base el estándar IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992), IEEE 1159:2019 (IEEE Std 1159, 2019), la NTC 5000:2013 (ICONTEC, 2013) e IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015), se realizó el análisis para identificar las afectaciones a las formas de onda de las señales de tensión, corriente y los valores de frecuencia. El estudio se presenta en dos etapas: la primera muestra el análisis de las muestras de tensión obtenidas a partir de los analizadores de redes PQube 3 y la segunda determina las implicaciones generadas por corriente en la instalación de acuerdo con las mediciones registradas en los medidores de potencia trifásicos UT267B.

5.1. Mediciones realizadas con el analizador de redes de PQube 3

El diagnóstico realizado a la entrada de los tableros de distribución normal 1 y normal 2, se efectuó durante una semana según lo establecido por el estándar IEC 61000-4-30:2015 (International Electrotechnical Commission, 2015), iniciando el 18 de noviembre de 2019 a las 10:00 am y finalizando el 25 de noviembre de 2019 a las 12:00 pm. El equipo de medida fue configurado para realizar la captura automática de datos cada 3 horas, obteniendo 55 instantáneas para cada tablero y un registro de eventos mostrado en la Tabla 6.

Tabla 6.

Eventos presentados para el tablero de distribución normal 1 y normal 2

Punto De Medida	Evento	Mediciones
Tablero de distribución normal 1	Cambio de forma de onda	8
	Baja frecuencia	1
	RVC	7
Tablero de distribución normal 2	Cambio de forma de onda	7
	Baja frecuencia	1
	RVC	8

Algunos eventos fueron registrados de forma simultánea en los dos puntos de medición, pero en el registro de los analizadores de redes se obtuvo un número diferente de cambios de forma de onda y cambios rápidos de tensión por tablero de distribución.

Asimismo, todos los cambios de forma de onda ocurrieron en las horas de la mañana a excepción del día 21 de noviembre para el tablero de distribución normal 1, donde se registró el evento a las 19:12 y para el tablero de distribución normal 2 se registró a las 19:14, ver *Apéndice C*. Estos fenómenos no pueden ser asociados al funcionamiento normal del Laboratorio puesto que en la franja donde se presentaron, la instalación eléctrica del Laboratorio no se encontraba en operación. Los cambios rápidos de tensión RVC se registraron en días diferentes como se muestran en las tablas 7 y 8 para cada uno de los tableros.

Tabla 7.

RVC registrados en el tablero de distribución normal 1

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN NORMAL 1				
Fecha	Hora	Tipo	Magnitud	Duración en [s]
20/11/2019	05:59:11:910	RVC	6,97%	0,025
21/11/2019	19:12:57:842	RVC	6,61%	0,050

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN NORMAL 1				
Fecha	Hora	Tipo	Magnitud	Duración en [s]
22/11/2019	03:30:19:325	RVC	10,02%	0,308
22/11/2019	05:56:52:486	RVC	6,72%	0,083
22/11/2019	15:43:42:850	RVC	6,75%	0,192
24/11/2019	07:22:12:948	RVC	7,88%	0,008
24/11/2019	08:29:24:046	RVC	9,61%	0,092

Tabla 8.

RVC registrados en el tablero de distribución normal 2

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN NORMAL 2				
Fecha	Hora	Tipo	Magnitud	Duración en [s]
20/11/2019	06:00:16:078	RVC	6,97%	0,025
21/11/2019	19:14:00:976	RVC	6,59%	0,050
22/11/2019	03:31:22:245	RVC	10,02%	0,307
22/11/2019	05:57:55:348	RVC	6,72%	0,083
22/11/2019	15:44:45:444	RVC	6,75%	0,192
24/11/2019	07:23:14:491	RVC	7,88%	0,008
24/11/2019	08:29:49:497	RVC	6,18%	0,034
24/11/2019	08:30:31:245	RVC	9,64%	0,099

Teniendo en cuenta las horas donde se presentaron los RVC y según las maniobras ejecutadas, se determina que estos eventos no fueron producidos por las actividades realizadas en el Laboratorio. Se asocian principalmente a la conexión y desconexión de grandes cargas o maniobras realizadas dentro del campus universitario.

De los analizadores de red se obtuvieron muestras de tensión eficaz por fase, en los dos puntos de medición seleccionados. Para el análisis de las muestras obtenidas fue necesario convertir los archivos del formato .csv a una hoja de cálculo en EXCEL y posteriormente importarlos al

software MATLAB, donde se realizó el cálculo de parámetros como distorsión armónica total de tensión (THD_v) e individual (IHD_v) por fase y desbalance de tensión.

5.1.1. Análisis de la distorsión armónica individual IHD_v. El análisis se presenta para cada uno de los eventos y capturas instantáneas de los analizadores de red, teniendo en cuenta el periodo de monitorización, magnitud, frecuencia de ocurrencia y duración de los diferentes eventos.

- ***Cambios rápidos de tensión RVC.***

Para los dos tableros de distribución los eventos se registraron de manera simultánea, a excepción de un evento RVC que el analizador de redes del tablero de distribución normal 2 capturo de más en comparación con el tablero de distribución normal 1. Los eventos que fueron registrados en el mismo instante de tiempo muestran resultados de IHD_v aproximados. Los valores presentados en la Tabla 9, corresponden a un evento RVC donde se obtuvo la mayor distorsión armónica individual para los órdenes armónicos impares, con respecto a los eventos registrados de ese tipo durante toda la monitorización; sin embargo, para el tablero de distribución normal 1 se observa el caso más crítico para los dos puntos de medición, donde se evidencia que los resultados obtenidos están en los rangos.

Tabla 9.

Máximo IHD_v obtenido en los RVC

		RVC-IHD_v [%]				
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 1	Fase A	1,0497	5,1874	0,9617	0,3750	0,1123
	Fase B	4,4644	4,7457	1,5719	0,3597	0,1691
	Fase C	3,8065	5,1951	1,0901	0,1820	0,2656
	Fase A	1,5805	4,6395	1,0374	0,1041	0,5487

		RVC-IHDv [%]				
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 2	Fase B	1,1456	4,6740	1,5160	0,4260	0,2689
	Fase C	1,1456	4,6740	1,5160	0,4260	0,2689

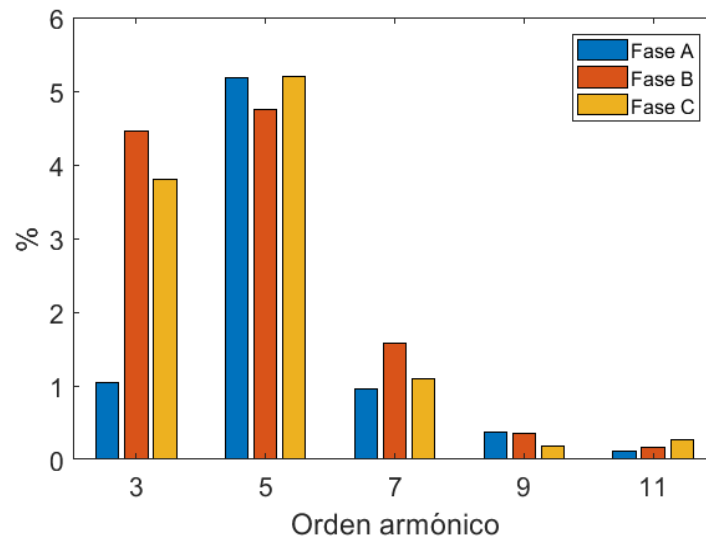


Figura 37. Máximo IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido en el RVC

Para el tablero de distribución normal 1 se muestra el evento registrado de más como se observa en la Tabla 9, donde el 5to orden armónico presenta la máxima distorsión, pero se ajusta al límite del 6%, establecido para la distorsión armónica individual según la norma EN 50160:2010 (UNE-EN 50160, 2011), ver Figura 37.

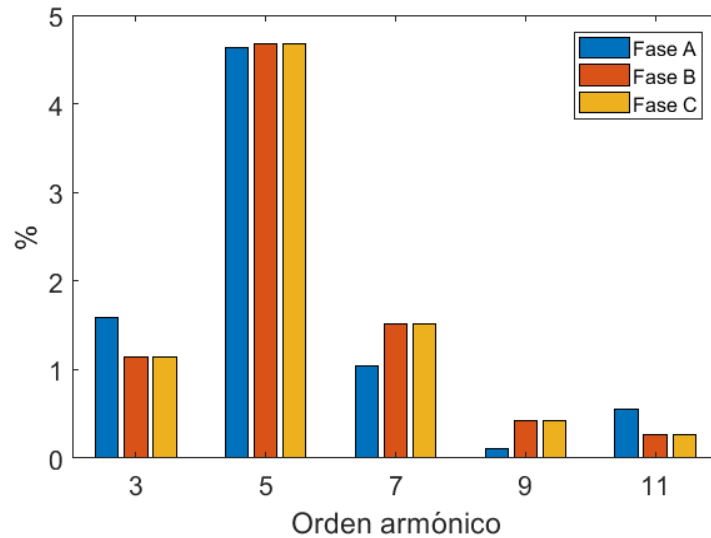


Figura 38. IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido del RVC registrado de mas

Para el tablero de distribución normal 2 se muestra el evento registrado de más como se observa en la Tabla 9, donde el 5^{to} orden armónico sobrepasa el límite del 3%, establecido para la distorsión armónica individual según la norma NTC 5001:2008 (ICONTEC, 2008), ver Figura 38.

