

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Electricidad

**ESTUDIO DEL ESTADO DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE LOS
ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN EL RETORNO**

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Autor:

Kevin Alexander Cisneros Burbano

Tutor:

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc.

Ibarra-Ecuador

2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Identificación de la obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|-----------------------------|---|------------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 040170128-9 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Cisneros Burbano Kevin Alexander | | |
| DIRECCIÓN: | Félix Freire del Castillo y Vicente Narváez Navarrete | | |
| EMAIL: | kacisnerosb@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | S/N | TELÉFONO MÓVIL: | 0991690439 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|--------------------------------|--|
| TÍTULO: | 1. Estudio del estado del suministro eléctrico de los alimentadores de la subestación el retorno |
| AUTOR (ES): | Cisneros Burbano Kevin Alexander |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 09/02/2024 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniero Eléctrico |
| ASESOR /DIRECTOR: | Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc. |

Constancia

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 9 días del mes de febrero de 2024

EL AUTOR:



Cisneros Burbano Kevin Alexander

C.I. 040170128-9



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc.

Certificación

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Cisneros Burbano Kevin Alexander, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **“ESTUDIO DEL ESTADO DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE LOS ALIMENTADORES DE LA SUBESTACIÓN EL RETORNO”**. Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico: aprobando la defensa, impresión y empastado.

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

A mis abuelitos Fabian y Silvia, quienes estuvieron desde el comienzo y desafortunadamente no están para ver realizado mi sueño, donde quiera que ellos estén, sé que se sienten orgullosos de lo que he conseguido. A mis padres Diego y Yomaira quienes están a mi lado apoyándome en todas las metas que me propongo. A mis abuelos Guillermo y Lidia, quienes siempre estuvieron ahí apoyándome.

Agradecimientos

A mis familiares, quienes estuvieron presentes en los momentos buenos y malos de esta etapa.

A la Universidad Técnica del Norte por abrirme las puertas para formar parte de ella, a la carrera de Electricidad y su cuerpo docente, quienes me otorgaron conocimientos, pero también valores y virtudes necesarios para mi vida profesional y personal.

A la Empresa Regional Norte S.A. y a quienes conforman el Departamento centro de control SCAD y al Departamento de Estudios Eléctricos y Calidad de Energía.

A mi tutor, Ing. Olger Arellano por ser un apoyo incondicional en todas las etapas de desarrollo de mi trabajo de grado.

Y finalmente, a mis compañeros, amigos y personas que estuvieron presentes en toda mi etapa universitaria.

Tabla de Contenido

| | |
|---|-------|
| Resumen..... | XIV |
| Abstract..... | XV |
| Introducción..... | XVI |
| Problema..... | XVI |
| Formulación del problema | XVI |
| Objetivos..... | XVII |
| Objetivo General..... | XVII |
| Objetivos Específicos. | XVII |
| Alcance | XVIII |
| Justificación | XIX |
| Contexto..... | XX |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1.1. Calidad de energía..... | 1 |
| 1.1.1. Definición Calidad de la energía eléctrica..... | 1 |
| 1.1.2. Importancia de la calidad de la energía eléctrica | 1 |
| 1.1.3. Características de las ondas de tensión y de corriente..... | 3 |
| 1.2. Principales Disturbios | 3 |
| 1.2.1. Interrupciones | 4 |
| 1.2.2. Depreciaciones de voltaje (Sags/Dips) | 4 |
| 1.2.3. Elevaciones de Voltaje (Swell)..... | 5 |
| 1.2.4. Transitorios-Oscilatorios | 5 |
| 1.2.5. Transitorio-Impulso | 5 |

| | | |
|------------|--|----|
| 1.2.6. | Ranuras (Notch) | 6 |
| 1.2.7. | Bajo voltaje (Undervoltage)..... | 6 |
| 1.2.8. | Alto voltaje (overvoltage) | 6 |
| 1.2.9. | Distorsión Armónica..... | 7 |
| 1.2.10. | Flicker | 9 |
| 1.3. | Normas y Regulaciones | 9 |
| 1.3.1. | IEC 61000-4-7 Distorsión armónica de voltaje..... | 9 |
| 1.3.2. | IEC 61000-4-15 Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)..... | 11 |
| 1.3.3. | IEC 61000-4-30 Calidad de suministro eléctrico..... | 11 |
| 1.3.5. | Calidad de producto..... | 12 |
| 1.3.6. | Nivel de voltaje | 13 |
| 1.3.7. | Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)..... | 13 |
| 1.3.8. | Distorsión armónica de voltaje..... | 13 |
| 1.3.9. | Desequilibrio de voltaje..... | 14 |
| CAPÍTULO 2 | | 15 |
| 2.1. | Metodología | 15 |
| 2.2. | Descripción del área de estudio..... | 16 |
| 2.2.1. | Sistema de subtransmisión..... | 18 |
| 2.2.2. | Localización | 20 |
| 2.2.3. | Características de funcionamiento..... | 20 |
| 2.2.4. | Características energéticas | 21 |
| 2.3. | Administración de datos proporcionados por EMELNORTE..... | 22 |
| 2.4. | Procesamiento de datos en Excel de parámetros de calidad de producto | 22 |
| 2.4.1. | Nivel de voltaje | 22 |
| 2.4.2. | Perturbación rápida de voltaje (Flicker) | 28 |

| | | |
|------------------|---|----|
| 2.4.3. | Procesamiento de datos distorsión armónica de voltaje | 32 |
| 2.4.4. | Desequilibrio de voltaje | 33 |
| 2.5. | Procesamiento de datos tomados aguas debajo de los alimentadores de la subestación El Retorno | 34 |
| 2.5.1. | Nivel de voltaje | 34 |
| 2.5.2. | Perturbaciones rápidas de voltaje | 35 |
| 2.5.3. | Distorsión armónica de voltaje | 36 |
| 2.5.4. | Desequilibrio de voltaje | 38 |
| 2.6. | Exportación de datos | 38 |
| 2.6.1. | EcoStruxure Power Monitoring Expert (PME) | 39 |
| 2.6.2. | Power advisor | 39 |
| 2.6.3. | Cómo funciona Power Advisor | 39 |
| 2.6.4. | Exportación de los datos hacia la nube | 39 |
| 2.6.5. | Reporte generado por el software | 43 |
| CAPÍTULO 3 | | 44 |
| 3.1. | Ajuste de niveles de voltaje en subestaciones | 44 |
| 3.1.1. | Alternativas de mejoras para los niveles de voltaje | 45 |
| 3.2. | Reducción de perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker) | 45 |
| 3.3. | Métodos de reducción de armónicos | 46 |
| 3.3.1. | Transformadores en Delta. | 47 |
| 3.3.2. | Transformadores con Diferentes Tipos de Conexión | 47 |
| 3.3.3. | Transformadores derivadores o en Zigzag. | 47 |
| 3.3.4. | Inductancias de Choque o de Aislamiento | 48 |
| 3.3.5. | Aumento del número de pulsos de convertidores | 48 |
| 3.3.6. | Aumento del Calibre del Neutro | 48 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.3.7. | Desclasificación de Transformadores..... | 48 |
| 3.3.8. | Uso de Transformadores con Factor K..... | 49 |
| 3.3.9. | Filtros..... | 50 |
| 3.4. | Análisis y diseño de armónicos de 3 y 5 orden..... | 53 |
| 3.5. | Compensación en el desequilibrio de voltaje..... | 56 |
| 3.6. | Simulación de filtro pasivo para armónico de tercer orden..... | 56 |
| | Conclusiones..... | 59 |
| | Recomendaciones..... | 60 |
| | Referencias..... | 61 |
| | ANEXOS..... | 64 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Problemas de calidad de energía vista desde el usuario. | 2 |
| Figura 2. Problemas de calidad de energía vista desde el suministrador. | 2 |
| Figura 3. Onda Senoidal. | 3 |
| Figura 4. Interrupción momentánea. | 4 |
| Figura 5. Sag de voltaje. | 4 |
| Figura 6. Voltaje Swell..... | 5 |
| Figura 7. Transitorios-Oscilatorios de la onda del voltaje..... | 5 |
| Figura 8. Forma de onda del voltaje con transitorio-impulso..... | 6 |
| Figura 9. Forma de onda del voltaje con perturbación Notch..... | 6 |
| Figura 10. Forma de onda con la perturbación de bajo voltaje. | 6 |
| Figura 11. Forma de onda con la perturbación de alto voltaje. | 7 |
| Figura 12. Series de Fourier..... | 8 |
| Figura 13. Interrupción momentánea. | 9 |
| Figura 14. Metodología aplicada para el estudio del suministro eléctrico S/E El Retorno. | 15 |
| Fuente: Autor | 15 |
| Figura 15. Área de concesión EMELNORTE líneas de transmisión. | 16 |
| Figura 16. Área de concesión EMELNORTE con instalaciones..... | 19 |
| Figura 17. Diagrama unifilar EMELNORTE | 19 |
| Figura 18. Diagrama unifilar S/E El Retorno. | 21 |
| Figura 19. Niveles de Voltaje circuito R2 noviembre 2022. | 24 |
| Figura 20. Niveles de Voltaje circuito R2 diciembre 2022. | 25 |
| Figura 21. Niveles de Voltaje circuito R2 enero 2023. | 26 |
| Figura 22. Niveles de Voltaje circuito R2 febrero 2023. | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 23. Incumplimientos Flicker noviembre 2022. | 29 |
| Figura 24. Incumplimientos Flicker diciembre 2022. | 30 |
| Figura 25. Incumplimientos Flicker enero 2023..... | 31 |
| Figura 26. Incumplimientos THD..... | 36 |
| Figura 27. THD individual Armónico de tercer orden..... | 37 |
| Figura 28. Panel principal PME..... | 40 |
| Figura 29. Panel principal PME direccionado en parámetros..... | 41 |
| Figura 30. Parámetros del PME..... | 41 |
| Figura 31. Datos de registro PME..... | 42 |
| Figura 32. Filtro Pasivo..... | 55 |
| Figura 33. Configuración tipo puente inversor trifásico con conexión de neutro..... | 55 |
| Figura 34. Onda senoidal en Desmos..... | 57 |
| Figura 35. Onda contaminada con el armónico de tercer orden..... | 57 |
| Figura 36. Aplicación de filtro pasivo..... | 58 |
| Figura 37. Filtro de armónicos Matrix® serie E..... | 58 |

Índice de Tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Valores de los índices de distorsión armónica | 10 |
| Tabla 1.2. Valores de los índices de distorsión armónica con interarmónico no sincrónico | 10 |
| Tabla 1.3. Valores del grupo armónico de primer orden y dos nuevos grupos virtuales (pu)..... | 10 |
| Tabla 1.4. Valores de los índices de distorsión armónica con componentes interarmónicos en el primer grupo armónico | 11 |
| Tabla 1.5. Límites para el índice de nivel de voltaje..... | 13 |
| Tabla 1.6. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)..... | 13 |
| Tabla 2.1. Agencias EMELNORTE por provincia | 17 |
| Tabla 2.2. Subestaciones EMELNORTE S.A..... | 18 |
| Tabla 2.3. Elementos Subestación El Retorno..... | 20 |
| Tabla 2.4. Límites de voltaje. | 23 |
| Tabla 2.5. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de noviembre. | 24 |
| Tabla 2.6. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de diciembre. | 25 |
| Tabla 2.7. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de enero..... | 26 |
| Tabla 2.8. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de febrero. | 27 |
| Tabla 2.9. Incumplimientos Flicker, mes de noviembre..... | 28 |
| Tabla 2.10. Incumplimientos Flicker, mes de diciembre..... | 29 |
| Tabla 2.11. Incumplimientos Flicker, mes de enero. | 30 |
| Tabla 2.12. Incumplimientos armónicos de voltaje por mes..... | 32 |
| Tabla 2.13. Valores iniciales para el procesamiento de datos de los niveles de voltaje. | 34 |
| Tabla 2.14. Resumen, incumplimientos niveles de voltaje..... | 34 |
| Tabla 2.15. Resumen, incumplimientos Flickers. | 35 |

| | |
|---|----|
| Tabla 2.16. Resumen, incumplimientos THD. | 36 |
| Tabla 2.17. Resumen, incumplimientos THD individual. | 36 |
| Tabla 2.17. Resumen, incumplimientos Desequilibrio de voltaje. | 38 |
| Tabla 3.1. Factor k para transformadores de distribución. | 49 |
| Tabla 3.2. Cargas Factor k. | 50 |

Resumen

El consumo de energía eléctrica crece de forma considerable debido al desarrollo de nuevas tecnologías. Las empresas de distribución deben prestar un servicio de calidad de energía eléctrica suministrada, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los equipos conectados a las redes de distribución. El presente trabajo de titulación tiene como objetivo analizar el estado del suministro eléctrico de la subestación El Retorno, esto se realizará mediante el software PME y la herramienta Power Advisor, los datos históricos son tomados en los alimentadores de la subestación. Este estudio busca diagnosticar el suministro eléctrico y dar alternativas de mejoras. Se identifican parámetros de calidad de producto para evaluar las distintas deformaciones de la onda fundamental. Mediante una metodología, se determinó el área de estudio, posterior a esto se solicitó a EMELNORTE la base de datos registrados por medidores de calidad de energía. Los datos obtenidos se subieron al software especializado para poder obtener un informe de resultados que se recibe después de un mes. Mediante el procesamiento de datos realizado en Excel se obtienen los incumplimientos con los indicadores de la Regulación ARCERNR – 002/20, con estos resultados se realiza el análisis comparativo con el reporte efectuado por el software. Mediante el análisis de los resultados se proporciona alternativas de mejoras del suministro eléctrico referente a calidad de producto, además de realizar una simulación utilizando una de las propuestas de mejora.

Palabras clave: Alimentadores, ARCERNR, Calidad de energía, Calidad de producto, PME, Power Advisor, Armónicos, Flicker, Filtro pasivo.

Abstract

The consumption of electrical energy is growing considerably due to the development of new technologies. Distribution companies must provide a quality service of supplied electrical energy in order to guarantee the proper functioning of the equipment connected to the distribution networks. The present graduation thesis aims to analyze the state of the electrical supply of the El Retorno substation, this will be done through the PME software and the Power Advisor tool, with historical data taken from the substation feeders. This study seeks to diagnose the electrical supply and provide improvement alternatives. Quality product parameters are identified to evaluate the different deformations of the fundamental wave. Through a methodology, the study area was determined, and then EMELNORTE was requested to provide the database registered by energy quality meters. The obtained data was uploaded to the specialized software in order to generate a results report which is received after one month. By processing the data in Excel, the non-compliances with the indicators of Regulation ARCERNNR - 002/20 are identified, and these results are compared with the report generated by the software. By analyzing the results, improvement alternatives for the electrical supply regarding product quality are provided, as well as conducting a simulation using one of the proposed improvements.

Keywords: Feeders, ARCERNNR, Power Quality, Product Quality, SME, Power Advisor, Harmonics, Flicker, Passive Filter.

Introducción

Problema

En los sistemas eléctricos de distribución no es simple mantener los parámetros para que el suministro eléctrico sea estable y que este se mantenga en las condiciones idóneas, estas alteraciones son causadas por perturbaciones en el sistema, haciendo que la calidad de energía se vea afectada, deformando la onda de frecuencia y variando el voltaje lo que ocasiona que este sobrepase los límites permitidos y preestablecidos.

La presencia de armónicos en la red de distribución eléctrica puede generar innumerables problemas, como en el caso de los transformadores, ya que al tener armónicos de voltaje provoca pérdidas de vacío en el núcleo. Los armónicos de corriente ocasionan que se produzcan pérdidas en el cobre y desgaste del aislamiento. La presencia de armónicos de orden mayor genera calor en el transformador reduciendo así la vida útil de este. Las perturbaciones rápidas de voltaje conocidas como flicker o parpadeo en las luminarias se caracterizan por generar una variación del brillo de las lámparas incandescentes, lo que puede causar molestia visual y producir cansancio. Para la empresa distribuidora es importante mantener el nivel de voltaje dentro de los parámetros que establece la Regulación ARCERNNR 002/20, ya que así se evitan multas provenientes del órgano regulador. El desequilibrio de voltaje son condiciones donde en las tres fases se presentan valores de voltaje los cuales son diferentes en módulo y desfase angular, esto es un problema de calidad de energía que afecta a los sistemas de distribución.

El estudio de estos parámetros anteriormente mencionados, repercuten en los alimentadores que deben estar bajo los valores permitidos y establecidos por la regulación nacional que rige el servicio eléctrico de distribución.

Formulación del problema

¿Como analizar el estado del suministro eléctrico de los alimentadores de la subestación El Retorno mediante el software especializado EcoStructure Power Advisor para proponer alternativas de mejora en el suministro eléctrico?

Objetivos

Objetivo General

Analizar el estado del suministro eléctrico de los alimentadores de la subestación El Retorno mediante el uso del software especializado EcoStructure Power Advisor y la Regulación ARCERNNR – 002/20 para el planteamiento de alternativas que mejoren el estado del suministro eléctrico.

Objetivos Específicos.

1. Describir los parámetros que intervienen en calidad de energía según la regulación nacional e internacional.
2. Realizar el análisis comparativo de los alimentadores de la subestación mediante el software especializado y la Regulación ARCERNNR – 002/20.
3. Proponer alternativas de mejoras para el suministro eléctrico referente a calidad de producto.

Alcance

El estudio se llevará a cabo en las cabeceras de los 5 alimentadores de la subestación El Retorno. Se procederá a recopilar información bibliográfica sobre parámetros de calidad de energía. Para esto se tomará como guía las normativas nacionales e internacionales. Por parte de lo internacional serán la normativa vigente IEC 61000 y la Regulación ARCERNNR – 002/20 para el caso nacional.

La Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. proporcionará la base de datos de las mediciones registradas en las cabeceras de los alimentadores. La base de datos se tomará con un tiempo 2 meses, diciembre 2022 y enero 2023. Se tiene acceso al software especializado de la empresa Schneider Electric, llamado EcoStruxure™ Power Advisor. Se ingresará la base de datos en el software especializado. De esto se obtendrá como resultado reportes de mediciones.