- **Cambio de forma de onda.**

Asimismo, en la Tabla 10 se muestran los máximos valores correspondientes a la distorsión armónica individual para los órdenes armónicos impares en los cambios de forma de onda.

Tabla 10.

Máximo IHDv obtenido en los cambios de forma de onda

CAMBIO DE FORMA DE ONDA - IHDv [%]						
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 1	Fase A	1,0497	5,1874	0,9617	0,3750	0,1123
	Fase B	4,4644	4,7457	1,5719	0,3597	0,1691
	Fase C	3,8065	5,1951	1,0901	0,1820	0,2665
	Fase A	0,1103	3,1085	1,3119	0,0964	0,0706

		CAMBIO DE FORMA DE ONDA - IHDv [%]				
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 2	Fase B	0,1496	2,9972	1,1941	0,0253	0,0390
	Fase C	0,2287	2,9830	1,2130	0,0931	0,0160

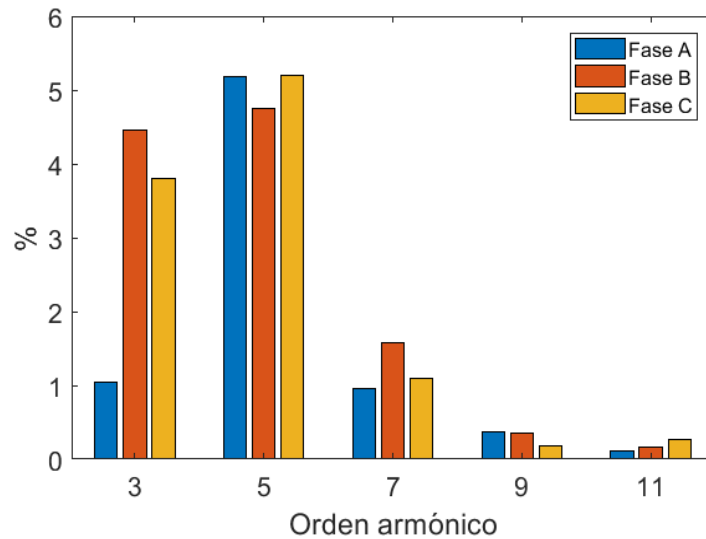


Figura 39. IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido de un *cambio* de forma de onda.

A partir de los resultados obtenidos y como se observa en la Figura 39, el índice IHDv de los diferentes órdenes armónicos para el tablero de distribución normal 1, cumple los límites establecidos por la norma EN50160:2010 (UNE-EN 50160, 2011), los valores de IHDv respectivamente son 5%, 6%, 5%, 1,5%, 3,5%. Además, se observa un comportamiento aproximado al RVC que presentó el máximo índice de IHDv para los dos tableros de distribución.

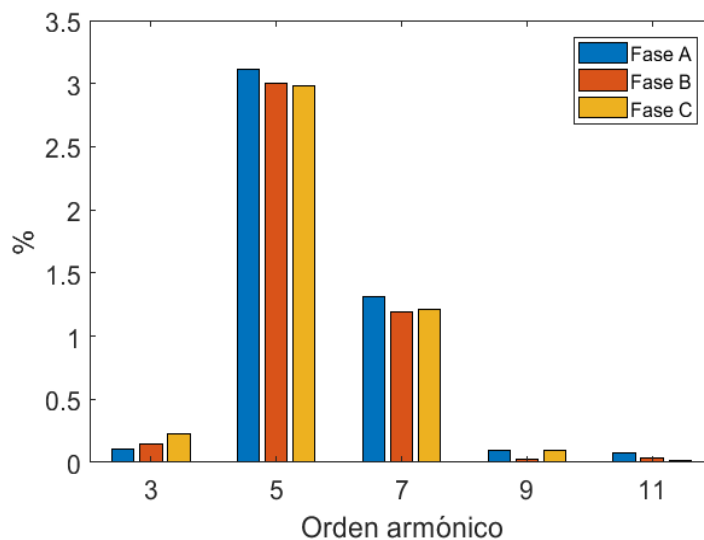


Figura 40. IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido de un cambio de forma de onda.

Para el tablero de distribución normal 2 se evidencia en el 5^{to} orden armónico los máximos valores registrados, como se observa en la Figura 40; el cual se ajusta a los requerimientos establecidos por norma.

- **Baja frecuencia.**

En la Tabla 11 se muestran los máximos valores correspondientes a la distorsión armónica individual para los órdenes armónicos impares en un evento de baja frecuencia ocurrido el 22 de noviembre a las 17:20.

Tabla 11.

Máximo IHDv obtenido para una baja frecuencia.

		BAJA FRECUENCIA - IHDv [%]				
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 1	Fase A	0,2111	0,6624	0,1062	0,0727	0,0930
	Fase B	0,5559	0,6464	0,0926	0,0509	0,0955
	Fase C	0,2573	0,6254	0,1199	0,0795	0,0737

BAJA FRECUENCIA - IHDv [%]

		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 2	Fase A	0,2070	0,6292	0,1116	0,0729	0,0926
	Fase B	0,0602	0,6126	0,0963	0,0554	0,0913
	Fase C	0,2515	0,5925	0,1261	0,0860	0,0674

En la Figura 41, se puede observar que los índices de IHDv se encuentran en por debajo del 3%, sin importar que se haya presentado un evento de baja frecuencia en la red, además los resultados durante el evento son similares para los tableros de distribución como se observa en la Tabla 11.

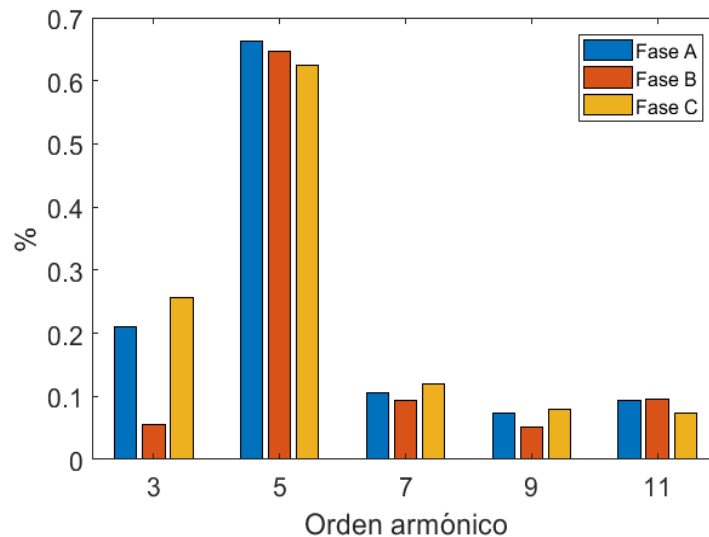


Figura 41. IHDv para el tablero de distribución normal 1 obtenido de la baja frecuencia.

- *Capturas instantáneas.*

Durante todo el periodo de monitorización los analizadores de red realizaron la captura de 55 instantáneas de cada uno de los puntos de medición, para el análisis del índice de IHDv se

escogieron 5 capturas donde la distorsión presentará los máximos valores de la semana, ver *Apéndice C*.

En la Tabla 12 se pueden observar los máximos valores de los tableros de distribución.

Tabla 12.

Máximo IHDv obtenido para una instantánea

		INSTANTÁNEA - IHDv [%]				
		3	5	7	9	11
Tablero de distribución normal 1	Fase A	0,0597	3,9563	1,6433	0,0778	0,0939
	Fase B	0,0189	3,9839	1,5306	0,0550	0,0966
	Fase C	0,1568	4,1274	1,5405	0,0504	0,0790
Tablero de distribución normal 2	Fase A	0,0423	4,0391	1,6290	0,0874	0,1274
	Fase B	0,0484	4,0986	1,5259	0,0542	0,1185
	Fase C	0,1729	4,1979	1,5092	0,0461	0,0992

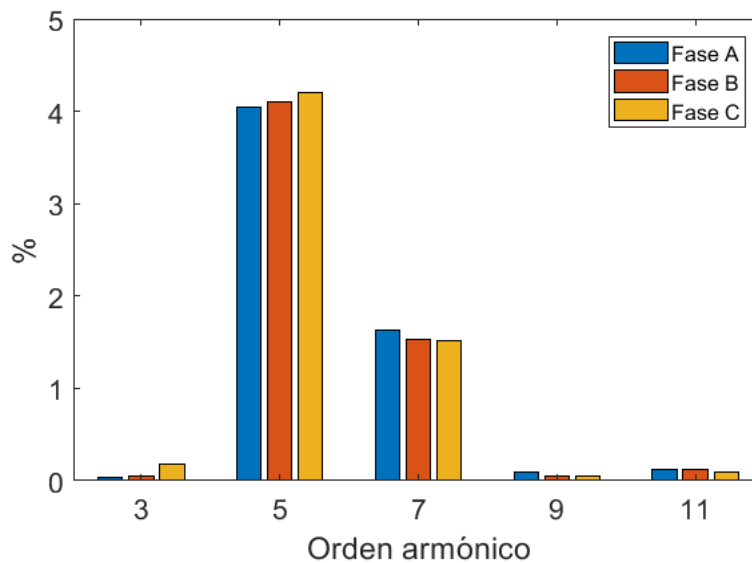


Figura 42. IHDv para el tablero de distribución normal 2 obtenido de una instantánea.

Como se observa en la Figura 42, las capturas instantáneas obtenidas en horarios laborales no superan el rango establecido, descartando así algún tipo de afectación por IHDv cuando se realizan actividades normales en la instalación.

Para todos los eventos e instantáneas los máximos valores del índice IHDv se presentaron el domingo 24 de noviembre, día en el cual el Laboratorio no se encontraba en servicio por ser fin de semana. De esta forma se concluye que estos fenómenos ocurrieron por maniobras externas a la instalación.

En general el índice IHDv se produce por la conexión de cargas no lineales a la red, tales como los equipos de cómputo presentes en el Laboratorio, luminarias tipo LED o las cargas trifásicas. Pero al encontrarse dentro de los rangos admisibles se descarta cualquier afectación por IHDv al Laboratorio AT205.

5.1.2. Análisis de el desbalance de tensión. Como se observa en la Figura 43, el valor máximo para el desbalance de tensión en el tablero de distribución normal 1 ocurrió el viernes 22 de noviembre a las 3:30 con una magnitud de 2,9633%, correspondiente a un evento RVC y un cambio de forma de onda. De manera simultánea el analizador conectado en el tablero de distribución normal 2 registró a las 3:31 los mismos eventos, con un desbalance de tensión fue de 2,9596%.

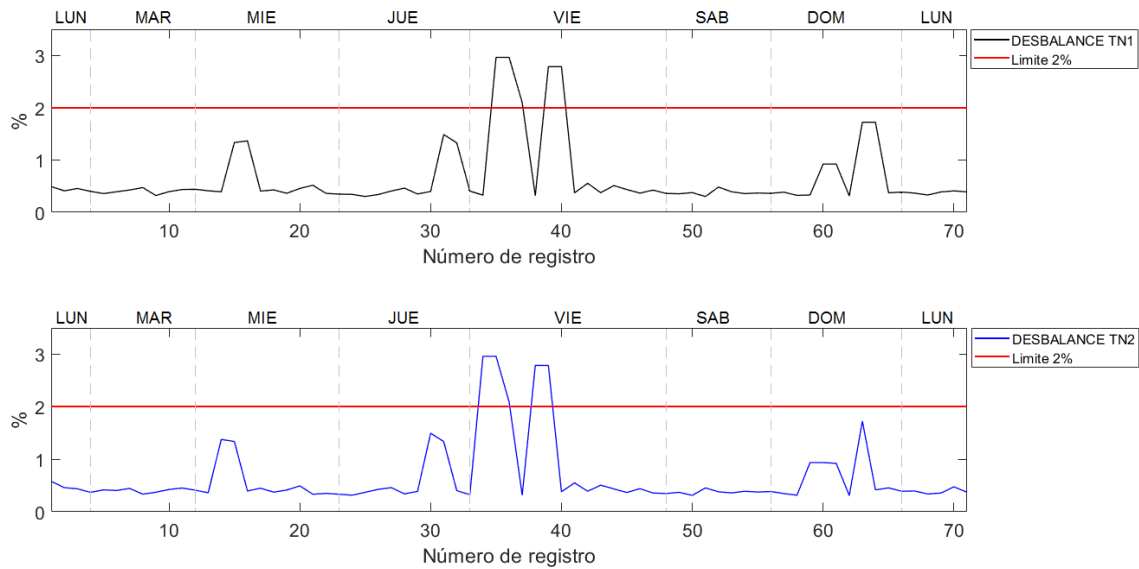


Figura 43. Desbalance de tensión en los tableros de distribución normal 1 y normal 2

El desbalance de tensión obtenido para los tableros de distribución normal 1 y 2 sobrepasan el 2%, límite establecido por la norma NTC 5001:2008 (ICONTEC, 2008). Este fenómeno se genera habitualmente, cuando se incorporan las cargas más representativas a la instalación eléctrica, ocasionando que las fases tengan diferentes niveles de carga. En general en el seguimiento realizado, el desbalance de tensión dio cumplimiento a lo establecido por norma en condiciones normales de operación, los picos presentados no están asociados a maniobras realizadas en la instalación, puesto no coincide con el horario normal de trabajo.

5.1.3. Análisis de la distorsión armónica total. La Figura 44, presenta los resultados obtenidos para el índice THDv en el tablero de distribución normal 1, donde se observa un comportamiento casi uniforme para las 3 fases durante todo el periodo de medición. Se destaca un evento de baja frecuencia ocurrido el viernes 22 de noviembre a las 17:24 con una magnitud para la fase A de 0,7132%, la fase B de 0,6643% y 0,6954% para la fase C.

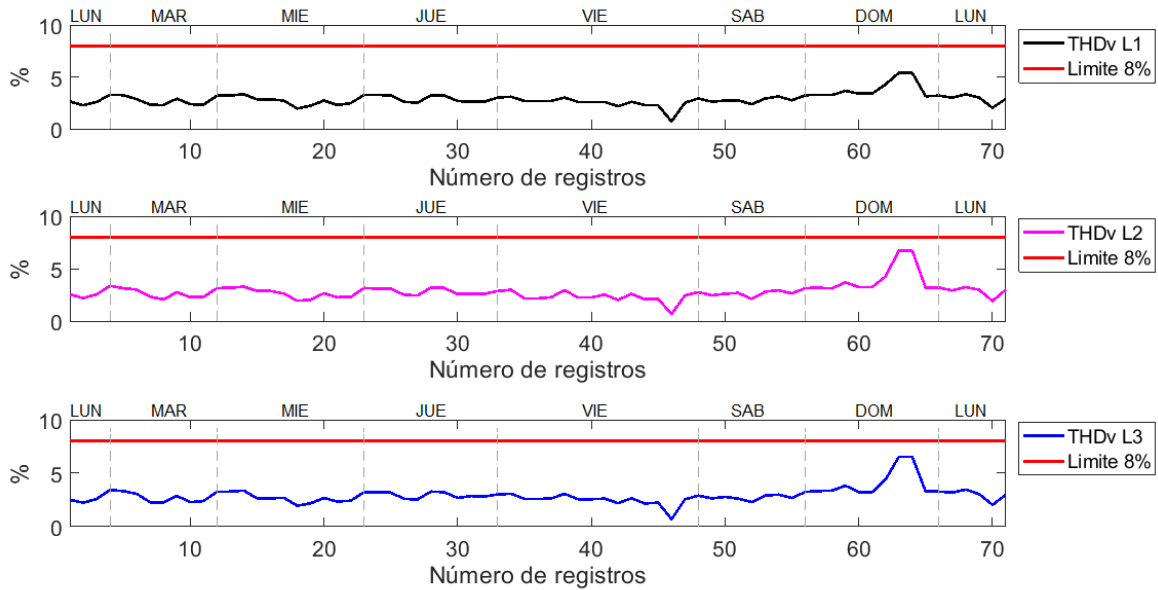


Figura 44. THDv para el tablero de distribución normal 1

Así como se obtuvo en el índice IHDv los eventos registrados el domingo 24 de noviembre en las horas de la mañana, arrojaron como resultado los máximos índices de THDv en cada una de las fases como se observa en la Figura 44. Los valores obtenidos por fase fueron fase A: 5,393%, fase B: 6,7143%, fase C: 6,5399%, resultados que se ajustan al rango permitido (8%) por la norma EN50160:2010 (UNE–EN 50160, 2011).

En la Figura 45, se muestra el índice THDv para el tablero de distribución normal 2, donde se observa un comportamiento diferente para la fase A, con un valor máximo de 5,3926%, con respecto a las fases B: 6,7140% y fase C: 6,5420%; asociados a un evento RVC.