Se analizarán los resultados que proporciona el software aplicando la regulación nacional ARCERNNR – 002/20 que servirá como guía para verificar si los valores de los gráficos obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos. Con esto se identificará los puntos en el sistema en el que se incumple con la regulación. Una vez identificados los alimentadores que incumplan con la regulación, se propondrán varias soluciones para mitigar los fenómenos que afectan a los parámetros de calidad de producto.

Justificación

Las subestaciones forman parte fundamental de un sistema eléctrico de potencia, estas son las que se encargan de transmitir la potencia eléctrica del sistema, hacia el usuario final que necesiten el servicio eléctrico. La distribuidora se encarga de entregar el suministro eléctrico de calidad y sus diferentes parámetros, debido a esto, es necesario un control de calidad sobre los alimentadores de las subestaciones, ya que en la red de distribución existen armónicos y flickers que en gran cantidad afecta a la calidad de energía y por ende se tiene varios problemas en el servicio eléctrico afectando a los usuarios finales o abonados, es por esto que, se realizará el estudio de estos parámetros establecidos por la regulación nacional a la que se rige la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. en la subestación El Retorno ubicada en la ciudad de Ibarra.

Es necesario la implementación de un PME (Power Monitorin Expert) en el sistema de potencia actual, para que sea más eficiente y se pueda monitorizar y gestionar el suministro de energía eléctrica en tiempo real los distintos indicadores que se tiene conectados al sistema de potencia. Mediante el software especializado EcoStructure Power Advisor como herramienta. Este estudio pretende diagnosticar el estado del suministro eléctrico de los alimentadores de la subestación El Retorno.

El principal beneficiario es la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. por lo que la empresa proporciona el acceso al software especializado y a la base de datos de las mediciones registradas en las cabeceras de los alimentadores, esto hace viable el estudio.

Contexto

Según el autor (Pinto, 2020), se considera que el suministro ideal de energía eléctrica en bajo y medio voltaje depende de la curva de tensión sinusoidal perfecta y con una frecuencia de 60 Hz implementado en el sistema de distribución. Sin embargo, no resulta sencillo que el suministro de electricidad sea constante y mantenga estas condiciones debido a perturbaciones en el sistema y es necesario la toma inmediata y permanentemente medidas para mantener el voltaje dentro del rango considerado. La calidad de la energía se ve afectada cuando la frecuencia y el voltaje del suministro varían con respecto a límites permitidos y preestablecidos. También esto se produce cuando se presentan distorsiones en la curva de tensión. Esto afectar la calidad de la energía.

Además, según (Pedroni, 2020) en los transformadores la presencia de armónicos de voltaje aumenta las pérdidas de vacío en el núcleo por histéresis y por corrientes de Foucault y los armónicos de corriente aumentan las pérdidas en el cobre y deterioran los aislantes. Estas pérdidas varían y aumentan con la frecuencia, por lo que los armónicos de orden más altos tienen una gran probabilidad de influir en el calentamiento del transformador y en la disminución de su vida útil del mismo. En los bancos de condensadores los armónicos de voltaje aumentan las pérdidas por conducción en el dieléctrico al disminuir su impedancia directamente con el aumento de la frecuencia, lo que produce pérdidas adicionales y calentamientos que pueden dar lugar a un deterioro de los condensadores.

La monitorización del consumo de energía es una parte importante y fundamental para llevar un control de calidad de energía. Además, que la medición del consumo de energía podría ser útil para evitar varios defectos que tienen la red y posterior corrección de estos defectos. La combinación de estas herramientas emula un analizador de calidad de la energía (Grover y Lall, 2020).

Para el autor (Krzysztof y Zbigniew, 2022), los nuevos retos técnicos son aquellos que desembocan en pérdidas de energía, la estabilidad y la calidad de la energía. Es por esto que la mejora de la calidad de la energía abarca la regulación del voltaje/frecuencia, la supresión de la distorsión armónica total y la mitigación de la corriente circulante.

Las fluctuaciones de voltaje en las redes de bajo y medio voltaje se obtienen como resultado el parpadeo y las fluctuaciones que se dan para poder evaluar el impacto a la red

eléctrica. Mediante conclusiones generales relacionadas con la medición, el análisis, diagnóstico y la mitigación (Alkahtani, 2020).

Según el autor (Zhang, 2020), se utilizan diversos avances tecnológicos, como por ejemplo las tecnologías basadas en la electrónica de potencia que miden distintos parámetros, esto provoca diferentes tipos de eventos de calidad de energía. Por ello, en los últimos años se han desarrollado regulaciones, normas y métodos para la mitigación de estos parámetros. Comparamos los principales problemas relacionados con la caída de voltaje, el aumento de voltaje, los armónicos de voltaje y corriente, los desequilibrios del sistema y las fluctuaciones para garantizar una potencia de salida de alta calidad.

La rápida adquisición de información de los sistemas eléctricos de todo el mundo proporciona una cantidad de datos, esto facilita enormemente su estudio y posterior diagnóstico que ofrece a su vez la posibilidad de contribuir a la transición hacia sistemas energéticos inteligentes. En este contexto, el uso de métodos de agrupación para el estudio del comportamiento del consumo eléctrico es beneficioso, ya que facilita, un despliegue más eficaz de los activos de energía renovable distribuida, el desarrollo de políticas tarifarias diferenciadas y la previsión de la carga (Razavi, 2019).

Durante las últimas décadas, con el proceso de reestructuración del sistema eléctrico que con el pasar el tiempo este incrementa sus dimensiones, por lo que lleva a que las fuentes de energía centralizadas están siendo sustituidas por otras descentralizadas. Este fenómeno ha dado lugar a un nuevo concepto en los sistemas de energía eléctrica, especialmente en los sistemas de distribución (Kazemi-Robati, 2019).

Aunque la reconfiguración del sistema de distribución suele aplicarse para reducir las pérdidas de la red, esto también puede afectar a muchos otros índices de la red, como el perfil de voltaje y los índices de calidad de la energía. Los estudios de planificación de filtros de armónicos que ignoran las diferentes configuraciones del sistema no pueden alcanzar soluciones óptimas que necesita el sistema de distribución. Cuando el estudio de planificación de filtros se realiza, no se garantiza la solución completa de las restricciones de calidad de la energía, mientras se aplican al sistema las reconfiguraciones basadas en la reducción de pérdidas (Ku y Lin, 2019).

Las tensiones en los puntos finales de todos los alimentadores de distribución a los que la distribuidora encargada da el servicio, en el transformador principal se recogen los datos

mediante un sistema SCADA. El voltaje del alimentador y de la potencia inyectada generada por todos los sistemas a lo largo del alimentador (Sherif y Shady H.E, 2019).

La detección rápida y fiable de fallos es uno de los principales retos de las redes. La alta frecuencia en las tensiones transitorias y de identificación de fallos basado en la diferencia del cuadrado de las tensiones transitorias para identificar las líneas con fallos en las redes que utilizan líneas aéreas. Además, con esto se presenta un método de discriminación de polos defectuosos basado en la diferencia entre el cambio de los voltajes (Xiang y Yang, 2019).

CAPÍTULO 1

Parámetros que intervienen en calidad de energía según la regulación nacional e internacional

Precisamente de la revisión de la literatura especializada, en este capítulo se realizó la descripción de los parámetros de calidad de energía comprendidos en la regulación nacional e internacional vigente. A continuación, se detallan conceptos de calidad de energía y las distintas perturbaciones que afectan la calidad del producto, así como sus indicadores.

1.1. Calidad de energía

La calidad de la energía es un término que se utiliza para referirse a la norma de calidad que debe tener el suministro eléctrico para que los equipos y dispositivos mantengan su continuidad sin que se afecte su ejecución ni provoque fallas a sus componentes.

1.1.1. Definición Calidad de la energía eléctrica

En relación con la energía eléctrica, el término “Calidad” se puede definir como: “el grado en que la energía eléctrica suministrada satisface las expectativas de los usuarios”. Los problemas asociados a la calidad de la energía eléctrica no son nuevos. Lo que es nuevo es que ahora los usuarios están más conscientes de las consecuencias de estos fenómenos y que las técnicas para su detección y corrección son más accesibles que en años pasados. Todos los sistemas eléctricos están expuestos a contingencias y diversos problemas causados por fenómenos naturales, accidentes o por la propia operación de la red, lo cual repercute en la calidad de la energía (Fuentes, 2015).

1.1.2. Importancia de la calidad de la energía eléctrica

El término calidad de la energía eléctrica se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan al voltaje y a la corriente en un tiempo dado y en una localidad específica del sistema eléctrico de potencia.

El estándar IEEE-1159-1995 define un alto nivel de calidad de la energía cuando tenemos un bajo nivel de disturbios, entendiéndose por disturbio como cualquier anomalía en la forma de onda de voltaje o de corriente.

Cualquier problema que se presente en el suministro manifestada por desviaciones en la magnitud y forma de onda en el voltaje, corriente o frecuencia que puede ocasionar falla u operación inadecuada en el equipo del usuario. Los problemas de calidad de energía desde la perspectiva del usuario se muestran en la Figura 1 (Hernández, 2017).

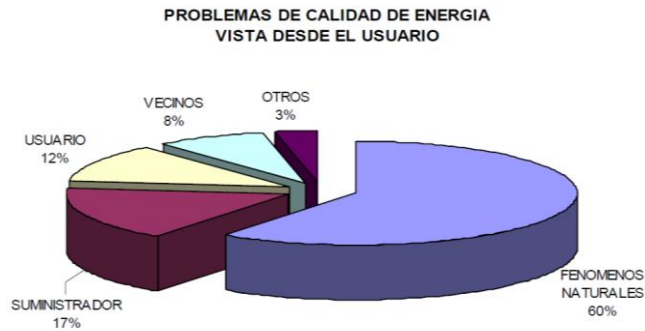


Figura 1. Problemas de calidad de energía vista desde el usuario.

Fuente: (Hernández, 2017).

El mayor porcentaje de los problemas vista desde el usuario se ven provocados por fenómenos naturales, y el segundo con mayor porcentaje es provocado por el suministrador. Estos problemas vistos desde el suministrador afectan otros factores como se observa en la Figura 2.

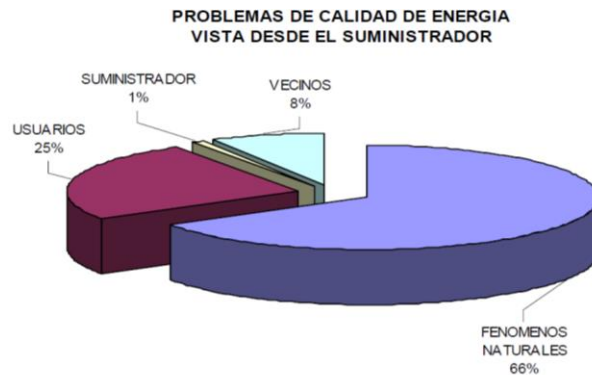


Figura 2. Problemas de calidad de energía vista desde el suministrador.

Fuente: (Hernández, 2017).

La principal causa de problemas que se presentan en calidad de energía en el suministrador se debe a fenómenos naturales con un 66% en la mayoría de los casos.

1.1.3. Características de las ondas de tensión y de corriente

- Fase: La fase indica la situación instantánea en el ciclo, de una magnitud que varía cíclicamente.
- Amplitud de la onda: la amplitud de una onda es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda sinusoidal.
- El valor máximo positivo que toma la amplitud de una onda sinusoidal recibe el nombre de "pico o cresta".
- El valor máximo negativo, "vientre" o "valle".
- El punto donde el valor de la onda se anula al pasar del valor positivo al negativo, o viceversa, se conoce como "nodo", "cero" o "punto de equilibrio".
- Frecuencia de la onda: La frecuencia (f) del movimiento ondulatorio se define como el número de oscilaciones completas o ciclos por segundo ($f=1/T$).
- Forma de la onda (Fuentes, 2015).

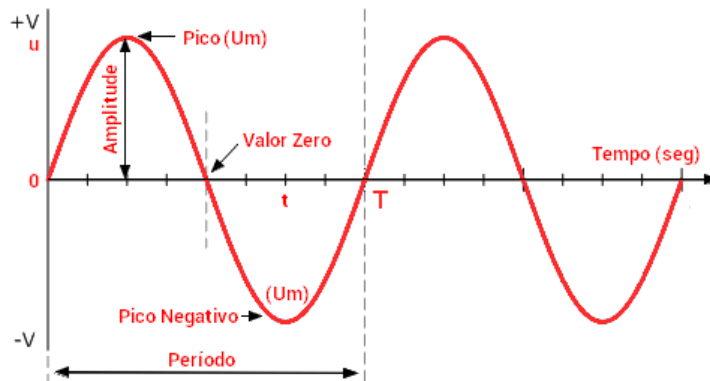


Figura 3. Onda Senoidal.

Fuente: (Eletricidade, 2016).

En la Figura 3 se muestra la forma ideal de una onda senoidal, con las distintas características, estas tienen una parte positiva y otra negativa, que en este caso son lo mismo. Un ciclo de una onda es la parte más pequeña de una onda que se repite, y que consta de un ciclo positivo y uno negativo. A un ciclo de onda también se le denomina forma de onda.

1.2. Principales Disturbios

En calidad de energía la onda senoidal se ve afectada por distintos disturbios, haciendo que esta se deforme y cambie su forma ideal, estas deformaciones tienen distintos nombres y se las identifica según el cambio que generan en la onda.

1.2.1. Interrupciones

Una interrupción es un evento durante el cual el voltaje, en el punto de conexión del cliente, cae a cero y no retorna a sus valores normales automáticamente. De acuerdo con la IEC, el tiempo mínimo de una larga interrupción es de 3 minutos. Si el tiempo es menor a 3 min. se denomina corta interrupción (Flórez, 2013).



Figura 4. Interrupción momentánea.

Fuente: (Granero, 2020).

Este tipo de interrupciones afectan a la onda ideal, provocando que esta cambie como se observa en la Figura 4, esta puede provocar fallos y variaciones en los parámetros de calidad de energía, estas son el resultado de algún tipo de daño en la red de suministro eléctrico, como caídas de rayos, animales, arboles (Granero, 2020).

1.2.2. Depreciaciones de voltaje (Sags/Dips)

Los sags de voltaje son reducciones del voltaje efectivo, de corta duración, provocadas por cortocircuitos, sobrecargas y arranque de grandes motores. Reducción en el voltaje nominal r.m.s a la frecuencia de trabajo, con una duración de 8,33 mseg (medio ciclo) a 2.5 seg. (150 ciclos) si se opera a 60 Hz. Una caída de voltaje ocurre cuando el voltaje RMS disminuye entre 10% del voltaje nominal durante un ciclo medio a un minuto. (Sánchez, 2015).



Figura 5. Sag de voltaje.

Fuente: (Granero, 2020).

En esta perduración de la Figura 6 la deformación de la onda es leve, y se da en periodos de tiempo muy cortos, las causas comunes de los bajones de voltaje se deben a la puesta en marcha de grandes cargas.

1.2.3. Elevaciones de Voltaje (Swell)

Un swell es un excedente del 110% del voltaje RMS frente al valor nominal de al menos 1 min, si este periodo es mayor, se lo conoce como over voltage (150 ciclos), mostrado en la Figura 6 (Kobold, 2004).

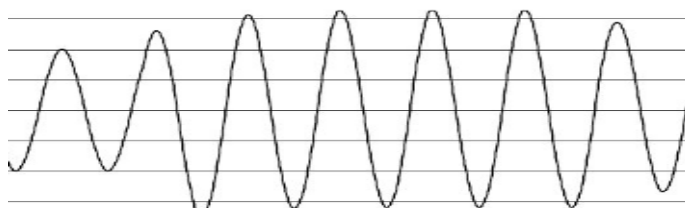


Figura 6. Voltaje Swell.

Fuente: (Tecsop Virtual, 2019).

Incremento en el voltaje nominal rms, a la frecuencia de trabajo, con una duración de medio ciclo a 2.5 seg.

1.2.4. Transitorios-Oscilatorios

Son bidireccionales, con duración desde 0.3 a 5 milisegundos, de valor hasta 8 veces el voltaje p.u, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Transitorios-Oscilatorios de la onda del voltaje.

Fuente: (Tecsop Virtual, 2019).

La onda se ve afectada en periodos cortos de tiempo haciendo que esta solo varie de forma.

1.2.5. Transitorio-Impulso

Pulso unidireccional con duración a dos milisegundos, como se observa en la Figura 8.



Figura 8. Forma de onda del voltaje con transitorio-impulso.

Fuente: (Tecsop Virtual, 2019).

Este impulso hace que esta salga de los parámetros que tiene la onda senoidal, haciendo que se generen picos muy elevados.

1.2.6. Ranuras (Notch)

Ranuras de las formas de onda de voltaje, producidas por la conmutación en la conducción de la corriente de diodos y tiristores, ejemplificada en la Figura 9.

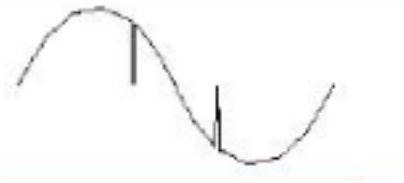


Figura 9. Forma de onda del voltaje con perturbación Notch.

Fuente: (Tecsop Virtual, 2019).

1.2.7. Bajo voltaje (Undervoltage)

Reducción en el voltaje nominal rms a la frecuencia de trabajo, con una duración mayor a 2.5 seg como se observa en la Figura 10.



Figura 10. Forma de onda con la perturbación de bajo voltaje.

Fuente: (Hernández, 2017).

1.2.8. Alto voltaje (overvoltage)

Aumento en el voltaje rms, a la frecuencia de trabajo por un periodo de tiempo mayor a 2.5 seg como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Forma de onda con la perturbación de alto voltaje.

Fuente: (Hernández, 2017).