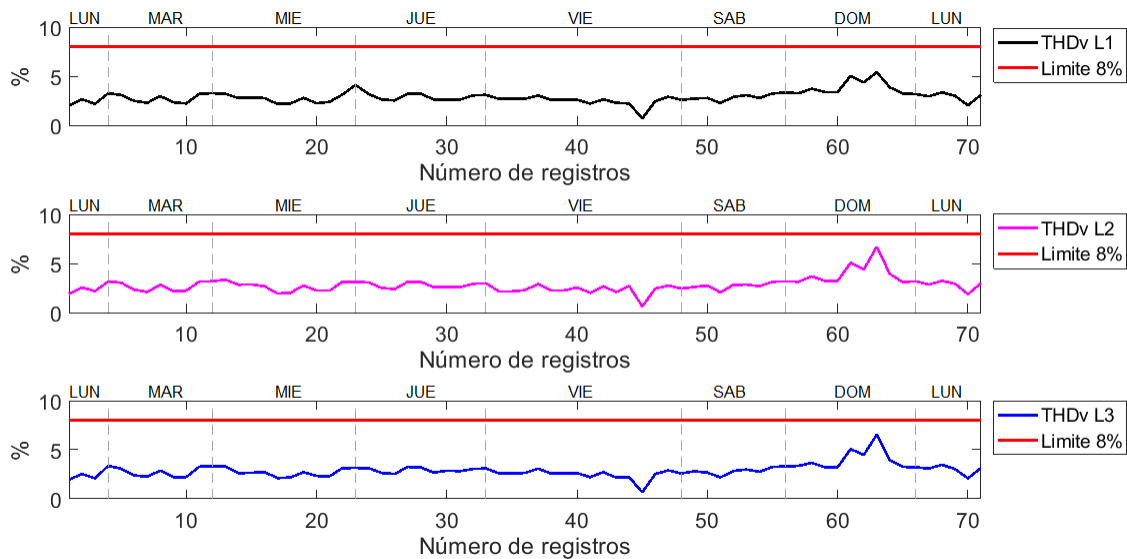


Figura 45. THDv para el tablero de distribución normal 2

Tal como se obtuvo para el tablero de distribución normal 1, el evento registrado el domingo 24 de noviembre produjo el máximo THDv para el tablero de distribución normal 2, resultado que no es concluyente en el estudio por estar fuera del horario laboral de la instalación y por presentarse un fin de semana. En general la instalación bajo condiciones normales de operación no presentó ninguna afectación, indicando que este fenómeno no se produce en la operación normal de los equipos ni por las actividades desarrolladas en el Laboratorio.

5.1.4. Análisis de la forma de onda de tensión. Para realizar la revisión de las afectaciones generadas por los eventos, durante el ciclo de observación en la forma de onda de tensión, se analizaron tres casos de medición: antes, durante y después de ocurrir un evento. Se tomó como referencia el punto de medición del tablero de distribución normal 1 y el evento que genera mayor impacto en la señal de tensión durante el periodo de medición.

El evento seleccionado fue el RVC presentado el domingo 24 de noviembre de manera simultánea con un cambio de forma de onda a las 8:29, registrando una magnitud de 9,61% y duración de 0,092 s.

- ***Onda de tensión antes del evento.***

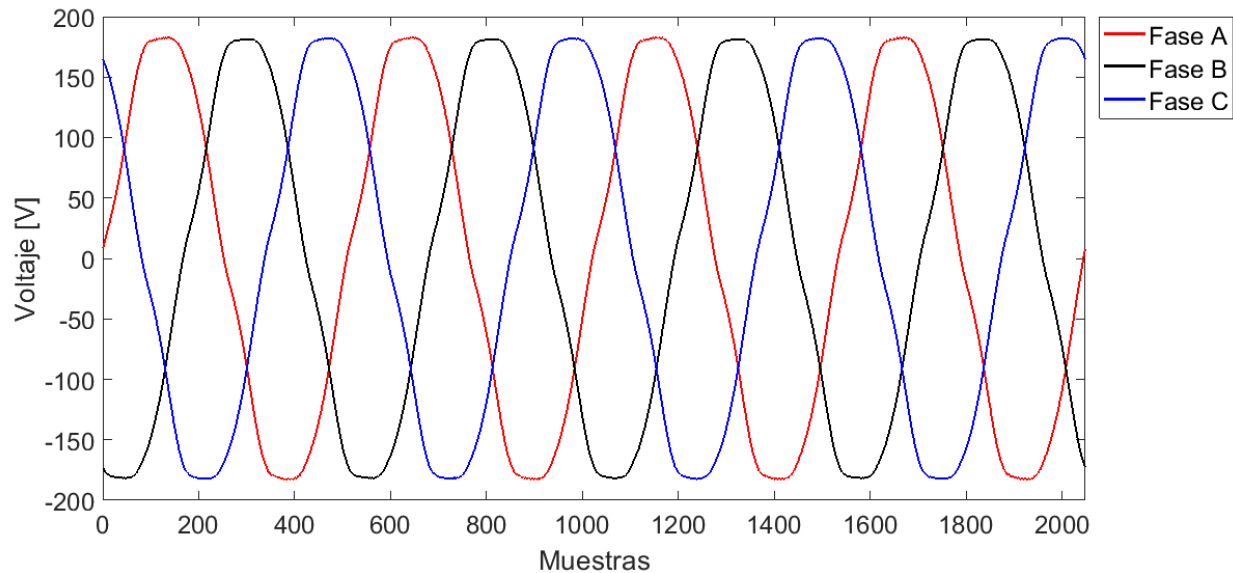


Figura 46. Onda de tensión registrada antes del RVC

En la Figura 46, se observa la forma de onda antes de presentarse el evento, donde se evidencia un comportamiento senoidal para las tres fases de tensión. Además, los valores eficaces para cada una de las fases se ajusta adecuadamente a las condiciones normales de operación y el índice de THD_v se encuentran en el rango admisibles por el estándar como se observa en la Figura 47.

Así mismo en el espectro armónico de la señal de tensión, solamente se observa presencia del 5^{to} y 7^{to} orden armónico con magnitudes menores al 5% límite recomendado por el estándar IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992).

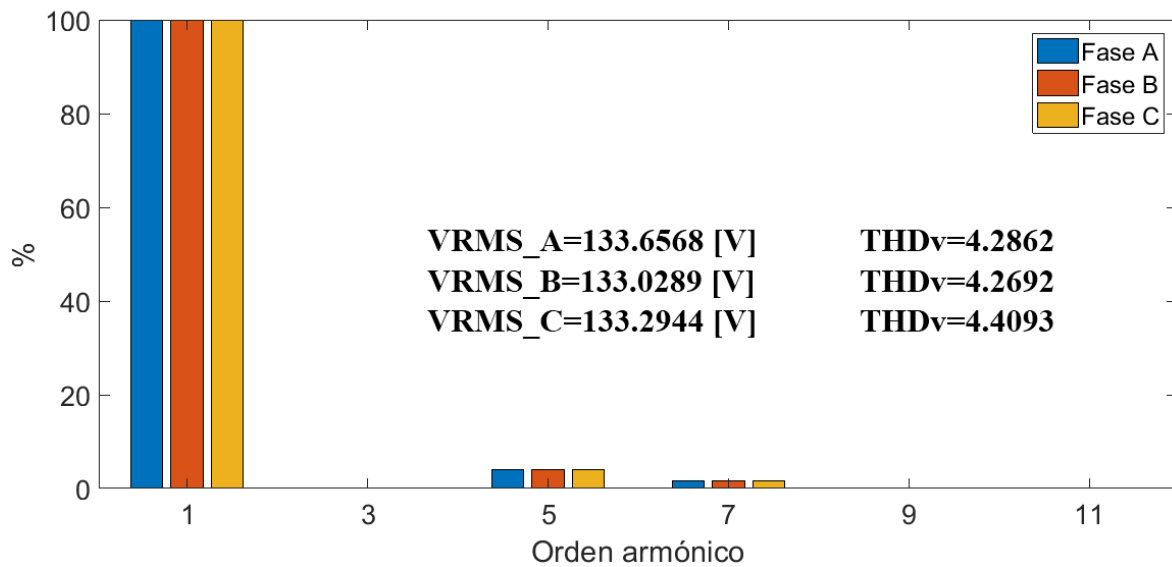


Figura 47. Espectro armónico de la onda de tensión registrada antes el RVC

- ***Onda de tensión durante el evento.***

En la Figura 48, se observa el comportamiento de la onda de tensión, cuando se presenta el RVC y un cambio de forma de onda simultáneamente. Para las fases B y C se evidencia el impacto producido por la distorsión armónica generada debido a los eventos, como se analizó en los índices de IHDv y THDv para cada uno de los tableros normales de distribución anteriormente. También se observan distorsiones de la señal de tensión para las tres fases, las cuales hacen que disminuya o aumente el valor eficaz de tensión.