1.2.9. Distorsión Armónica

Consumos lineales

Para estudiar las características de los sistemas eléctricos es usual considerarlos como resultado de la interconexión de diferentes bloques básicos:

- La fuente de alimentación, usualmente un voltaje sinusoidal.
- El consumo, generalmente constituido por resistencias, inductancias y condensadores de valores fijos.

Si el voltaje es sinusoidal la corriente también lo es y, en general, existe un desfase entre ellos (Procobre Mexico, 2016).

Consumos no lineales

La electrónica puso a disposición de los hogares y las empresas productivas diversos equipos capaces de controlar el producto final: iluminación variable, velocidad ajustable, etc. Así aproximadamente un 50% de la energía eléctrica pasa por un dispositivo de electrónica de potencia antes que ésta sea finalmente aprovechada (Procobre Mexico, 2016).

Definición

Son distorsiones de la onda sinusoidal de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas no lineales. Los armónicos generalmente no son producidos por la compañía suministradora de energía, son más bien generados por los consumidores como cargas industriales no lineales y si estos armónicos son de suficiente magnitud, pueden desplazarse al sistema eléctrico de potencia y afectar a otros consumidores (Fuentes, 2015).

Parámetros de los armónicos

Se clasifican por tres parámetros: Orden, Frecuencia y Secuencia. Basándose en la afirmación de Joseph Fourier: “cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia” (Fuentes, 2015).

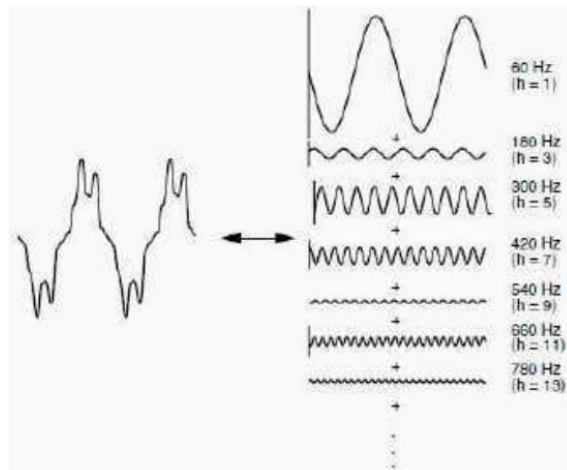


Figura 12. Series de Fourier.

Fuente: (Fuentes, 2015).

Las series de Fourier constituyen la herramienta matemática del análisis empleado para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función que se observa en la Figura 12.

Orígenes de los armónicos

Entre otros muchos, los principales causantes de las distorsiones armónicas son:

- Las reactancias electromagnéticas y electrónicas de alumbrado
- Equipos de soldadura eléctrica
- Equipos electrónicos conectados a la red monofásica
- Las reactancias electromagnéticas para lámparas de descarga
- Arrancadores electrónicos
- Variadores de velocidad (Fuentes, 2015).

1.2.10. Flicker

En realidad, el término flicker (parpadeo) se refiere al efecto más notorio de las variaciones del voltaje. Cuando el voltaje aplicado a lámparas varía a baja frecuencia, puede ser que la intensidad luminosa también varíe y por lo tanto las lámparas ‘parpadean’ como se muestra en la Figura 13. En algunos casos se aprecia el parpadeo en los monitores de computadoras. Si los cambios en el voltaje son pequeños y ocurren de manera esporádica, el parpadeo no es un problema serio, pero puede ser molesto (Cortés, 2009).

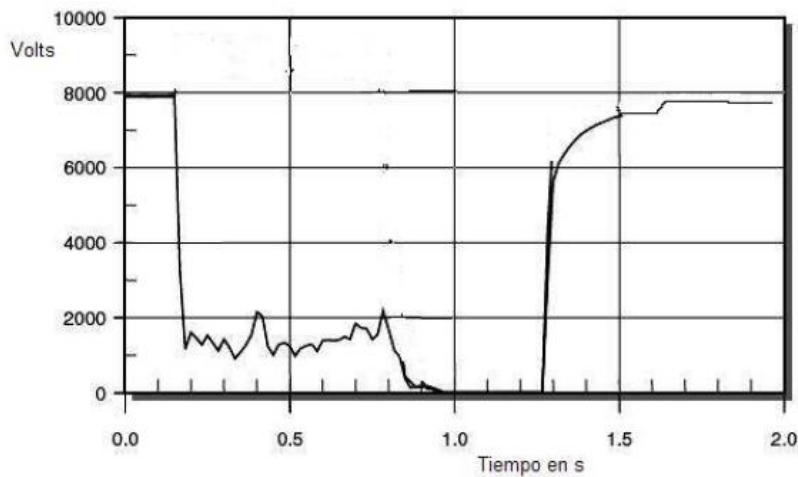


Figura 13. Interrupción momentánea.

Fuente: (Cortés, 2009).

El parpadeo es debido a la energización de cargas que requieren de corrientes grandes en el arranque. Si los arranques son frecuentes o si los requerimientos de corriente de la carga fluctúan rápidamente durante cada ciclo de operación, los efectos del parpadeo pueden ser pronunciados (Cortés, 2009).

1.3. Normas y Regulaciones

Para establecer los parámetros de calidad de producto se tomará como referencia la normativa internacional IEC 61000-4 en donde se tratan estos temas, y aplicaremos la regulación nacional ARCERNNR – 002/20.

1.3.1. IEC 61000-4-7 Distorsión armónica de voltaje

Para la evaluación de las distorsiones armónicas e interarmónicas, en la norma IEC 61000-4-7 se introducen tres índices de distorsión armónica denominados THD, THDS y

THDG. El índice THD se calcula para un sistema de 50 Hz mediante la división del valor cuadrático medio (r.m.s.). Además, el efecto de las fluctuaciones que se producen en los órdenes fundamental y armónico no se tiene en cuenta en la medición de la distorsión de la señal. En el índice THDS, los órdenes armónicos se sustituyen por subgrupos armónicos. El índice THDG tiene en cuenta todo el espectro de frecuencias y puede mostrar la cantidad de distorsión creada por los componentes interarmónicos de forma eficaz (Milad Dalali, 2015).

Tabla 1.1. Valores de los índices de distorsión armónica

| Nominal | THD = 38.87%, Err (%) = 7.87 | | THDS = 40.14%, Err (%) = 4.86 | | THDG = 42.19%, Err (%) = 0 | | THDGS = 42.19%, Err (%) = 0 | | ITHDGS = 42.19%, Err (%) = 0 | | |
|---------|------------------------------|-------|-------------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|---------------|------------------------------|--------|--|
| | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDGS | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDGS | |
| | | | $f = 49.8$ Hz | | | | | $f = 50.2$ Hz | | | |
| DFT | 37.62 | 39.21 | 42.17 | 42.38 | 42.83 | 37.66 | 40.36 | 42.34 | 42.55 | 43 | |
| int. | 37.82 | 39.42 | 42.39 | 42.61 | 43.07 | 37.88 | 40.57 | 42.55 | 42.77 | 43.22 | |
| KF | 38.66 | 39.96 | 42.11 | 42.19 | 42.19 | 38.77 | 40.1 | 42.15 | 42.26 | 42.26 | |
| | | | $f = 49.5$ Hz | | | | | $f = 50.5$ Hz | | | |
| DFT | 32.22 | 37.42 | 41.71 | 42.92 | 45.66 | 31.86 | 40.56 | 43.82 | 45.04 | 47.72 | |
| int. | 32.1 | 37.37 | 41.69 | 42.92 | 45.68 | 31.67 | 40.47 | 43.74 | 44.93 | 47.62 | |
| KF | 38.55 | 40.01 | 42.03 | 42.1 | 42.1 | 38.48 | 39.75 | 42.25 | 42.42 | 42.42 | |

Nota. Fuente: Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC61000-4-7 standard (Milad Dalali, 2015).

Tabla 1.2. Valores de los índices de distorsión armónica con interarmónico no sincrónico

| Nominal | THD = 37.82%, Err (%) = 10.35 | | THDS = 39.24%, Err (%) = 6.99 | | THDG = 41.31%, Err (%) = 2.08 | | THDGS = 41.32%, Err (%) = 2.06 | | ITHDGS = 41.33%, Err (%) = 2.03 | | |
|---------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|--------|--|
| | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDGS | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDGS | |
| | | | $f = 49.8$ Hz | | | | | $f = 50.2$ Hz | | | |
| DFT | 38.52 | 39.95 | 42.3 | 42.52 | 42.97 | 38.22 | 40.37 | 42.52 | 42.74 | 43.18 | |
| int. | 38.74 | 40.12 | 42.49 | 42.73 | 43.2 | 38.42 | 40.61 | 42.77 | 42.97 | 43.42 | |
| KF | 38.72 | 39.9 | 42.07 | 42.15 | 42.15 | 38.32 | 39.85 | 42.01 | 42.12 | 42.12 | |
| | | | $f = 49.5$ Hz | | | | | $f = 50.5$ Hz | | | |
| DFT | 32.87 | 37.96 | 41.3 | 42.49 | 45.23 | 32.7 | 39.62 | 43.35 | 44.51 | 47.2 | |
| int. | 32.87 | 37.94 | 41.3 | 42.51 | 45.25 | 32.49 | 39.47 | 43.21 | 44.35 | 47.04 | |
| KF | 38.83 | 39.87 | 42.16 | 42.21 | 42.21 | 38.21 | 39.4 | 41.84 | 42.01 | 42.01 | |

Nota. Fuente: Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC61000-4-7 standard (Milad Dalali, 2015).

Tabla 1.3. Valores del grupo armónico de primer orden y dos nuevos grupos virtuales (pu)

| f , Hz | First harmonic group ($C_{g,1}$) | | | $C_{g-sg,1}$ virtual group | | | $C_{g-fund,1}$ virtual group | | |
|----------|------------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|---------------|--------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | DFT, Err% | Int., Err% | KF, Err% | DFT, Err% | Int., Err% | KF, Err% | DFT, Err% | Int., Err% | KF, Err% |
| 49.5 | 1.0027, 1.92 | 1.0024, 1.95 | 1.0205, 0.18 | 0.1425, 5.19 | 0.143, 4.86 | 0.1483, 1.33 | 0.1905, 10.31 | 0.1911, 10.03 | 0.2061, 2.97 |
| 49.8 | 1.0237, 0.14 | 1.0216, 0.07 | 1.0213, 0.1 | 0.1589, 5.72 | 0.1592, 5.92 | 0.1461, 2.79 | 0.2309, 8.71 | 0.2313, 8.9 | 0.2089, 1.65 |
| 49.9 | 1.0255, 0.31 | 1.0241, 0.18 | 1.0216, 0.07 | 0.1588, 5.66 | 0.1594, 6.05 | 0.1471, 2.13 | 0.2311, 8.8 | 0.2317, 9.09 | 0.2094, 1.41 |
| 49.95 | 1.0242, 0.19 | 1.0237, 0.14 | 1.0217, 0.06 | 0.1544, 2.73 | 0.1547, 2.93 | 0.1469, 2.26 | 0.2223, 4.66 | 0.2226, 4.8 | 0.2094, 1.41 |
| 50 | 1.0223, 0 | 1.0222, 0.01 | 1.0217, 0.06 | 0.1503, 0 | 0.1502, 0.07 | 0.1475, 1.86 | 0.2124, 0 | 0.2122, 0.09 | 0.2094, 1.41 |
| 50.05 | 1.0204, 0.19 | 1.0192, 0.3 | 1.0218, 0.05 | 0.1468, 2.33 | 0.1465, 2.53 | 0.1477, 1.73 | 0.2032, 4.33 | 0.2029, 4.47 | 0.2096, 1.32 |
| 50.1 | 1.0188, 0.34 | 1.0168, 0.54 | 1.022, 0.03 | 0.144, 4.19 | 0.1437, 4.39 | 0.1474, 1.93 | 0.1974, 7.06 | 0.1971, 7.2 | 0.2105, 0.89 |
| 50.2 | 1.0207, 0.16 | 1.0179, 0.43 | 1.0217, 0.06 | 0.1515, 0.08 | 0.1514, 0.73 | 0.148, 1.53 | 0.2148, 1.13 | 0.2147, 1.08 | 0.2079, 2.12 |
| 50.5 | 1.0419, 1.92 | 1.0413, 1.86 | 1.0228, 0.05 | 0.208, 38.39 | 0.2075, 38.06 | 0.1489, 0.93 | 0.3433, 61.63 | 0.343, 61.49 | 0.2175, 2.4 |

Nota. Fuente: Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC61000-4-7 standard (Milad Dalali, 2015).

Tabla 1.4. Valores de los índices de distorsión armónica con componentes interarmónicos en el primer grupo armónico

| Nominal | THD = 38.87%, Err (%) = 17.7 | | THDS = 39.69%, Err (%) = 15.96 | | THDG = 41.27%, Err (%) = 12.62 | | THDGS = 44.29%, Err (%) = 6.22 | | ITHDG = 47.23%, Err (%) = 0 | |
|---------|---------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------|
| | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDG | THD | THDS | THDG | THDGS | ITHDG |
| | | | <i>f</i> = 49.8 Hz | | | | | <i>f</i> = 50.2 Hz | | |
| DFT | 37.62 | 38.73 | 41.18 | 44.55 | 48.2 | 37.66 | 39.96 | 41.49 | 44.56 | 47.59 |
| int. | 37.81 | 38.92 | 41.39 | 44.77 | 48.43 | 37.89 | 40.18 | 41.7 | 44.77 | 47.81 |
| KF | 38.69 | 39.52 | 41.19 | 44.16 | 47.22 | 38.77 | 39.62 | 41.21 | 44.18 | 47.36 |
| | | | <i>f</i> = 49.5 Hz | | | | | <i>f</i> = 50.5 Hz | | |
| DFT | 32.22 | 37.5 | 41.55 | 44.36 | 46.53 | 31.86 | 39.48 | 41.99 | 47.45 | 56.53 |
| int. | 32.1 | 37.37 | 41.69 | 42.92 | 45.68 | 31.68 | 39.4 | 41.91 | 47.35 | 56.45 |
| KF | 38.53 | 39.56 | 41.14 | 44.01 | 47.03 | 38.46 | 39.23 | 41.26 | 44.36 | 49.89 |

Nota. Fuente: Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC61000-4-7 standard (Milad Dalali, 2015).

La norma IEC 61000-47 define cómo se deben medir los armónicos para las señales de la red eléctrica o de la línea eléctrica de 50 y 60 Hz, esta establece cómo se deben medir esos armónicos. Esta no se preocupa por los límites, solo se preocupa por cómo se debe determinar los armónicos en la señal de la red eléctrica, esto es muy importante porque muchos otros estándares se refieren o usan este estándar, por ejemplo, el 61000 3-3 y 3-13 son estándares que imponen límites en armónicos para equipos conectados a la red eléctrica para mantener una cierta calidad de voltaje. Estos índices están especificados en la Tabla 1.1, Tabla 1.2 y Tabla 1.3. (Milad Dalali, 2015).

1.3.2. IEC 61000-4-15 Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

La norma IEC-61000-4-15 plantea el diseño de un medidor de flicker de cinco etapas. La primera etapa consta de un adaptador de tensión y un circuito para comprobación de calibración. La segunda etapa es un demodulador cuadrático recuperador de la fluctuación de tensión. La etapa 3 se compone de dos filtros dispuestos en cascada y un selector de margen. La etapa 4 está compuesta por un multiplicador cuadrático y un filtro pasa bajo de primer orden. La salida de esta etapa representa la sensación instantánea de flicker. La etapa 5 realiza un análisis estadístico del nivel de flicker permitiendo el cálculo de parámetros de evaluación significativos como el Pst y el Plt (Montoya, 2008).

1.3.3. IEC 61000-4-30 Calidad de suministro eléctrico.

Método para la obtención de datos (equipos de clase A)

- La norma IEC-61000-4-30 propone cuatro intervalos de observación estándar:
- Intervalo base de observación de 200 ms (10 ciclos para 50Hz y 12 ciclos para 60Hz).
- Intervalos muy cortos: Promedios de 3 segundos, observando todos los ciclos.

- Intervalos cortos: Promedios y estadísticos 10 minutos.
- Intervalos largos: Promedios y estadísticos 2 horas (Montoya, 2008).

Esta norma propone medir principalmente:

- Medida de valores de tensión, basados en el valor eficaz de $\frac{1}{2}$ ciclo, indicando intervalos de sobretensión (“swell”), baja tensión (“dip”) e interrupción (“interruption”).
- Medida de la frecuencia, promediando cada 10 segundos
- Medida de armónicos de tensión, según IEC-61000-4-7 Por lo general se indican estadísticos con 95% de probabilidad (valor que no ha sido rebasado más que en un 5% de los ciclos).
- Medida de Flicker en intervalos de 10 minutos y de 2 horas.
- Medida del % de desequilibrio, usando las componentes fundamentales de U12, U23, U31. El resultado se da en estadísticos con 95% de probabilidad (Montoya, 2008).

1.3.4. Regulación ARCERNNR – 002/20

Su objetivo principal es establecer los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, y, definir los parámetros de medición, registros y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores, según corresponda. Esta regulación es de cumplimiento obligatorio para las empresas eléctricas de distribución, y a los consumidores regulados y no regulados conectados a la red de distribución (ARCERNNR, 2020).

1.3.5. Calidad de producto

Según la regulación (ARCERNNR, 2020), es el atributo de calidad de servicio relacionado con la forma en la que las señales de voltaje son entregadas por la distribuidora, y que se caracteriza, por el nivel de voltaje, perturbaciones rápidas de voltaje y armónicos.

Se divide en 4 diferentes parámetros, los cuales son:

- Nivel de voltaje
- Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrio de voltaje

1.3.6. Nivel de voltaje

Los límites establecidos por la regulación son los de la Tabla 5.

Tabla 1.5. Límites para el índice de nivel de voltaje

| Nivel de voltaje | Rango admisible |
|----------------------------|------------------------|
| Alto voltaje (Grupo 1 y 2) | ±5 % |
| Medio voltaje | ±6 % |
| Bajo voltaje | ±8 % |

Fuente: Regulación nacional ARCERNNR – 002/20 (ARCERNNR, 2020).

La distribuidora cumple cuando el 95% o más de los registros, en todas las fases, en un periodo de al menos 7 días continuos, están dentro del rango admisible (ARCERNNR, 2020).

1.3.7. Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

El valor límite para el índice de severidad del flicker des corta duración (Pst), conforme a la norma IEC 61000-4-15, en el punto de medición, no supera la unidad. La distribuidora cumple cuando el 95% o más de los registros, en todas las fases, en un periodo de al menos 7 días continuos, están dentro del rango admisible (ARCERNNR, 2020).

1.3.8. Distorsión armónica de voltaje

Se toman en cuenta dos tipos de distorsión armónica, distorsión armónica individual de voltaje y distorsión armónica total de voltaje. Los límites de factor de distorsión armónica individual y total especificados en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)

| Nivel de voltaje | Factor de distorsión de armónica individual (%) | THD (%) |
|-------------------------|--|----------------|
| Bajo voltaje | 5 | 8 |
| Medio voltaje | 3 | 5 |
| Alto voltaje (Grupo 1) | 1.5 | 2.5 |
| Alto voltaje (Grupo 2) | 1 | 1.5 |

Fuente: Regulación nacional ARCERNNR – 002/20 (ARCERNNR, 2020).

La distribuidora debe cumplir con el factor de distorsión armónica individual y total de voltaje en el punto de medición, si este valor debe ser mayor o igual al 95% en cada una de las fases, en un tiempo de evaluación de siete días continuos (ARCERNNR, 2020).

1.3.9. Desequilibrio de voltaje

El valor límite para el índice de desequilibrio de voltaje en un punto de medición será del 2% para todos los niveles de voltaje. La distribuidora cumple cuando el 95% o más de los registros, en todas las fases, en un periodo de al menos 7 días continuos, están dentro del rango admisible (ARCERNNR, 2020).

CAPÍTULO 2

Diagnóstico de los alimentadores, mediante el software y la Regulación ARCERNNR – 002/20.

El diagnóstico se realizó en los alimentadores de la subestación El Retorno, basados en los parámetros de calidad de producto, considerando la normativa nacional ARCERNNR – 002/20 y la utilización de los softwares especializados. Se realizó con la base de datos proporcionada por EMELNORTE S.A.

2.1. Metodología

A continuación, se detalla el proceso que se realizó para el análisis comparativo de los alimentadores de la subestación El Retorno, además de los resultados obtenidos por el software especializado y las diferentes alternativas de mejora para los alimentadores en caso de que estos incumplan con la regulación nacional.

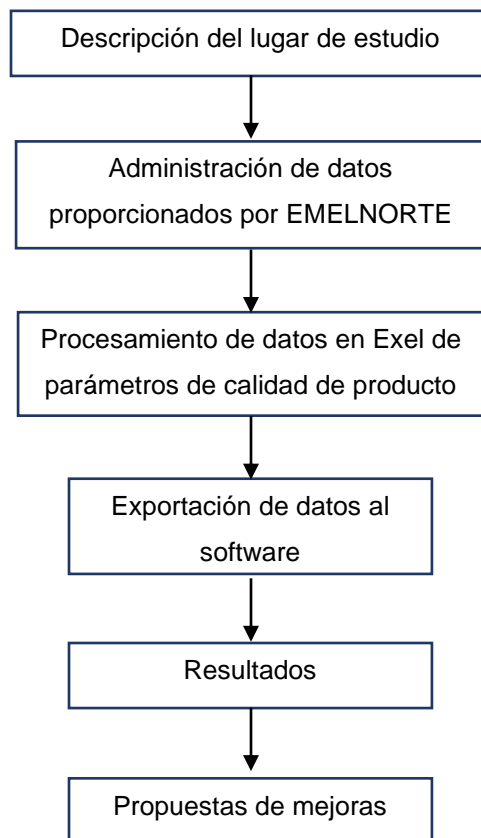


Figura 14. Metodología aplicada para el estudio del suministro eléctrico S/E El Retorno.

Fuente: Autor

Esta metodología mostrada en la Figura 14. engloba todo el desarrollo de los capítulos 2 y 3, mediante la obtención de resultados calculados en Excel y el reporte final arrojado por el software especializado, haciendo una comparación entre dichos resultados. Del análisis obtenido de esta comparación se plantean distintas posibles soluciones para mitigar los incumplimientos en base a los parámetros de calidad de productos mencionados en el capítulo 1.

2.2. Descripción del área de estudio

La Empresa Eléctrica Regional Norte tuvo su origen cuando la Empresa Eléctrica de Ibarra con la Empresa Eléctrica Tulcán, se fusionaron con la finalidad de prestar servicio eléctrico a las provincias del Carchi, Imbabura, Pichincha, Esmeraldas y Sucumbíos. Toda el área de concesión de EMELNORTE se muestra en la Figura 15.

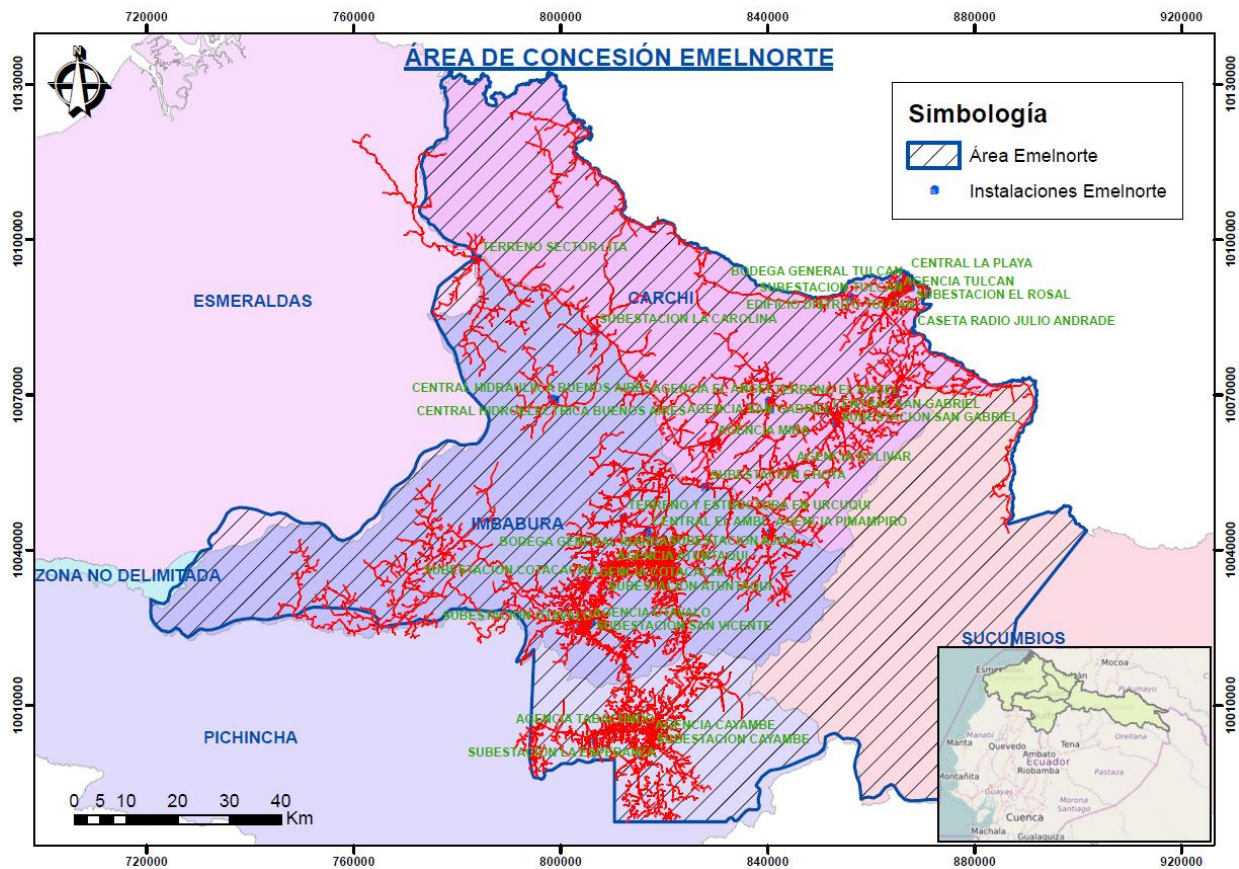


Figura 15. Área de concesión EMELNORTE líneas de transmisión.

Fuente: Centro de control SCADA, 2023

La zona de concesión de EMELNORTE, en esta se encuentra, tanto el área de servicio industrial, servicio urbano y la de servicio rural, esta área representa a 12 agencias en 15 cantones. Las Provincias y cantones a los que sirve EMELNORTE se detallan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Agencias EMELNORTE por provincia

| Provincia | Cantón |
|-------------------|-----------------------|
| Carchi | Tulcán |
| | Espejo |
| | Montufar |
| | Mira |
| | San pedro de Huaca |
| | Bolívar |
| Imbabura | Ibarra |
| | Otavalo |
| | Cotacachi |
| | Antonio Ande |
| | Pimampiro |
| | San Miguel de Urququi |
| Pichincha | Cayambe |
| | Pedro Moncayo |
| Sucumbíos | Santa Bárbara |
| Esmeraldas | Ato Tambo- Durango |

Fuente: Centro de control SCADA, 2023

EMELNORTE S.A en la actualidad toma la mayor parte de energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado, por medio de dos puntos de interconexión, el primero ubicado en la parroquia San Antonio, Subestación Ibarra en la ciudad que lleva el mismo nombre y el segundo se encuentra en la subestación Tulcán en la misma ciudad, siendo administradas por CELEC EP Transelectric.

Transelectric Subestación Ibarra

De acuerdo con (CELEC EP, 2021) se encuentran instalados dos autotransformadores con tres devanados en paralelo de 66.6/12 MVA, con una relación de transformación 138/69/13.8 kV, estos aportan alimentación al sistema de EMELNORTE en la parte centro y sur del área de concesión.

Transelectric Subestación Tulcán

Según (CELEC EP, 2021) la subestación Tulcán tiene una potencia instalada de 33/11 MVA, a un nivel de voltaje de 138/69/13.8 kV, perteneciente a TRANSELECTRIC, complementando la alimentación al sistema de EMELNORTE.

2.2.1. Sistema de subtransmisión

El sistema de subtransmisión opera a un voltaje comprendido de 69kV a 13.8kV en el que se encuentran funcionando 17 subestaciones de distribución en distintas ubicaciones como se observa en la Figura 16 y, en la Tabla 2.2 se indica el voltaje operativo y potencia nominal de las subestaciones.

Tabla 2.2. Subestaciones EMELNORTE S.A.

| Subestaciones de Distribución de EMELNORTE | | | |
|--|-------------|------------------------|------------------------|
| N° | S/E | Voltaje Operativo (kV) | Potencia Nominal (MVA) |
| 1 | Ajavi | 69/13.8 | 10 |
| 2 | Alpachaca | 69/13.8 | 20 |
| 3 | Atuntaqui | 69/13.8 | 20 |
| 4 | Cananvalle | 69/13.8 | 20 |
| 5 | Cayambe | 69/13.8 | 20/25 |
| 6 | Cotacachi | 69/13.8 | 10 |
| 7 | El Ángel | 69/13.8 | 2.5 |
| 8 | El Chota | 69/13.8 | 10 |
| 9 | El Retorno | 69/13.8 | 10 |
| 10 | El Rosal | 69/13.8 | 20 |
| 11 | Esperanza | 69/13.8 | 10 |
| 12 | La Carolina | 69/13.8 | 5 |
| 13 | Otavalo | 69/13.8 | 10 |
| 14 | San Agustín | 69/13.8 | 10 |
| 15 | San Gabriel | 69/13.8 | 10 |
| 16 | San Vicente | 69/13.8 | 10 |
| 17 | Tulcán | 69/13.8 | 10 |

Fuente: Centro de control SCADA, 2023

En la Figura 17 se observa la conexión de las subestaciones, además de la interconexión entre TRANSELECTRIC y EMELNORTE, los voltajes de operación de las distintas líneas marcadas por colores. También se visualizan los distintos sistemas de generación que están conectadas al sistema de EMELNORTE.

2.2.2. Localización

El área en donde se realizará el análisis de calidad de producto en el presente trabajo de titulación es la zona de concesión de la subestación El Retorno. La subestación "El Retomo" se encuentra ubicada en la ciudad de Ibarra, en la avenida Atahualpa al lado oeste de la cooperativa "La Pradera". Esta subestación tiene barra simple tanto en baja tensión como en alta tensión, por medio de un transformador de 10 MVA de capacidad, a refrigeración de aire y aceite, y de 12,5 MVA, con refrigeración a aire forzado, convierte el voltaje de subtransmisión de 69kV a 13.8kV, voltaje de distribución. En la Tabla 2.3, se presenta el detalle del total de los elementos que están dentro de la concesión de la subestación pertenecientes a las líneas de medio y bajo voltaje, además las características más importantes de estos.

Tabla 2.3. Elementos Subestación El Retorno.

| Elementos Concesión Subestación El Retorno | |
|---|-----------------|
| Elemento | Cantidad |
| Poste de Hormigón | 6698 |
| Poste Plástico | 89 |
| Poste Metálico | 403 |
| Luminarias | 7614 |
| Transformadores | 1225 |

Fuente: Centro de control SCADA, 2023

En la Tabla 2.3 se especifica la cantidad total de los distintos elementos, dichos elementos tienen distintas.

2.2.3. Características de funcionamiento

La subestación cuenta con un transformador trifásico de 12.5 MVA que realiza la transformación de 69 kV a 13.8 kV. Se tiene 5 alimentadores R1, R2, R3 (Banco de Capacitores), R4, R5. Cada alimentador tiene sus respectivas protecciones con relés y demás implementos como se observa en la Figura 18.

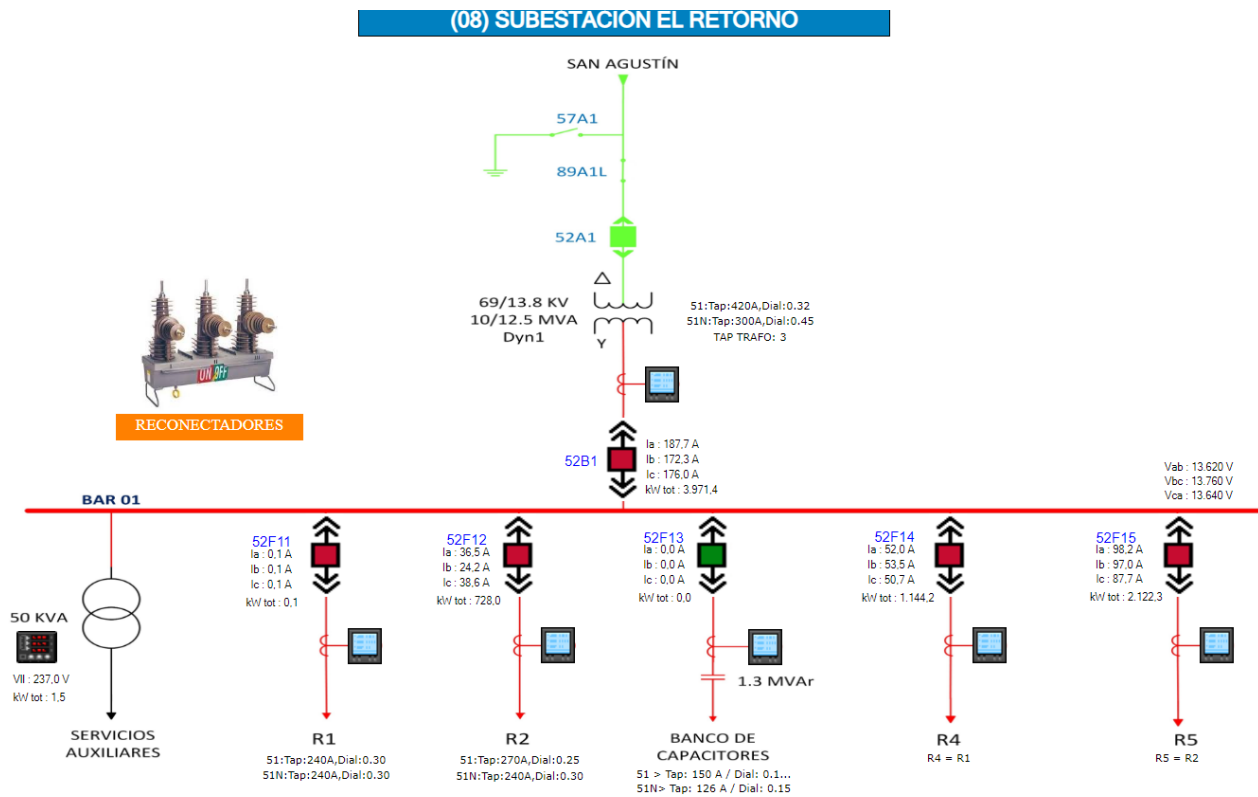


Figura 18. Diagrama unifilar S/E El Retorno.

Fuente: Autor

Esta subestación tiene tres alimentadores que están prestando servicio, ya que para los casos de R3(Banco de Capacitores) y el R1 no tiene cargas conectada. Cada uno de estos alimentadores tiene sus características propias las cuales se detallan a continuación.

2.2.4. Características energéticas

Circuito Uno (R1)

El circuito número uno de la subestación bajo estudio posee una carga casi en 0, esto se debe a que este circuito se lo utiliza para transferencias de cargas o mantenimiento, por lo que en este alimentador no se obtendrán incumplimientos.

Circuito Dos (R2)

El circuito dos se caracteriza por poseer consumidores predominantemente del tipo rural, razón por la cual se puede añadir que es un circuito relativamente largo en comparación con los otros tres circuitos de esta subestación.