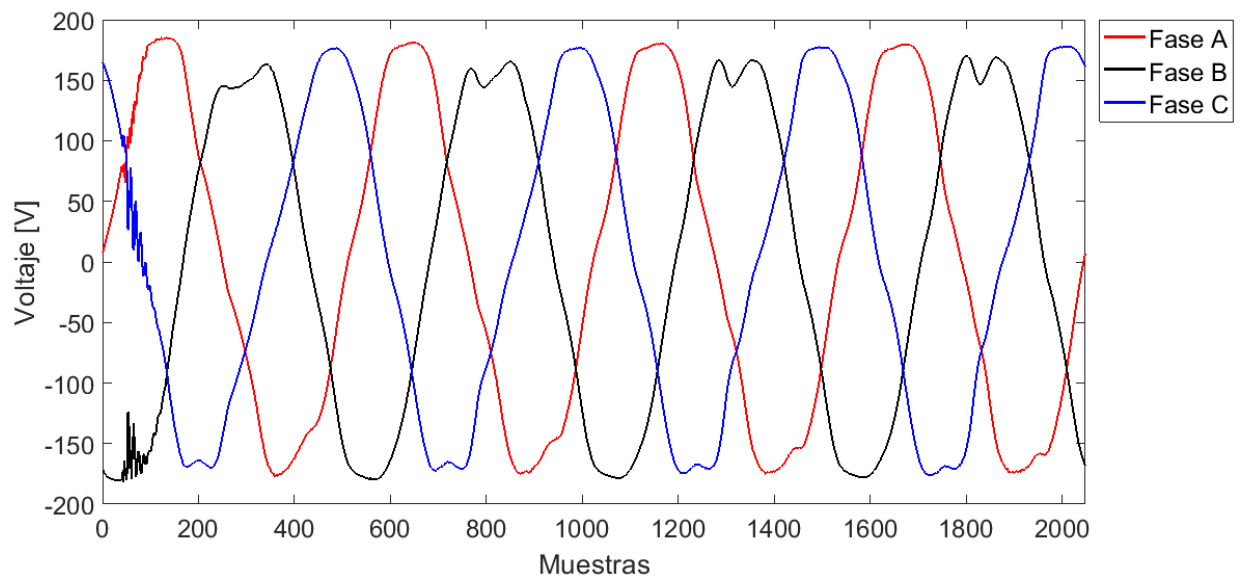


Figura 48. Onda de tensión registrada durante el RVC

Durante los eventos, para el 3^{er} orden armónico se obtuvo una magnitud de 5,7474% y para el 5^o orden armónico un valor de 6,65%, no dando cumplimiento al límite de 5% recomendado según el estándar IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992). Sin embargo, estos resultados no afectan la operación de la instalación por presentarse en un día no laboral.

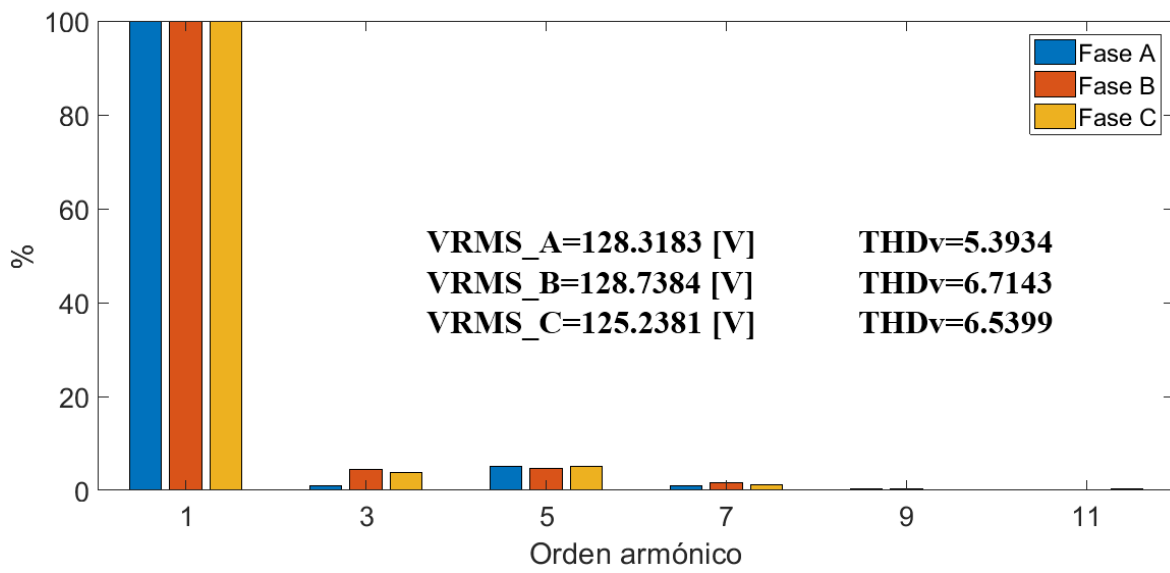


Figura 49. Espectro armónico de la onda de tensión registrada durante el RVC

- *Onda de tensión después del evento.*

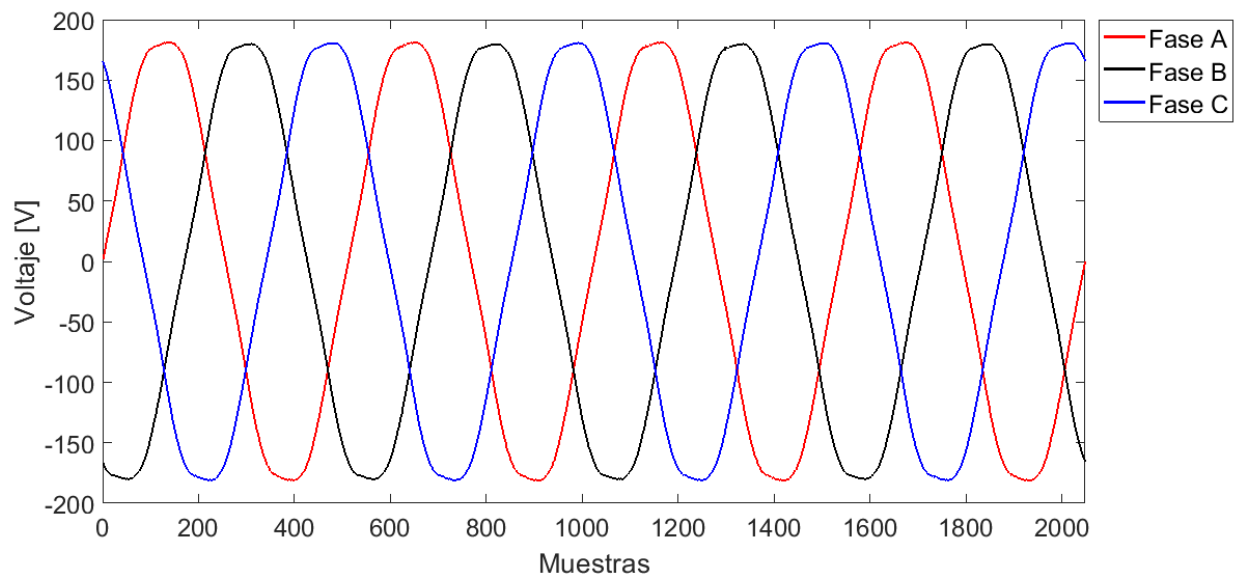


Figura 50. Onda de tensión registrada después del RVC

Después de presentarse el evento se generó una interrupción en el servicio de energía, por lo que el equipo volvió a realizar mediciones hasta las 21:31 tomando una instantánea en ese momento. En la Figura 50 se observa el comportamiento típico de la onda de tensión para las tres fases. La interrupción se asocia a maniobras realizadas por el operador de red o fallas en el sistema de distribución.

Asimismo, se observa en la Figura 51 la componente del 5^{to} orden armónico para las tres fases de tensión, dentro del rango admisible por el estándar IEEE 519:1992 (IEEE Std 519TM, 1992).