Circuito Tres (R3) (BANCO DE CAPACITORES)

Este alimentador es para el banco de capacitores, por lo que no se tiene ninguna carga conectada a él. Por lo que se deduce que este alimentador no se incluirá en el procesamiento realizados en Excel, esto también se incluye en el informe de resultados arrojado por el software especializado.

Circuito Cuatro

El cuarto alimentador se caracteriza por tener un tipo de consumidor predominante residencial urbano, es por esto que, como se observa en la Figura 2.4 se tiene mayor amperaje a comparación de R2.

Circuito Cinco

Para circuito cinco se tiene como tipo de consumidor predominante al consumidor de tipo industrial, que a comparación a todos los alimentadores esta tiene el mayor valor de amperaje registrado.

2.3. Administración de datos proporcionados por EMELNORTE

La base de datos contiene mediciones de los medidores de calidad de energía instalados en las cabeceras de los alimentadores. Estas mediciones son tomadas cada 10 minutos, cumpliendo con la regulación nacional, por lo que es necesario realizar filtros en algunas mediciones ya que están tomadas cada 5 min. Además, es necesario revisar los datos, con el fin de identificar los espacios en blanco donde las mediciones de los equipos no registran valores, esto ayuda con el procesamiento de datos que se realizaran en Excel, por lo que se obtiene una representación gráfica más precisa. Esto se aplica para todos los indicadores. La base de datos se extrae del software especializado Power Monitoring Expert (PME).

2.4. Procesamiento de datos en Excel de parámetros de calidad de producto

Mediante la utilización de la herramienta de Excel se procesan los datos en distintos parámetros de calidad de producto, estos parámetros son los que se especifican en la Regulación Nacional ARCERNR – 002/20.

2.4.1. Nivel de voltaje

Para el procesamiento de datos del nivel de voltaje se debe plantear valores base que serán los límites para visualizar los incumplimientos de cada uno de los alimentadores. En la tabla 2.4 se muestran los valores bases con los que se calcula el nivel de voltaje.

Tabla 2.4. Límites de voltaje.

| | |
|-----------------|-------|
| Voltaje nominal | 13800 |
| 6% | 828 |
| Lim Superior | 14628 |
| Lim Inferior | 12972 |

Fuente: Autor

El voltaje nominal es el utilizado por todos los alimentadores que corresponde a 13800V por lo que este voltaje pertenece a Medio Voltaje (600V - 40kV) por lo que según la regulación nacional para el parámetro de nivel de voltaje el límite debe ser de $\pm 6\%$ del voltaje nominal, estableciendo así un límite superior e inferior. En la Tabla 2.9. se calcularon el número de incumplimientos por cada circuito y fase registrados por las mediciones de la base de datos. El conteo de incumplimientos se realiza mediante la función en Excel llamada CONTAR y se la utiliza de la siguiente forma:

$$=CONTAR.SI(X:Y,">Z")$$

En donde:

X: es el inicio del rango.

Y: es el fin del rango.

Z: El valor limite que se quiere buscar.

Es necesario que X y Y estén en la misma Columna para realizar el procesamiento.

La base de datos es de 4 meses correspondientes a noviembre 2022 hasta febrero 2023. Se realizó el estudio en estos meses debido a que en este periodo de tiempo se registra la mayor de manada de energía en el país, por causa de las festividades de Navidad y año nuevo. Esto se debe a que, por costumbres, se instalan una infinidad de luces navideñas para adornar las viviendas, centros comerciales, edificios, tiendas, entre otros, lo que causa un mayor consumo de energía eléctrica lo que conlleva a tener un mayor número de incumplimientos de la regulación nacional.

Mes de noviembre 2022.

Tabla 2.5. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de noviembre.

| Incumplimientos mes de noviembre | | |
|----------------------------------|----------|----------|
| | Semana 1 | Semana 2 |
| Fase A | 0 | 0 |
| Fase B | 0 | 0 |
| Fase C | 0 | 0 |

Fuente: Autor

Como resultado, en la Tabla 2.5, no hay ningún incumplimiento de la regulación en el mes de noviembre.

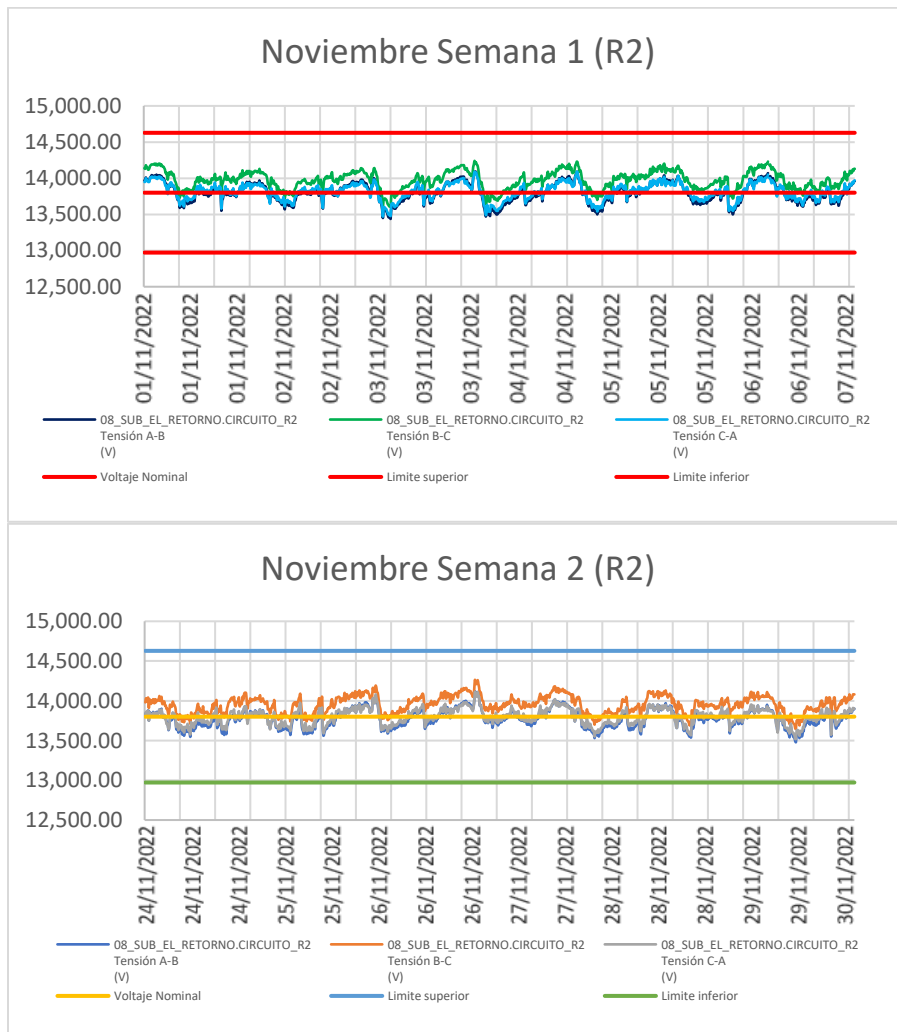


Figura 19. Niveles de Voltaje circuito R2 noviembre 2022.

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 19, en las dos semanas calculadas no se obtiene ningún incumplimiento, además de que al comparar la semana 1 con la semana 2 se observa que en la segunda semana existe mayor variación de voltaje, esta es causada por la demanda de energía que va en aumento conforme se acerca las fechas de festividades.

Mes de diciembre 2022.

Tabla 2.6. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de diciembre.

| Incumplimientos mes de Diciembre | | |
|----------------------------------|----------|----------|
| | Semana 1 | Semana 2 |
| Fase A | 0 | 0 |
| Fase B | 0 | 0 |
| Fase C | 0 | 0 |

Fuente: Autor

En el mes de diciembre no hubo incumplimientos de la normativa, como se observa en la Tabla 2.6.

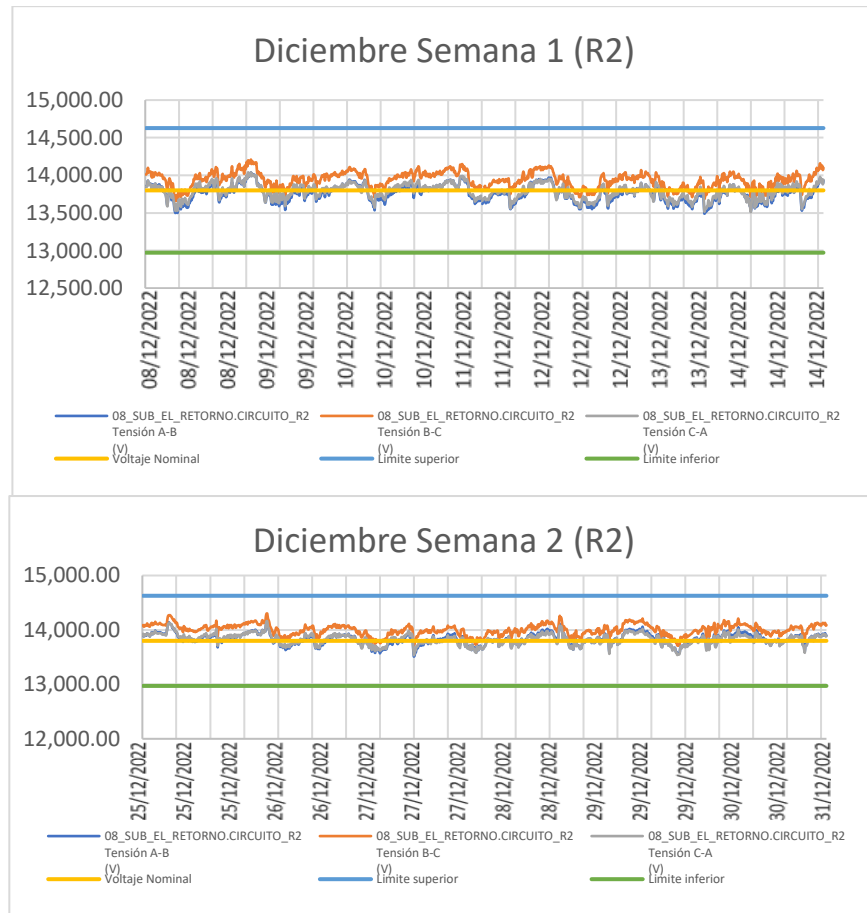


Figura 20. Niveles de Voltaje circuito R2 diciembre 2022.

Fuente: Autor

Este es el de mayor demanda debido a la festividad de navidad, y como nos muestra la Figura 20, en las dos semanas el voltaje no es constante, más sin embargo no se incumple con la regulación nacional.

Mes de enero 2023.

Tabla 2.7. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de enero.

| Incumplimientos mes de Enero | | |
|------------------------------|----------|----------|
| | Semana 1 | Semana 2 |
| Fase A | 0 | 0 |
| Fase B | 0 | 0 |
| Fase C | 0 | 0 |

Fuente: Autor

En la Tabla 2.7, se obtiene un resultado positivo ya que no existe ningún incumplimiento de la regulación.

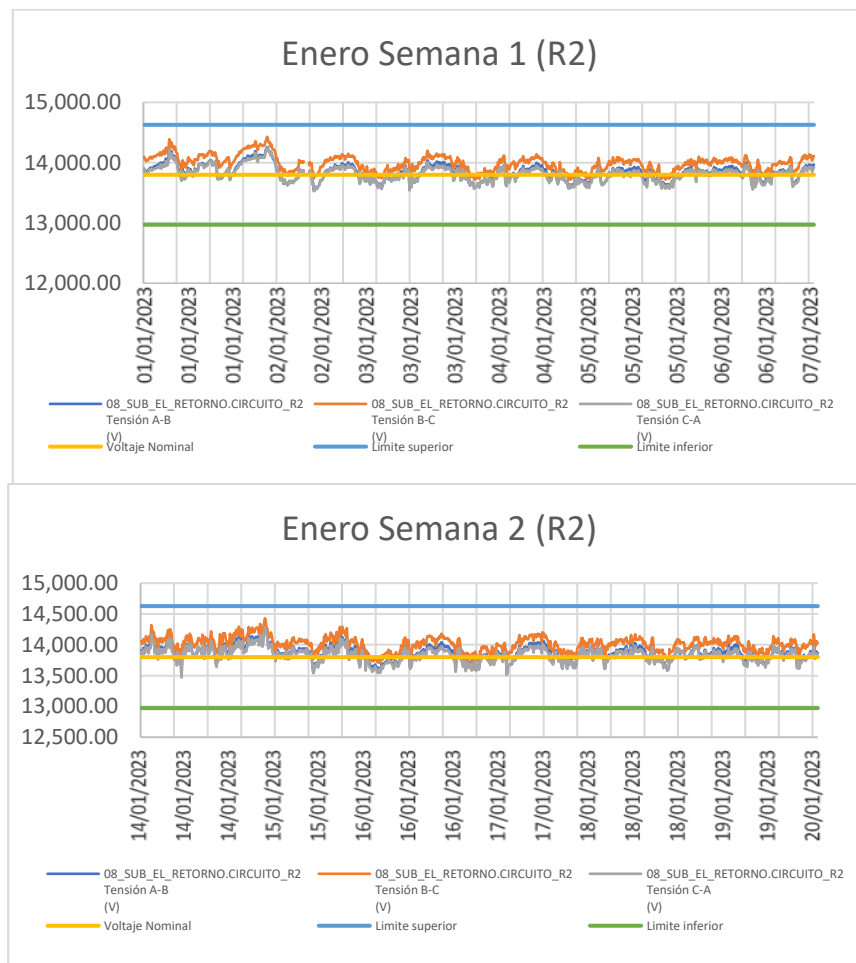


Figura 21. Niveles de Voltaje circuito R2 enero 2023.

Fuente: Centro de control SCADA

Para el mes de enero observa que en la Figura 21, al principio del mes el voltaje tiene una variación constante y al transcurrir los días esta se va estabilizando.

Mes de febrero 2023.

Tabla 2.8. Incumplimientos Niveles de voltaje, mes de febrero.

| Incumplimientos mes de Enero | | |
|------------------------------|----------|----------|
| | Semana 1 | Semana 2 |
| Fase A | 0 | 0 |
| Fase B | 0 | 0 |
| Fase C | 0 | 0 |

Fuente: Autor

En el mes de febrero no se tienen incumplimientos de la regulación como se muestra en la Tabla 2.8, por lo que el voltaje se mantiene dentro de los límites establecidos.

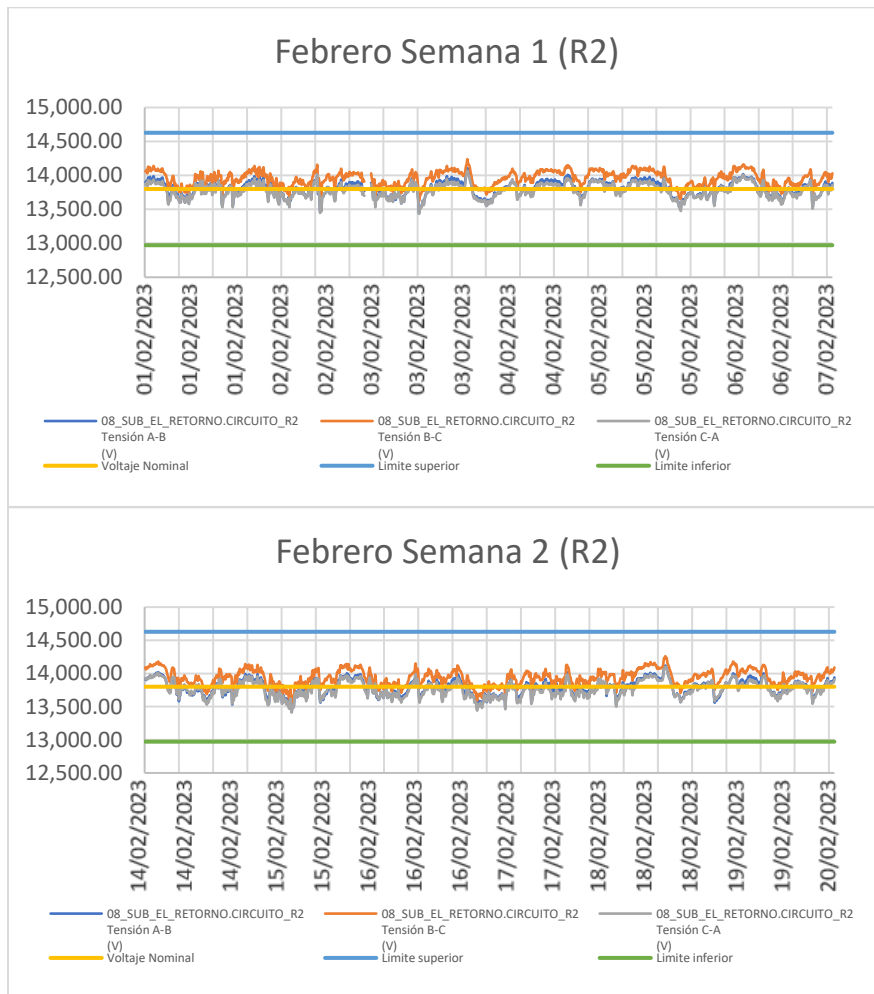


Figura 22. Niveles de Voltaje circuito R2 febrero 2023.

Fuente: Autor

El voltaje se mantiene dentro de los límites establecidos por la regulación, como se observa en la Figura 22.

2.4.2. Perturbación rápida de voltaje (Flicker)

| | |
|--------|---|
| Límite | 1 |
|--------|---|

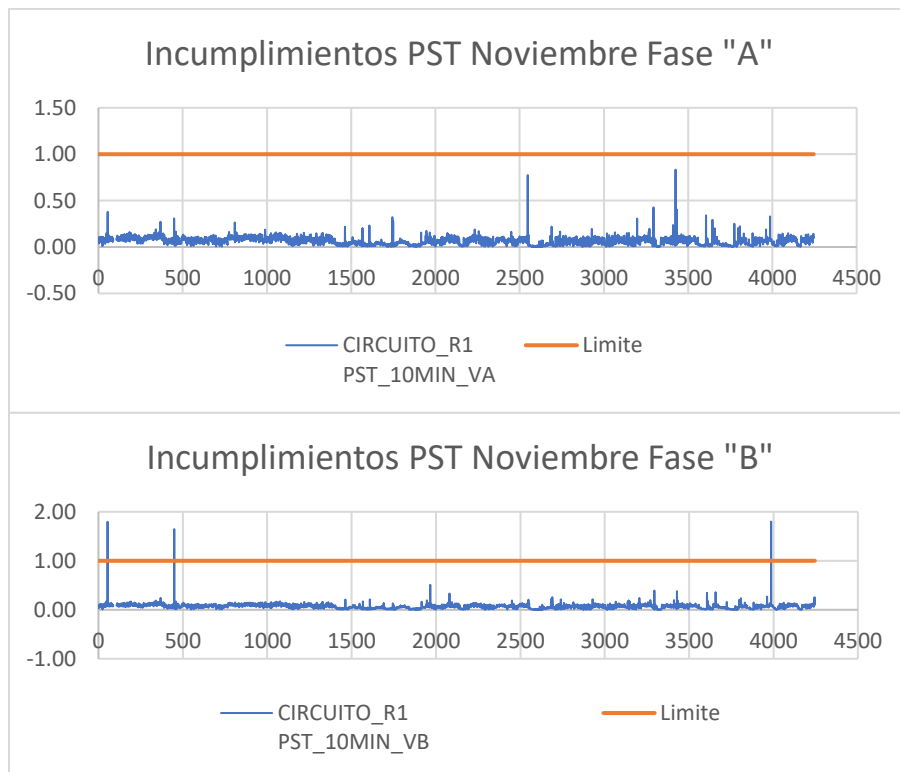
Mes de noviembre 2022.

Tabla 2.9. Incumplimientos Flicker, mes de noviembre.

| Incumplimientos mes de Noviembre | | | |
|----------------------------------|-----------------|---------------------|--|
| | Incumplimientos | Incumplimientos (%) | |
| Fase A | 0 | 0.00% | |
| Fase B | 3 | 0.07% | |
| Fase C | 2 | 0.05% | |

Fuente: Autor

Se registraron algunos incumplimientos como muestra la Tabla 2.9, en la que se resumen el número de veces en los que se sobrepasa el límite.



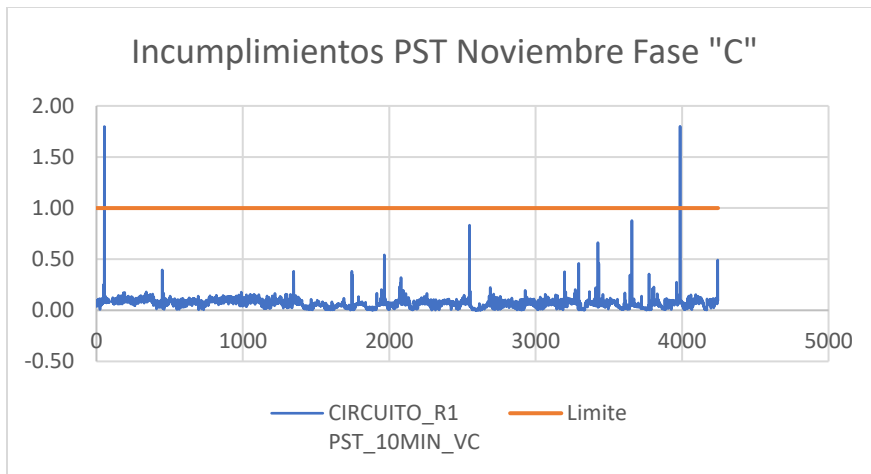


Figura 23. Incumplimientos Flicker noviembre 2022.

Fuente: Autor

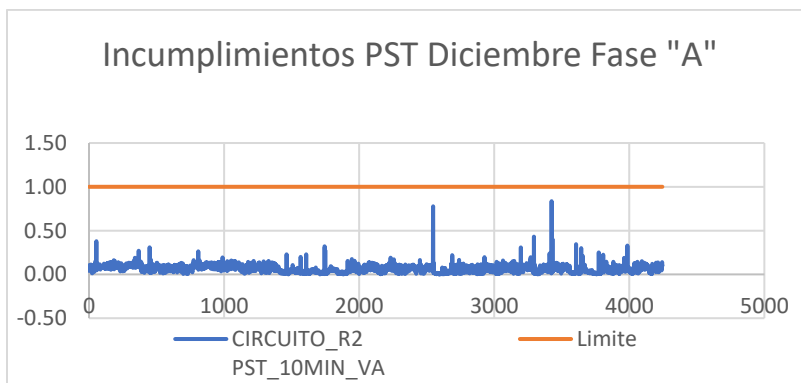
En la Figura 23 se visualizan los puntos de incumplimientos en el mes de noviembre, más sin embargo la empresa no incumple con la regulación nacional ya que esta permite hasta un 5% del total de datos que sobrepasen el límite de la regulación.

Mes de diciembre 2022.

Tabla 2.10. Incumplimientos Flicker, mes de diciembre.

| Incumplimientos mes de Diciembre | | |
|----------------------------------|-----------------|---------------------|
| | Incumplimientos | Incumplimientos (%) |
| Fase A | 0 | 0.00% |
| Fase B | 3 | 0.07% |
| Fase C | 2 | 0.05% |

Fuente: Autor



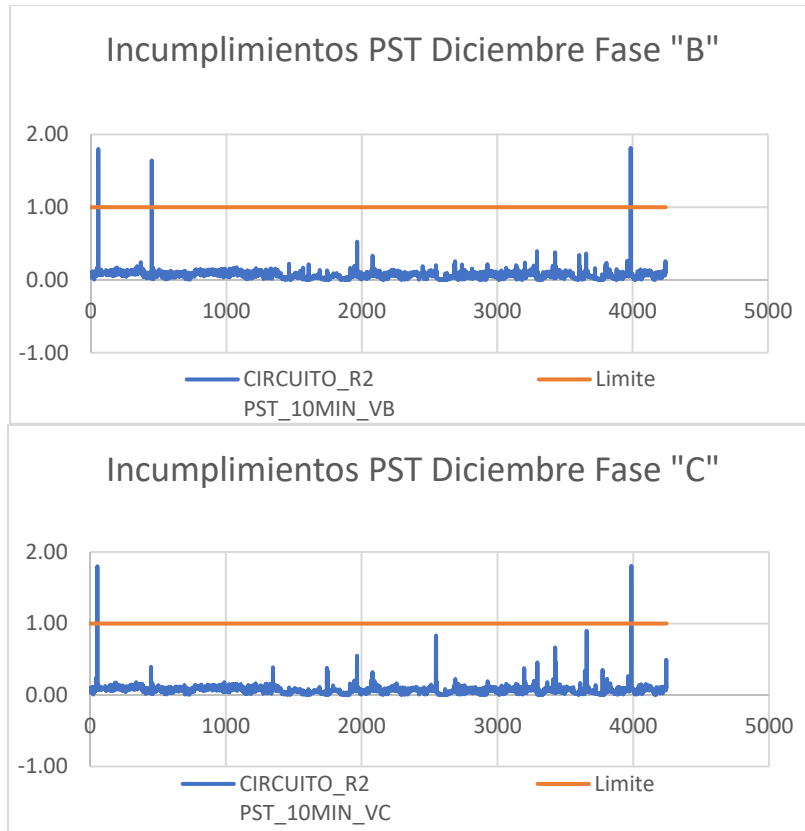


Figura 24. Incumplimientos Flicker diciembre 2022.

Fuente: Autor

En la figura 24. se observa los incumplimientos que se tiene en el mes, estos no superan el 5%, así que no incumplen con la regulación nacional.

Mes de enero 2023.

Tabla 2.11. Incumplimientos Flicker, mes de enero.

| Incumplimientos mes de Diciembre | | |
|----------------------------------|-----------------|---------------------|
| | Incumplimientos | Incumplimientos (%) |
| Fase A | 1 | 0.02% |
| Fase B | 3 | 0.07% |
| Fase C | 3 | 0.07% |

Tabla 2.11

En la Tabla 2.11, aumenta el número incumplimientos respecto a los anteriores meses.

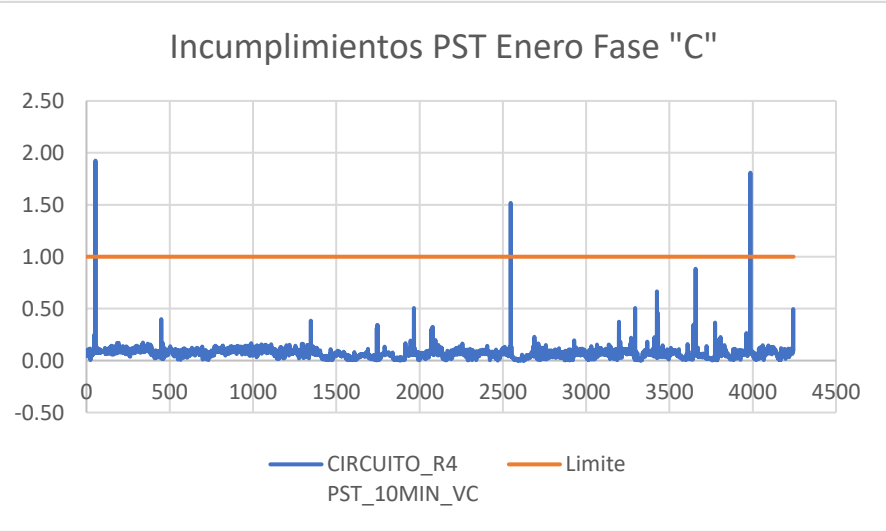
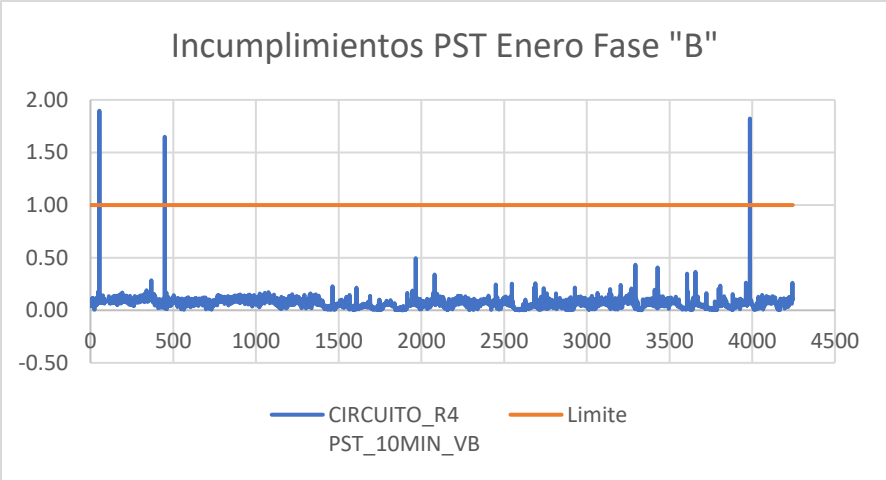
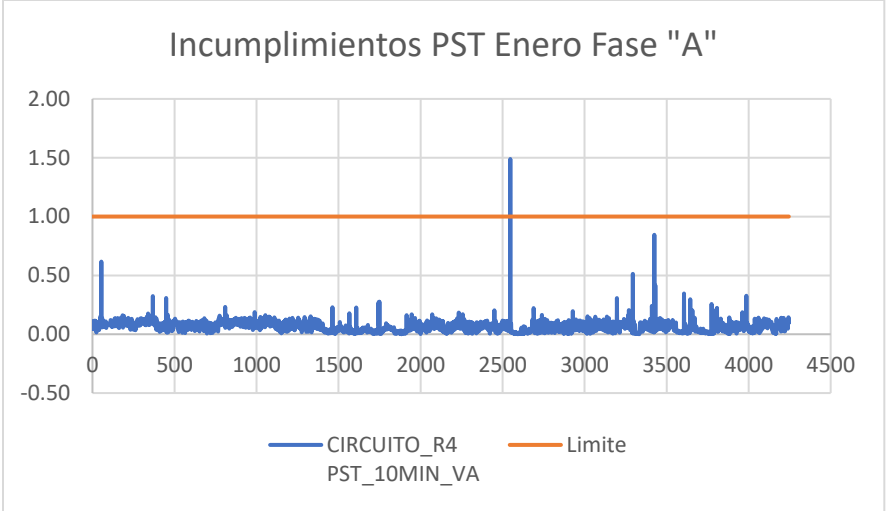


Figura 25. Incumplimientos Flicker enero 2023.
Fuente: Autor

La Figura 25. se visualizan los puntos en los que se incumple, más sin embargo estas no superan el 5% del total de la base de datos tomados para el procesamiento de datos.

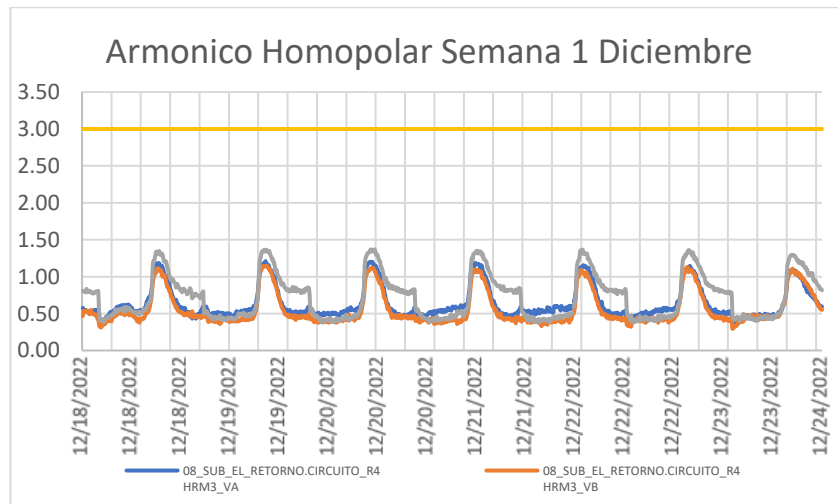
2.4.3. Procesamiento de datos distorsión armónica de voltaje

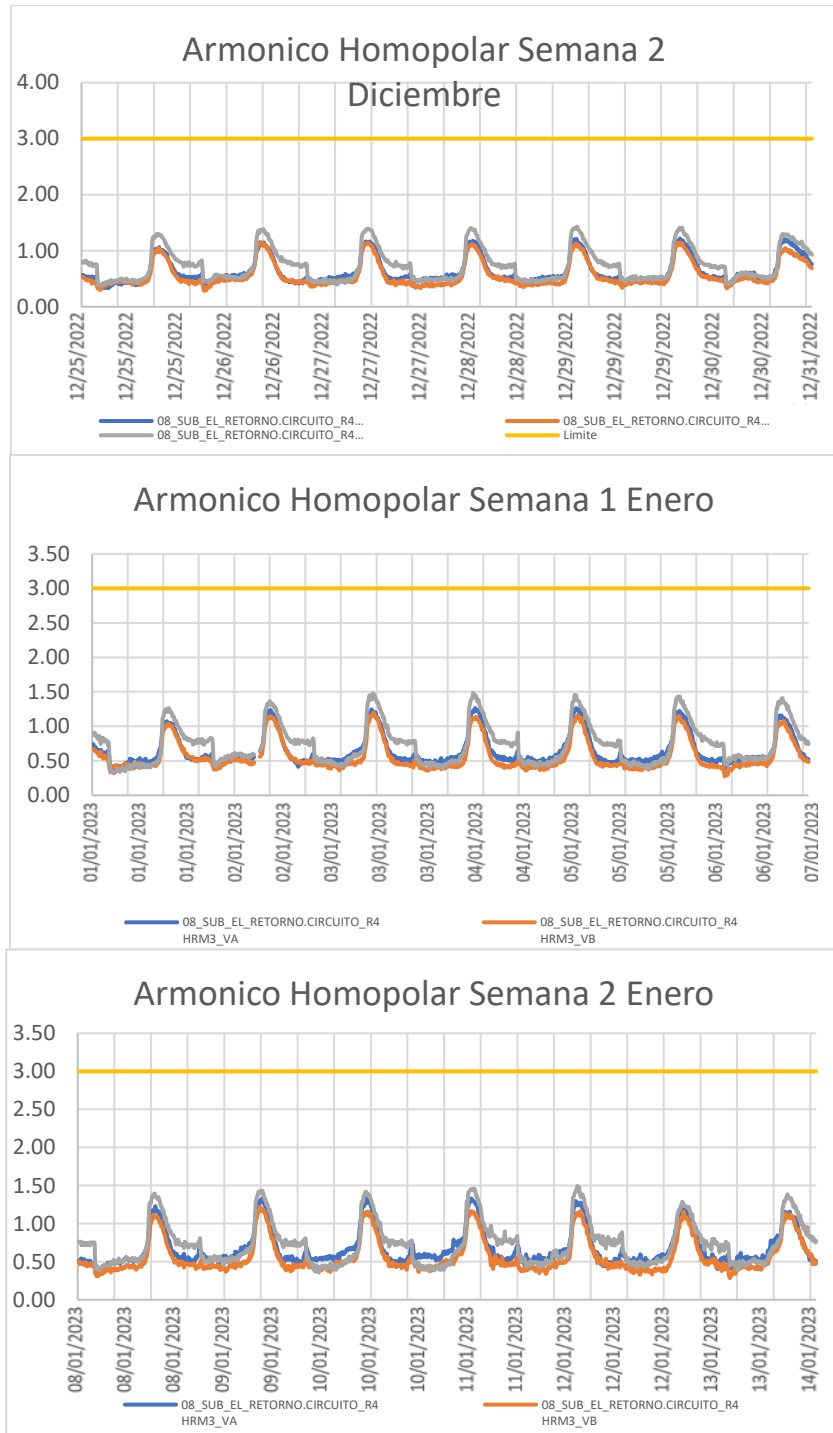
Tabla 2.12. Incumplimientos armónicos de voltaje por mes.

| Armónicos mes de Noviembre | | | Armónicos mes de Diciembre | | |
|----------------------------|---|----------|----------------------------|---|----------|
| Incumplimientos | A | 0 0.000% | Incumplimientos | A | 0 0.000% |
| | B | 0 0.000% | | B | 0 0.000% |
| | C | 0 0.000% | | C | 0 0.000% |
| Armónicos mes de Enero | | | Armónicos mes de Febrero | | |
| Incumplimientos | A | 0 0.000% | Incumplimientos | A | 0 0.000% |
| | B | 0 0.000% | | B | 0 0.000% |
| | C | 0 0.000% | | C | 0 0.000% |

Fuente: Autor

En la Tabla 2.12, se observa que no hay incumplimientos de la regulación nacional en los meses analizados, por lo que el estado del suministro eléctrico de los alimentadores no registra ninguna anomalía de armónicos de voltaje.