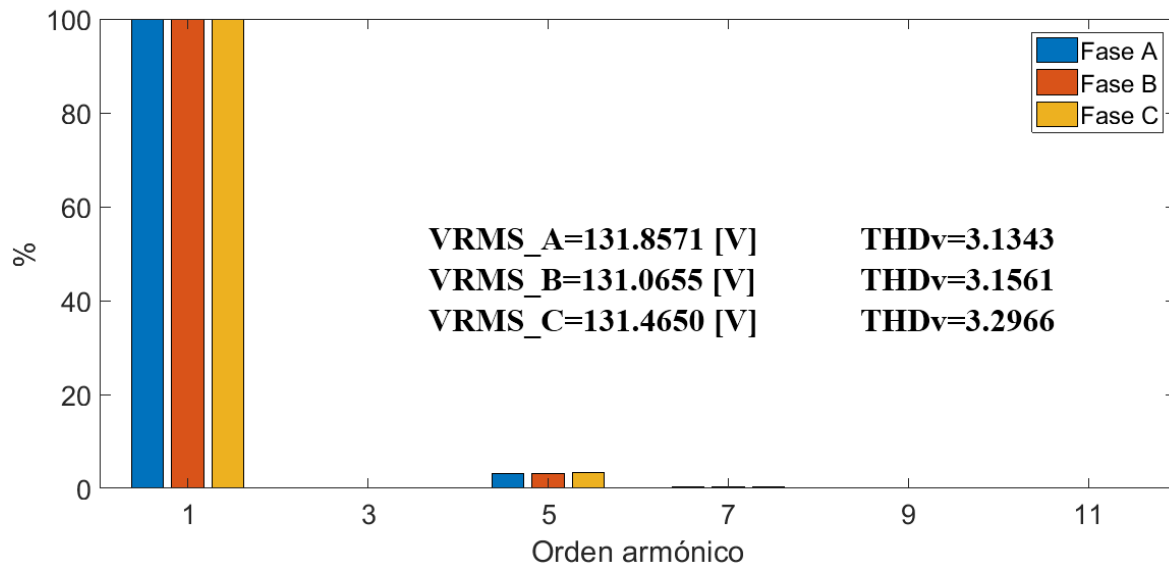


Figura 51. Espectro armónico de la onda de tensión registrada después el RVC

Para las condiciones normales de operación durante el periodo de seguimiento no se observó afectación a la forma de onda y los eventos que generaron el incumplimiento de ciertos límites, se asocian a maniobras realizadas en la red de la universidad o por el operador de red.

5.2. Mediciones realizadas con el equipo de medida UT267B

Al realizar el tratamiento de las muestras de corriente proporcionadas por el PQube 3, se presentaron errores en los resultados obtenidos, puesto que, durante el periodo de seguimiento, la corriente registrada por los analizadores de redes fue baja en consideración con la relación de transformación de las bobinas utilizadas, generando mediciones poco confiables.

Una de las razones por las que se usaron las bobinas de Rogowski con relación de transformación [1:1000], fue la facilidad con la que se adecuaron a la conexión del tablero, debido a que el diámetro de los CT de núcleo partido era menor al del conductor de la acometida de los tableros de distribución, imposibilitando el uso de estos equipos con la relación adecuada para los valores de corriente demandados por la instalación.

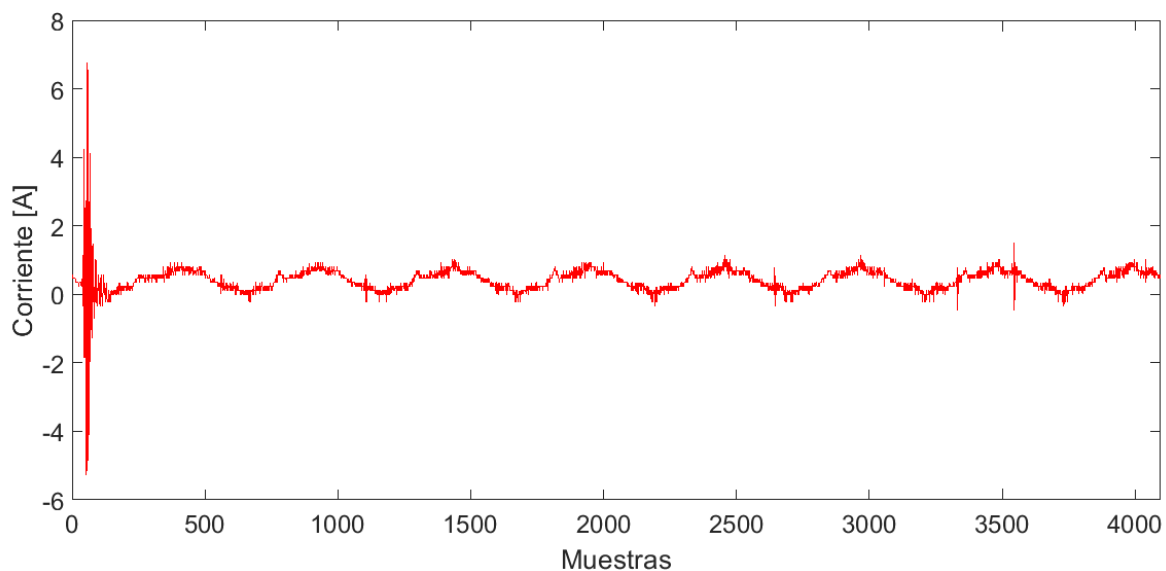


Figura 52. Onda de corriente registrada por el PQube 3

Como se observa en la Figura 52, el espectro de corriente para la fase A durante un evento RVC tiene un comportamiento anormal para ser una señal de corriente, lo cual indica saturación en la medida y un registro de ruido eléctrico en su forma de onda.

Por esta razón fue necesario replantear la metodología para la medición de corriente y desarrollar un estudio de carga para la instalación, además de seleccionar un equipo diferente el cual permitiera realizar mediciones instantáneas de corriente para sistemas trifásicos. Las mediciones se realizaron con el medidor de potencia trifásico UT267B, para cada uno de los circuitos en condiciones de operación normal, obteniendo los resultados presentados en las tablas 13 y 14.

Tabla 13.

Valores de corriente obtenidos del tablero de distribución normal 1

Mesón	Circuitos	Cargas	Corrientes
1	1- 3 - 5 3F#12 1N#12 1T#14	Fuente Chroma	I1= 1,17 A
			I2= 1,25 A
			I3= 1,21 A
1	2 - 4 - 6 3F#8 1N#8 1T#10	1 Computador, 3 Bombillas LED	I1= 562 mA
			I2= 37,7 mA
			I3= 0,2 mA
2	7 - 9 - 11 3F#12 1N#12 1T#14	Fuente Chroma	I1= 1,17 A
			I2= 1,25 A
			I3= 1,21 A
3	14 - 16 - 18 3F#8 1N#8 1T#10	1 Lámpara Lucas Nülle, 1 Plafón, 1 Bombilla incandescente, 2 Bombilla LED	I1= 215 mA
			I2= 0,1 mA
			I3= 0,7 mA
4		Fuente Chroma	Apagada
			I1= 535 mA

Mesón	Circuitos	Cargas	Corrientes
	19 – 21 – 23 3F#12 1N#12 1T#14		I2= 538 mA I3= 543 mA Encendida I1= 1,17 A I2= 1,26 A I3= 1,21 A
2	8 – 10 – 12 3F#8 1N#8 1T#10	2 Plafones, 3 Bombillas LED	I1= 614 mA I2= 0 mA I3= 0,1 mA
3	13 – 15 – 17 3F#12 1N#12 1T#14	Fuente Chroma	I1= 1,17 A I2= 1,25 A I3= 1,21 A

En la Tabla 13, se describen los resultados obtenidos para la medición asociada a los circuitos del tablero de distribución normal 1; en donde se conectaron a los mesones de trabajo equipos de cómputo, bombillas tipo LED e incandescente. Estas cargas se conectaron a los circuitos pares de la red, debido a que están diseñados para este tipo de cargas. Por otra parte, se conectó la fuente Chroma en los circuitos impares de la instalación, pues fueron definidos únicamente para cargas especiales.

Tabla 14.

Valores de corriente obtenidos del tablero de distribución normal 2

Circuitos	Cargas	Corrientes
31	18 Luminarias LED	I1= 5,66 A
29		I1= 3,73 A

Circuitos	Cargas	Corrientes
	Transformador EDIBON, Lámpara módulo EDIBON, Cargador de baterías	
22	Lámpara modulo Lucas Nülle	I1= 3,54 A
24	1 Plafón	I1= 505 mA
8 – 10 – 12 3F#10 1T#12	Modulo Lucas Nülle (Inyectando a máxima irradiancia)	I1= 6,75 A I2= 6,67 A I3= 13 mA
13 – 15 – 17 3F#10 1N#10 1T#12	Modulo Lucas Nülle (Inyectando a máxima irradiancia)	I1= 3,33 mA I2= 0 mA I3= 26,4 mA
8 – 10 – 12 3F#10 1T#12	Modulo Lucas Nülle (Emulando variaciones de irradiancia)	I1= 1,20 A I2= 1,20 A I3= 12 mA
13 – 15 – 17 3F#10 1N#10 1T#12	Modulo Lucas Nülle (Emulando variaciones de irradiancia)	I1= 2,59 A I2= 0 mA I3= 24,4 mA

Por disposición de diseño, cada mesón de trabajo cuenta con dos salidas trifásicas para la conexión de los emuladores de energía solar y eólica aislados e interconectados según sea la necesidad de trabajo.

Por lo tanto, solamente se realizaron mediciones en los circuitos 8-10-12 y 13-15-17 para dos condiciones de operación del emulador de energía solar, dado que el emulador eólico no se encuentra en funcionamiento por fallas técnicas.