Fuente: Autor

2.4.4. Desequilibrio de voltaje

En el procesamiento realizados en niveles de voltaje, los valores no varían en las fases, por lo que no es necesario hacer el procesamiento de datos de desequilibrio de voltaje, ya que estas no presentan un problema de desequilibrio.

2.5. Procesamiento de datos tomados aguas debajo de los alimentadores de la subestación El Retorno

La base de datos proporcionada por EMELNORTE SA, también incluye mediciones tomadas aguas debajo de los alimentadores de la subestación El Retorno, esto nos permite realizar una comparación entre los valores calculados de la base de datos. Se tiene diferentes mediciones de abonados, por lo que solo tomamos en cuenta las que presentan diferentes incumplimientos de la regulación nacional.

2.5.1. Nivel de voltaje

Para el procesamiento de datos se tomarán valores base con los que se delimitara los incumplimientos con gráficas, en caso de que estas presenten incumplimientos. Se tienen varios abonados, se omitirán los nombres de los clientes y se los nombrara con el número de transformador al que están conectados.

Tabla 2.13. Valores iniciales para el procesamiento de datos de los niveles de voltaje.

| | | | |
|----------------------|-------|---|-----|
| V nominal (V) | 120 | Por regulación es el 8% bajo voltaje | 9.6 |
| Lim sup (V) | 129.6 | | |
| Lim inf (V) | 110.4 | | |

Fuente: Autor

Tabla 2.14. Resumen, incumplimientos niveles de voltaje.

| Nivel de voltaje (Resumen) | | | | | |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------|
| Numero de Transformador | L1 | | L2 | | % |
| | Limite Sup | Limite Inf | Limite Sup | Limite Inf | |
| 11843-1F-15kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12586-1F-50kA | 24 | 2.38 | 7 | 0.69 | 2.38 |
| 21934-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21822-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12492-1F-5kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12551-1F-37,5kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12145-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11572-1F-15kVA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Autor

Con los nuevos valores base, se calcula mediante el mismo proceso que se realizó en los alimentadores, hay que tomar en cuenta que para los siguientes casos en bajo voltaje serán en sistemas monofásicos.

Para todos los casos, se cumple con la regulación nacional, estas están dentro de los límites permitidos como se observa en la Tabla 2.14. Para el caso de 12586 hay un leve número de incumplimientos, pero no superan el 5% del total de datos analizados.

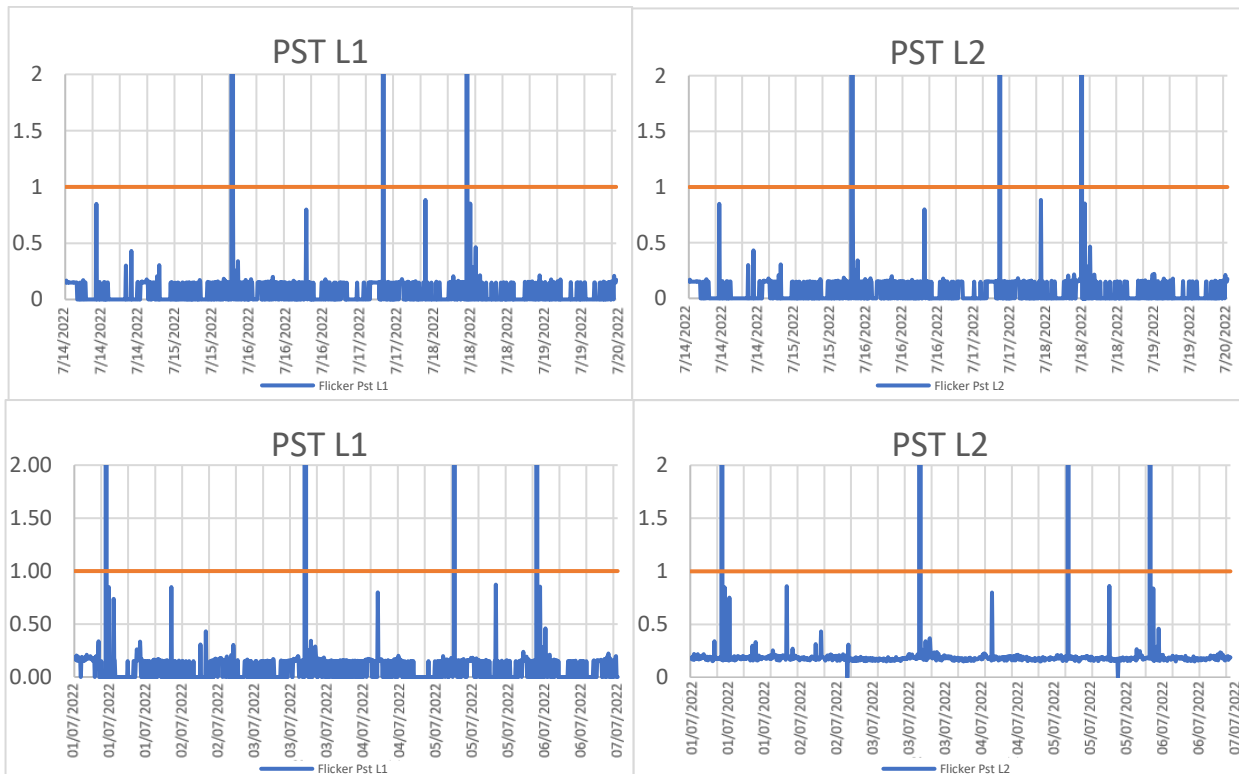
2.5.2. Perturbaciones rápidas de voltaje

Debido a que es un sistema monofásico, para calcular las perturbaciones rápidas de voltaje(flicker) el límite permitido son los valores menores a 1, en caso de que estos incumplan estos deberán superar el 5% de incumplimientos del total de los 1008 datos.

Tabla 2.15. Resumen, incumplimientos Flickers.

| Perturbaciones rápidas de voltaje | | | | |
|-----------------------------------|----|-----|----|-----|
| | L1 | % | L2 | % |
| 11843-1F-15kVA | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 |
| 12586-1F-50kA | 5 | 0.5 | 5 | 0.5 |
| 21934-1F-10kVA | 4 | 0.4 | 4 | 0.4 |
| 21822-1F-10kVA | 1 | 0.1 | 1 | 0.1 |
| 12492-1F-5kVA | 2 | 0.2 | 2 | 0.2 |
| 12551-1F-37,5kVA | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12145-1F-10kVA | 1 | 0.1 | 1 | 0.1 |
| FN6-11572-77317-1F-15kVA | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 |

Fuente: Autor



Fuente: Autor

Como se observa en la Tabla 2.15, ninguno de los casos analizados incumple con la regulación nacional, a pesar de que si se presentan algunos incumplimientos estos no llegan a superar el 5% del total de datos analizados.

2.5.3. Distorsión armónica de voltaje

Para el procesamiento de datos de distorsión armónica se deberá realizar del THD y THD (individual). Según la regulación nacional para THD se tiene como limite el 8% para bajo voltaje y para el caso de THD (individual) este no deberá superar el 5% para bajo voltaje.

Tabla 2.16. Resumen, incumplimientos THD.

| THD | | | |
|------------------|----|----|------|
| | L1 | L2 | % |
| 11843-1F-15kVA | 0 | 0 | 0 |
| 12586-1F-50kA | 0 | 0 | 0 |
| 21934-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 |
| 21822-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 |
| 12492-1F-5kVA | 0 | 0 | 0 |
| 12551-1F-37,5kVA | 0 | 0 | 0 |
| 12145-1F-10kVA | 0 | 0 | 0 |
| 11572-1F-15kVA | 59 | 59 | 5.85 |

Fuente: Autor

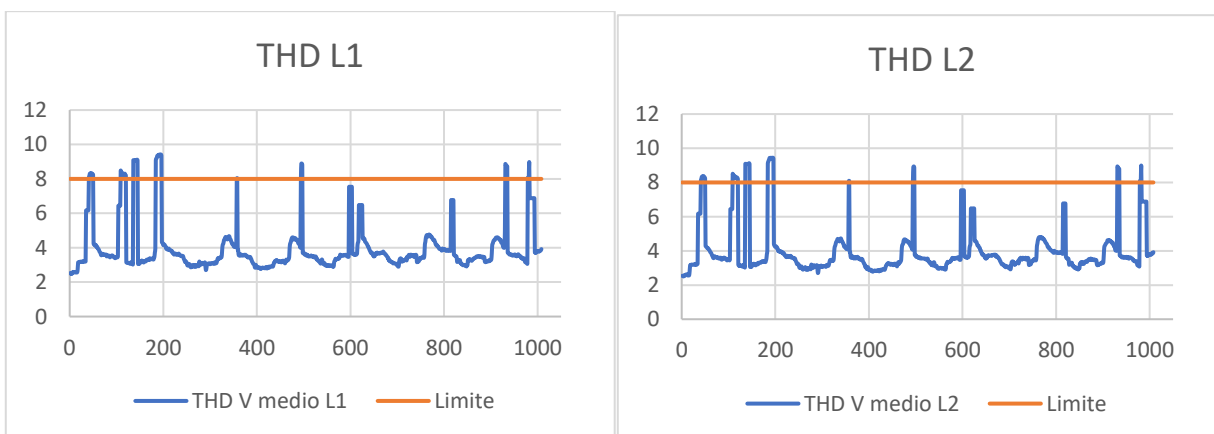


Figura 26. Incumplimientos THD.

Fuente: Autor

Como se observa en la Tabla 2.16 y en la Figura 26., la mayoría de los casos no presentan incumplimientos. En el caso de 11572, presenta varios incumplimientos de THD en L1 y L2 superando el 5% de incumplimientos del total de datos analizados.

Tabla 2.17. Resumen, incumplimientos THD individual.

| THD (individual) | | | | |
|------------------|-------------|-----|-----|------|
| | Armónico | L1 | L2 | % |
| 11843-1F-15kVA | | 0 | 0 | 0 |
| 12586-1F-50kA | 3° armónico | 32 | 0 | 3.2 |
| 21934-1F-10kVA | 3° armónico | 163 | 158 | 16.2 |
| 21822-1F-10kVA | 3° armónico | 156 | 151 | 15.5 |
| 12492-1F-5kVA | | 0 | 0 | 0 |
| 12551-1F-37,5kVA | | 0 | 0 | 0 |
| 12145-1F-10kVA | 3° armónico | 156 | 151 | 15.5 |
| 11572-1F-15kVA | 3° armónico | 52 | 40 | 5.15 |

Fuente: Autor

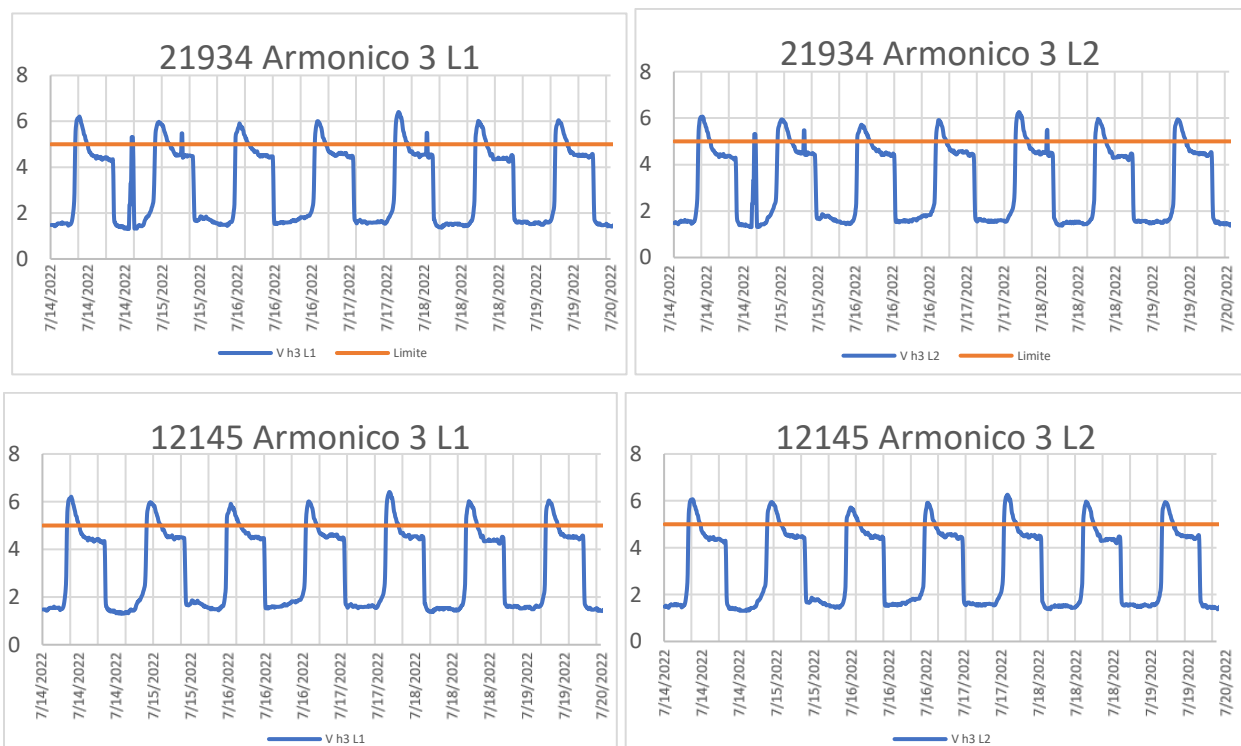


Figura 27. THD individual Armónico de tercer orden.

Fuente: Autor

Para el THD (individual) se calcularon todos los armónicos de voltaje del 1 al 50, es por esto, que para mayor comprensión se realizó la Tabla 2.17, la cual muestra un resumen de los incumplimientos que se tiene por número de armónico. En el caso de 12586 se tiene 32 incumplimientos, estos representan el 3.2% del total por lo que no incumplen con la regulación como se observa en la Figura 27. Para los casos de incumplimiento presentan una gran cantidad de armónicos de voltaje en sus dos fases L1 y L2, estas llegan a superar el 5% del total de datos analizados, por lo que incumple con la regulación nacional.

Para los casos de 12586 y 12551 pertenecientes al alimentador El Retorno 5 el cual tiene una distancia total de 5.7 Km desde la subestación hasta el punto final del circuito, se encuentran ubicados a una distancia de 3.66 Km para 12586 y a una distancia de 2.66 Km para 12551.

Para los casos de 12492 y 21934 pertenecientes al alimentador El Retorno 4 el cual tiene una distancia total de 5.3 Km desde la subestación hasta el punto final del circuito, se encuentran ubicados a una distancia de 3.55 Km para 21934 y a una distancia de 2.97 Km para 12492.

2.5.4. Desequilibrio de voltaje

El límite establecido por la regulación no debe superar el 2%, y del total de datos analizados no debe representar más del 5%.

Tabla 2.17. Resumen, incumplimientos Desequilibrio de voltaje.

| Desequilibrio de voltaje | | |
|--------------------------|-----------------|---|
| | Incumplimientos | % |
| 11843-1F-15kVA | 0 | 0 |
| 12586-1F-50kA | 0 | 0 |
| 21934-1F-10kVA | 0 | 0 |
| 21822-1F-10kVA | 0 | 0 |
| 12492-1F-5kVA | 0 | 0 |
| 12551-1F-37,5kVA | 0 | 0 |
| 12145-1F-10kVA | 0 | 0 |
| 11572-1F-15kVA | 0 | 0 |

Fuente: Autor

No se incumple la regulación nacional en ninguno de los casos de las mediciones calculadas Tabla 2.17, estas están dentro de los límites permitidos.

2.6. Exportación de datos

Para la exportación de datos utilizaremos el software especializado Power Monitoring Expert (PME), mediante el cual utilizaremos la herramienta llamada Power Advisor, con el que generaremos un informe detallado del estado actual de los alimentadores de la subestación el Retorno.

2.6.1. EcoStruxure Power Monitoring Expert (PME)

El Software de monitoreo de energía proporciona información sobre el estado del sistema eléctrico y la eficiencia energética para que pueda tomar decisiones fundamentadas que mejoren el rendimiento. Convierta los datos en acción y libere todo el potencial de su sistema con herramientas avanzadas de visualización y análisis de energía.

2.6.2. Power advisor

Power Advisor es un servicio único, asequible y de rápida implantación que aprovecha los datos de su sistema eléctrico. Basado en análisis e ingenieros expertos, detecta y prioriza los problemas de la red eléctrica y la calidad de los datos en cualquier punto de su sistema, recomendando formas de corregirlos. Estas recomendaciones automatizadas y expertas hacen que su equipo pase de horas improductivas a trabajo de alto valor a través de dos categorías básicas de análisis:

- Calidad de datos
- Red eléctrica
- Resumen ejecutivo

2.6.3. Cómo funciona Power Advisor

Los análisis de Power Advisor se ejecutan varias veces al año, ajustándose dinámicamente a los cambios de su sistema para garantizar un rendimiento óptimo del mismo.