La conexión del emulador de sistemas fotovoltaicos se realizó en los circuitos 8 – 10 – 12 el cual fue destinado para energizar la carga del equipo y los circuitos 13 – 15 – 17 por donde el módulo inyecta corriente a la red del Laboratorio. Cuando este emulador se configuró de tal forma

para que inyectará energía a la red con máxima irradiación se presentó el mayor flujo de corriente para la instalación, alcanzando un valor eficaz de 6,75 A.

De los resultados obtenidos por las mediciones para cada circuito, se realizó la verificación de corriente máxima soportada por los conductores seleccionados según lo establece la sección 310, Tabla 310-16 para conductores de fase y la Tabla 250-95 para los conductores del sistema de puesta a tierra, según la de la NTC 2050 (ICONTEC, 1998). Obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15.

Conductores utilizados en la instalación

	Conductor fase y neutro		Máxima corriente registrada por fase	Conductor tierra		Dictamen
	AWG	IMAX		AWG	IMAX	
Tablero de distribución normal 1	8	60 A	624 mA	10	30 A	Cumple
	12	30 A	1.26 A	14	15 A	Cumple
Tablero de distribución normal 2	10	40 A	6.75 A	12	20 A	Cumple

En general, el dimensionamiento de la instalación es correcto debido a que las corrientes registradas por circuito en operación están en los rangos soportados por los conductores seleccionados. Se descarta cualquier tipo de afectación por corriente, puesto que aun presentándose un caso extremo de operación donde las cargas más representativas coincidan, la corriente máxima sería soportada por la instalación. Además, las protecciones tanto para los circuitos como para cada uno de los tableros ofrecen un amplio rango de protección.

5.3. Mediciones realizadas con la cámara termográfica Fluke TiS50

Durante el seguimiento implementado con el analizador de redes PQube 3 y el equipo de medida UT267B, se observó el nivel de temperatura de la instalación para los diferentes casos de operación planteados en el Capítulo 4. Durante la monitorización con la cámara termográfica se realizó la revisión tanto para el tablero general, tableros de distribución normal 1 y normal 2, bancos de trabajo y canalizaciones. Obteniendo los resultados de temperatura mostrados en la Figura 53.

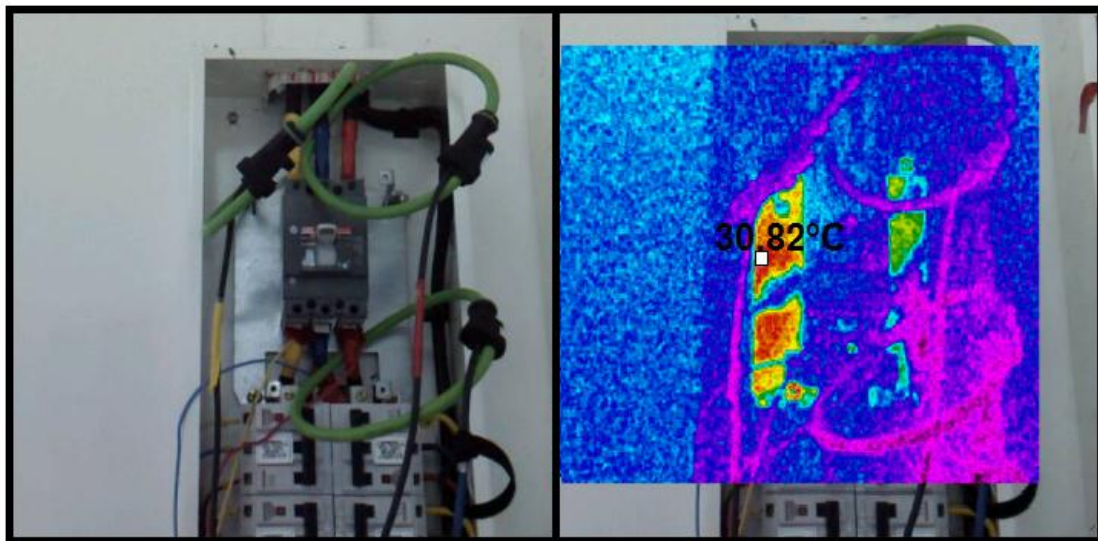


Figura 53. Medición en el tablero normal 1 con la cámara termográfica.

Para el tablero de distribución normal 1 se registró una temperatura máxima de 30,82 °C en operación normal, pero esta fue registrada en el barraje del tablero. Los conductores presentan temperaturas normales puesto que el equipo no registro ningún tipo de sobrecalentamiento, garantizando la operación normal de la instalación.

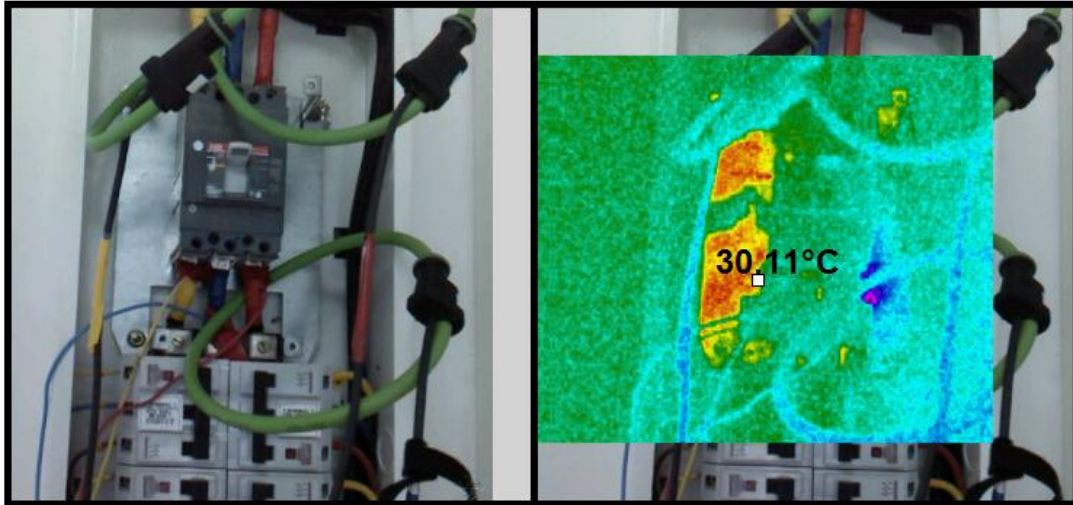


Figura 54. Medición en el tablero normal 2 con la cámara termográfica.

Como se observa en la Figura 54 la temperatura máxima registrada para el tablero de distribución normal 2 fue 30,11 °C, valor correspondiente al barraje del tablero. Para los conductores no se observa ningún punto caliente, garantizando la operación de la instalación sin ningún tipo de afectación.

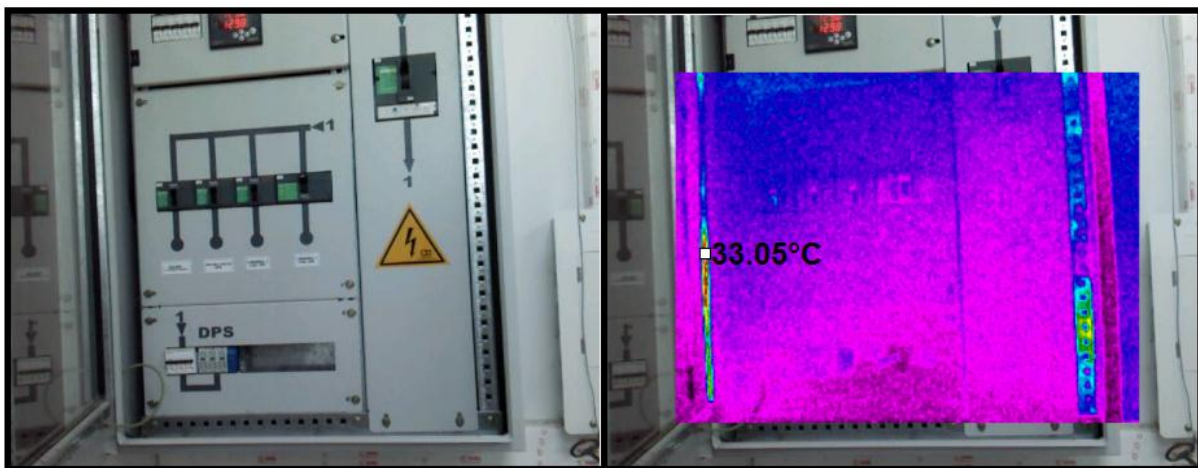


Figura 55. Medición en el tablero general con la cámara termográfica.

Para el tablero general se registró una temperatura de 33,05°C como se observa en la Figura 55, indicando condiciones óptimas para la operación.

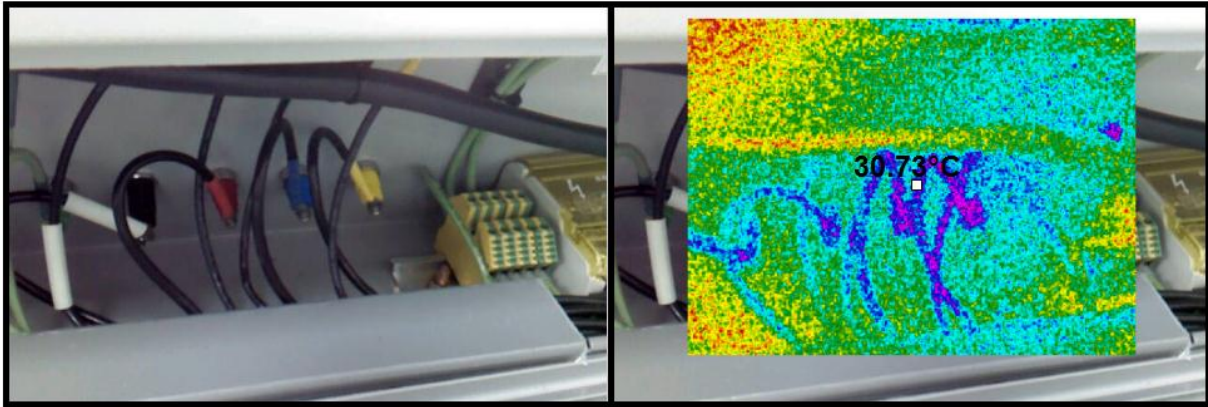


Figura 56. Medición en el banco de trabajo 2 con la cámara termográfica.

Al realizar las mediciones en los bancos de trabajo, no se evidenciaron aumentos de temperatura tanto para conductores como para las diferentes conexiones. En la Figura 56 se observa la máxima temperatura registrada de 30,73°C para un conductor de fase, dando cumplimiento a lo dispuesto por la NTC 2050 (ICONTEC, 1998) Tabla 310-16 donde se establece una temperatura de operación de 60°C.

En general, a partir del seguimiento realizado en la instalación no se encontraron puntos calientes, que puedan afectar la conductividad de los conductores y operación normal de los equipos, descartando así algún tipo de afectación a la calidad de la energía eléctrica del Laboratorio AT205 por sobrecalentamiento o puntos calientes.

6. Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones mas relevantes de la realización del trabajo de grado.

- La metodología planteada para la inspección y la monitorización de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica, permitió cumplir con los objetivos propuestos y servirá de guía para realizar estudios posteriores, en los cuales se quiera diagnosticar el estado de la calidad de la energía eléctrica en una red en baja tensión.
- A partir de las monitorizaciones realizadas con los analizadores de red, se observó la presencia de eventos de corta duración que afectan la calidad de la energía eléctrica, los cuales no son asociados al funcionamiento normal del Laboratorio debido a la hora y el día en que se presentaron. Se cree que se produjeron por maniobras externas en la red de la universidad o fallas en la operación normal por parte del operador de red.
- Al realizar la inspección del sistema de puesta a tierra del edificio de Alta Tensión se pudo observar que la conexión de los equipos no es la adecuada, puesto que no cumple con lo establecido en el RETIE (RETIE , 2013) y el libro esmeralda 1100:2005 (IEEE Standard 1100, 2005), en donde se establece la disposición para equipos sensibles tal como se especificó en el Capítulo 2.
- Mediante el estudio de las normas utilizadas en el desarrollo de este trabajo de grado, se pudo concluir que la norma colombiana NTC 5001:2008 (ICONTEC, 2008) generaliza los límites para el índice de distorsión armónica individual con un valor del 3%, en

comparación con la norma europea EN50160:2010 (UNE-EN 50160, 2011) en donde se establecen límites más específicos para cada una de las componentes armónicas que se deseen estudiar, siendo más estricto el análisis y cumplimiento de la norma europea establecida por la AENOR, en comparación con la normatividad colombiana.

- En el desarrollo de la inspección visual del Laboratorio y la captura de datos para el análisis de corriente, se observó que el dimensionamiento de la instalación con respecto a conductores, protecciones, interruptores y DPS fue sobredimensionada, descartando así afectaciones por corriente y permitiendo que el Laboratorio tenga un amplio rango de protección ante alguna afectación, y permita implementar nuevas cargas sin presentar problemas de sobrecarga.
- Durante el periodo de monitorización se usó la cámara termográfica Fluke TiS50, donde se pudo observar que no se presentaron puntos calientes en los conductores de la instalación, los cuales afectarían la conductividad del Laboratorio durante la conexión de las cargas más representativas.
- Con el desarrollo de este trabajo de grado se afianzaron conocimientos relacionados a la calidad de la energía eléctrica, permitiendo realizar el estudio e interpretación de las diferentes normas y estándares que regulan a nivel nacional e internacional los parámetros de calidad de la energía eléctrica. Además de conocer y utilizar los equipos con los que cuenta la Universidad Industrial De Santander para llevar a cabo una monitorización.

7. Recomendaciones

A continuación, se proponen algunas recomendaciones para la continuidad de este tipo de trabajos de grado.

- Gracias al desarrollo y la aplicación de la metodología utilizada para la monitorización de calidad de la energía eléctrica, se evidenció la necesidad de disponer de planos eléctricos con más detalles, puesto que los existentes no proporcionan la información detallada como la disposición de los circuitos, unidades constructivas, cableado y distribución de la instalación. Por lo que se recomienda realizar una actualización a los planos, de tal manera que permita conocer en detalle la instalación, con el fin de facilitar el mantenimiento a la red o mediciones según sea la necesidad requerida.
- En el desarrollo de la inspección visual de la instalación del Laboratorio se pudo observar que las canaletas presentan suciedad producida por animales presentes en el techo del Laboratorio, lo cual puede afectar su vida útil. Por lo que se recomienda realizar actividades de control animal y limpieza en el Laboratorio con más frecuencia.
- Para el sistema de puesta a tierra se recomienda seguir las indicaciones establecidas por el estándar IEEE 1100:2005 (IEEE Standard 1100, 2005), en donde se propone realizar la implementación de un sistema de puesta a tierra independiente para el Laboratorio AT205; debido a que cuenta con cargas electrónicas sensibles que pueden ser afectadas por fenómenos externos debido a la conexión en común que tiene con los demás Laboratorios del edificio.

Referencias bibliográficas

- Baggini, A. (2008). *Handbook of Power Quality. Handbook of Power Quality*. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/9780470754245>
- Comisión De Regulación De Energía y Gas (CREG). (1997). *Control De Factor De Potencia En El Servicio De Energía Eléctrica*.
- Comisión De Regulación De Energía y gas. (2012). *CREG 065 Proyecto de resolución*.
- ICONTEC. (1998). *NTC 2050, Código Eléctrico Colombiano*. Bogota: El Instituto.
- ICONTEC. (2001). *Norma Técnica Ntc colombiana 2206 Equipo De Conexión Y Puesta A Tierra E: Grounding And Bonding Equipment Correspondencia*. Bogotá: El Instituto.
- ICONTEC. (2008). *NTC 5001 Calidad De La Potencia Eléctrica (CPE). Límites y Metodología de Evaluación En Punto De Conexión En Común*”, No 571. Bogotá: El Instituto.
- ICONTEC. (2013). *NTC 5000 Calidad De La Potencia Eléctrica (CPE). Definiciones y Términos Fundamentales*”, No 571,. Bogotá: El Instituto.
- IEEE Standard 1100. (2005). *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*.
- IEEE Standard 142 . (2007). *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*.
- IEEE Std 1159. (2019). *IEEE Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*

- IEEE Std 519TM. (1992). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* IEEE Power and Energy Society.
- IEEE. 1283. (2004). *Guide for Determining the effects of high-temperature operation on conductors, connectors and accessories.*
- International Electrotechnical Commission. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Water* (Vol. 2015).
- Ministerio De Minas y Energía. (2009). *Anexo General Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado público. Retilap.*
- RETIE . (2013). *Anexo General Del RETIE Resolución 9 0708 Con Sus Ajustes Anexo General Reglamento Técnico De Instalaciones Eléctricas (RETIE).*
- Sistemas Y Equipos De Energía Eléctrica Ansi C84.1. (s.f.). *Rangos De Voltaje | Calidad de energía en sistemas eléctricos.*
- Téllez Ramírez, E. (2019). *Calidad de Energía – La Nota Energética’.*
- Téllez, E. (2007). *Programa de Ahorro de Energía: Calidad de la Energía. Reporte Técnico, Watergy. México.*
- The Association of Electrical and Medical Imaging Equipment Manufacturers Grounding electrodes.* (s.f.).
- UNE–EN 50160. (2011). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución, 2011/A1:2015.*