- Recogida de datos
- Diagrama unifilar (recomendado para análisis ampliados)
- Calidad de datos y análisis de redes eléctricas
- Consulta de expertos
- Servicios correctivos específicos
- Seguimiento

2.6.4. Exportación de los datos hacia la nube

Configuración de PME para compartir datos automáticamente

Es necesario configurar los Servicios Conectados de Power Monitoring Expert para que compartan automáticamente los datos del sistema de gestión de energía. El intercambio automático de datos es compatible con Power Monitoring Expert 9.0 CU2 o posterior. Para todos los demás sistemas de gestión de energía, se deben extraer los datos manualmente.

- NOTA: Se debe adquirir una suscripción al servicio digital antes de poder cargar datos y utilizar Power Advisor.
- NOTA: Deben transcurrir 30 días, después de que se hayan habilitado los Servicios Conectados y se le haya asociado con el sitio de Power Advisor, para que los datos de análisis estén disponibles en Power Advisor.

Para configurar PME para compartir datos automáticamente, se deben seguir los siguientes pasos (Para PME 2020 CU1 y versiones posteriores):

1. En Power Monitoring Expert, abra el sitio Aplicaciones web e inicie sesión con una cuenta de nivel supervisor, al ingresar se visualiza el panel principal Figura 28.

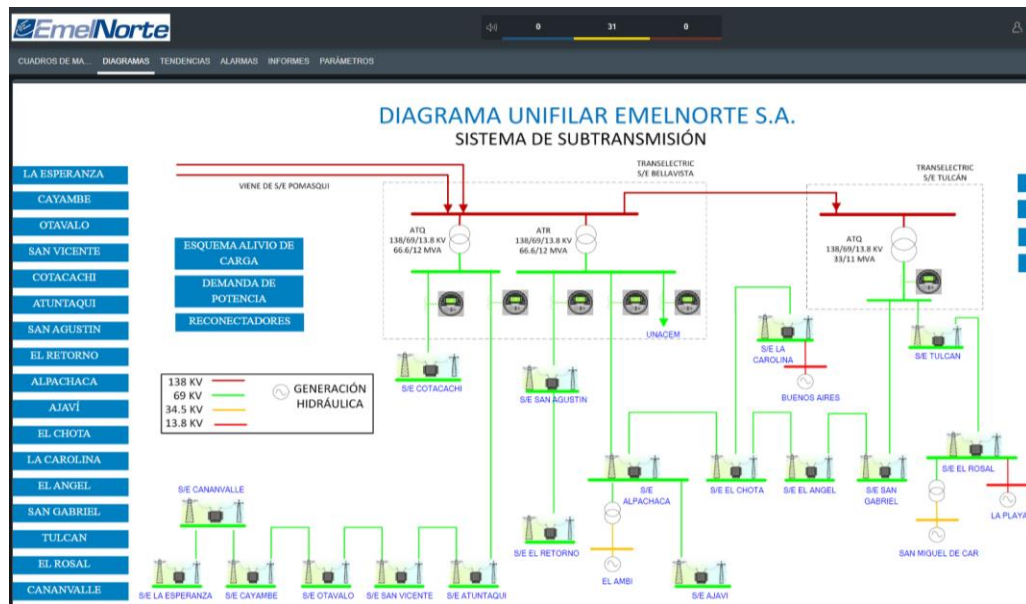


Figura 28. Panel principal PME.

2. Haga clic en PARAMETROS como se indica en la Figura 29.

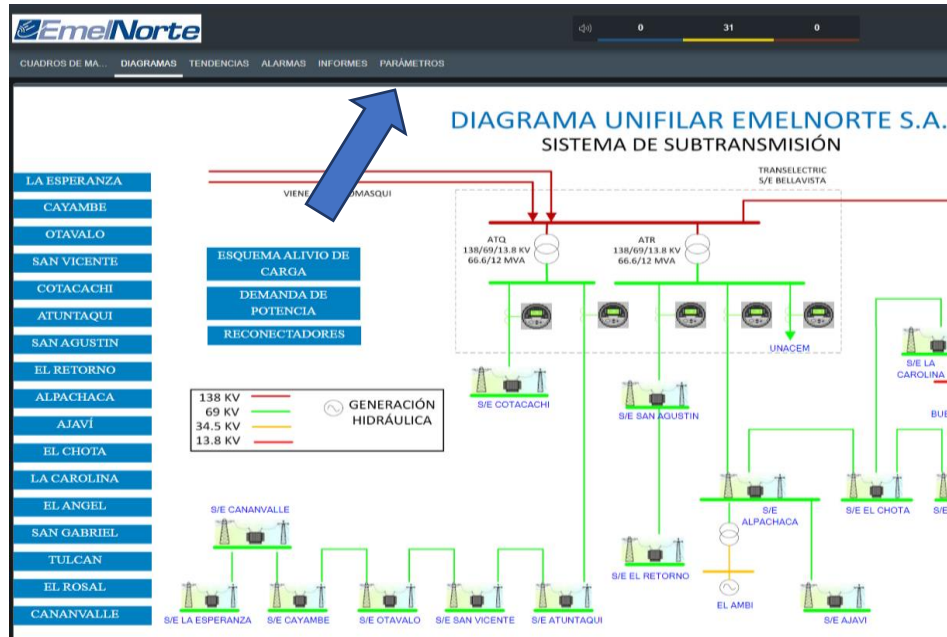


Figura 29. Panel principal PME direccionado en parámetros.

3. Haga clic en Configuración > Registro y análisis > Registro, visualizar en la Figura 30.

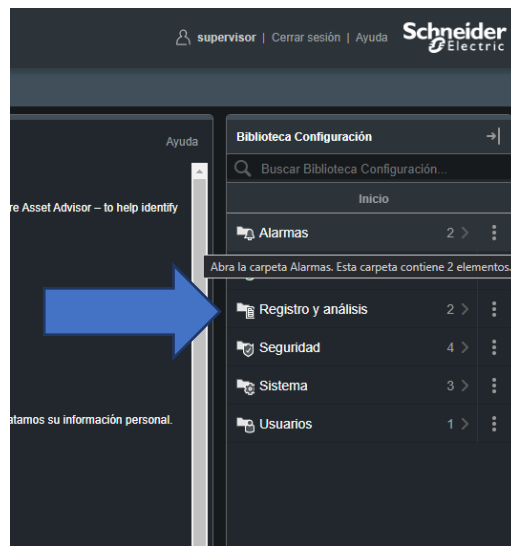


Figura 30. Parámetros del PME.

- a) En la sección Servicios conectados, en la lista desplegable seleccione Activado (Recomendado).
- b) En la sección Registro, lea el Aviso de privacidad y la Política de privacidad de datos y cookies.
- c) Lea y acepte los Términos y Condiciones, Figura 31.

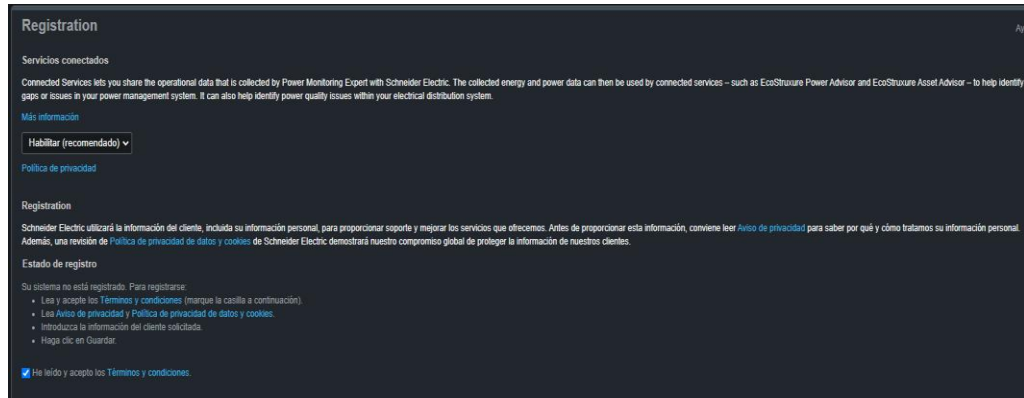
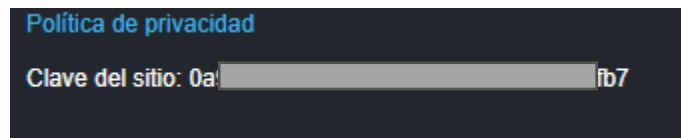


Figura 31. Datos de registro PME.

- d) Rellene los apartados Información del cliente e Información del proveedor de servicios.
- e) Guarde los cambios.
- f) Actualice la página para ver la clave del sitio; la clave del sitio es necesaria para completar el siguiente paso.



4. Envíe por correo electrónico la siguiente información al administrador de Power Advisor:
 - a) Una captura de pantalla de la información de registro en la interfaz de usuario de PME
 - b) La clave del sitio proporcionada en la interfaz de usuario de PME (utilice copiar/pegar para añadir la clave al correo electrónico).
 - c) El ID del contrato
 - d) El nombre del cliente (si se conoce)

Cargar datos

Antes de que Power Advisor pueda analizar los datos, es necesario cargarlos. Utilice uno de los siguientes métodos para cargar los datos:

- NOTA: El intercambio automático de datos mediante Servicios Conectados aún no está disponible para Power Operation. Utilice el extractor de datos manual para copiar y cargar los datos de Power Operation.

- a) Cargue los datos automáticamente mediante Servicios conectados. Consulte Configuración de PME para compartir datos automáticamente para obtener más información.
- b) Cargar datos manualmente mediante el Extractor manual de datos. Consulte Carga manual de datos para obtener más información.

2.6.5. Reporte generado por el software

Este reporte se encuentra en el ANEXO 1, el cual se tiene dos tipos, Data Quality Report y Electrical Health Report, estos reportes tienen el resumen y reporte completo. En este reporte se incluye a todas las subestaciones y generaciones de EMELNORTE SA por lo que se obtiene un Excel resumen de cuáles son los incumplimientos. En los que se destaca que no se registró ningún tipo de incumplimiento para la S/E El Retorno, esto concuerda con los resultados obtenidos en el procesamiento de datos de Excel.

CAPÍTULO 3

Propuestas de mejoras de calidad de producto para el suministro eléctrico de la Subestación El Retorno.

Las propuestas de mejoras en el suministro eléctrico son en base a el análisis y resultados obtenidos del procesamiento de datos realizado en el capítulo 2, se encontró varios incumplimientos de los parámetros de calidad de producto, estos incumplimientos se detectaron aguas debajo de las cabeceras de los alimentadores, además de comprobar los resultados calculados con el reporte generado por el software, llegando así a las alternativas de mejoras para el suministro eléctrico de la subestación El Retorno.

3.1. Ajuste de niveles de voltaje en subestaciones

Hay muchas razones técnicas por las que el voltaje varía, pero una de las más frecuentes y que está relacionada con la operación diaria del sector productivo se relaciona con el cambio de la demanda de energía. El consumo de energía no siempre es constante, este se reduce o aumenta dependiendo de la hora o el día, estas variaciones ocasionan que en una línea de distribución produzcan variaciones de voltaje que normalmente están consideradas dentro del diseño del sistema de potencia, el dimensionamiento de los alimentadores y la capacidad de los transformadores en las subestaciones. Conforme va creciendo la demanda de energía ocasiona que dentro de los alimentadores existan variaciones de voltaje.

- En los sistemas conectados en delta, están disponibles las configuraciones delta abiertas y cerradas.
- En una configuración delta abierta, se conectan dos reguladores para regular las tres fases.
- En la configuración delta cerrada, se utilizan tres reguladores para regular entre las fases.

Para bajo voltaje.

Los niveles de voltaje son controlados mediante la acción de dispositivos como:

- La conmutación de capacitores e inductores,
- Movimientos de los cambiadores de taps de los transformadores
- Ajuste del campo de excitación de generadores

- Conexión y desconexión de líneas de transmisión
- Cortes de carga (esquema de alivio de carga)

Reguladores de voltaje multifásicos montados en base para Subestaciones.

Están diseñados para su uso en áreas públicas y comerciales con líneas de distribución subterráneas y proporcionan una huella más pequeña que las instalaciones aéreas tradicionales. Sus configuraciones monofásicas, 2 en 1 y 3 en 1, y se pueden configurar para sistemas en estrella o delta. Los diseños de unidades múltiples incluyen 2 o 3 reguladores monofásicos en un tanque, esto se puede aplicar para instalaciones subterráneas y subestaciones.

Reguladores de voltaje monofásicos de 32 pasos

Son autotransformadores de cambio de tomas, su principal función es regular los voltajes de línea de distribución desde +/-10 % en 32 pasos. El control del regulador de voltaje detecta el voltaje del sistema y puede operar el cambiador de tomas dentro del rango especificado.

3.1.1. Alternativas de mejoras para los niveles de voltaje

Para el caso de la subestación El Retorno, no es necesario ningún tipo de mejora, todos los alimentadores y sus respectivas fases, están dentro de los límites de la regulación nacional, por lo que no tienen ningún incumplimiento.

3.2. Reducción de perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)

Causan una serie de efectos técnicos nocivos, lo que provoca una interrupción en los procesos de producción y costos sustanciales. También puede afectar la seguridad de los trabajadores y la productividad. Se analiza las fluctuaciones de voltaje como causa del flicker, lo que provoca fluctuaciones, métodos de mitigación y estándares aplicables con respecto a los niveles de flickers.

Mitigación de fluctuaciones de voltaje en sistemas de energía

Por lo general, las medidas de mitigación se centran en limitar la amplitud de las fluctuaciones de voltaje. El proceso tecnológico rara vez está influenciado.

Los ejemplos de métodos de mitigación para varios tipos de equipos incluyen:

- Hornos de arco: Incorporar reactores en serie (o saturación variable); asegurar el correcto funcionamiento del sistema de control de electrodos; segregar y proporcionar calentamiento preliminar de carga.
- Plantas de soldadura: Suministrar la planta desde un transformador dedicado; conectar soldadores monofásicos a una red trifásica para una distribución de carga equilibrada entre fases; conecte máquinas de soldadura monofásicas a diferentes fases de los equipos de iluminación eléctrica.
- Unidades de velocidad ajustables: Use dispositivos de arranque suave.

Otra forma de reducir la amplitud de las fluctuaciones de voltaje es aumentar la potencia de cortocircuito, con respecto a la potencia de carga, en el PCC al que está conectada una carga fluctuante. Esto se puede hacer por:

- Conectando la carga a un nivel de voltaje nominal más alto;
- Suministrando esta categoría de cargas de líneas dedicadas;
- Separar los suministros a cargas fluctuantes de cargas constantes mediante el uso de devanados separados de un transformador de tres bobinados;
- Aumentar la potencia nominal del transformador que suministra la carga fluctuante
- Instalación de condensadores en serie.

3.3. Métodos de reducción de armónicos

Los armónicos afectan en gran cantidad a los sistemas eléctricos de potencia por tan razón se implementan elementos que ayudan a su control, pero existe diferentes tipos de soluciones como:

- Preventiva, evita la generación de armónicos.
- Curativa, filtrar los armónicos existentes.
- Paliativos, Sobredimensionamiento de equipos que soporten mejor los armónicos.

Los beneficios que dan al sistema la mitigación de armónicos son:

- Mejora la Confiabilidad y la seguridad del Sistema.
- Reducir en el costo de Operación y Mantenimiento.
- Mejora el factor de Potencia.
- Ahorro en pérdidas armónicas en los conductores.
- Evita el sobredimensionamiento de equipos.

La implementación de reactores de línea en las instalaciones eléctricas son utilizados para la mitigación de armónicos y el bloqueo de transitorios haciendo que rechace altas frecuencias y cambios repentinos en las ondas de corriente alterna en las impedancias, además de proteger a los diodos y condensadores de VFD de los efectos perjudiciales de los transitorios de bajo nivel, estos transitorios causan:

- Reducción de la vida útil de los equipos.
- Sobrecargas.
- Aumento de temperatura de los equipos.
- Fallas en los equipos.
- Interrupciones en el servicio.

3.3.1. Transformadores en Delta.

En conexión de transformadores en presencia de cargas no lineales se generan armónicos triples debido a que por el conductor neutro los armónicos se suman aritméticamente, estos armónicos reflejan al primario y circulan a la red por tanto el resto del circuito va a existir la presencia de armónicos y causan sobrecalentamiento el transformador tanto en el lado de alto y bajo voltaje.

La conexión delta de los transformadores proporciona un camino para atraer al armónico tercero y sus múltiplos para encerrarlos en el bobinado y evitar que los armónicos fluyan a la fase y así no interfiera con la forma de onda sinusoidal de voltaje para proteger al transformador de sobreesfuerzos a plena carga, la principal desventaja de este método es que no protege a ningún equipo como transformadores, carga, líneas o acometidas.

3.3.2. Transformadores con Diferentes Tipos de Conexión.

Cargas idénticas en diferentes transformadores, se aplica en industrias con grandes cargas como fundidoras u hornos de arco. Consiste en utilizar un transformador para abastecer a cargas idénticas con grupo de conexión de que anulan geoméricamente las corrientes de armónicos más altos, una limitación de este método es que proteger únicamente a una fase.

3.3.3. Transformadores derivadores o en Zigzag.

Este método deriva las corrientes de secuencia cero, el transformador en zigzag no aumenta ni disminuye el voltaje solo funciona como trampa de armónicos, se conecta en un tablero, los armónicos se encuentran en un camino de baja impedancia donde se quedan

encerrados los armónicos incluyendo el neutro evitando que la red se contamine, protege al transformador y a la acometida.

3.3.4. Inductancias de Choque o de Aislamiento.

Utilizar la propiedad intrínseca de los inductores de oponerse al cambio en el campo magnético, atenúa cualquier cambio brusco de la onda de corriente.

- Inductancia de Línea.

El THD baja a menos de la mitad dependiendo del tamaño de la impedancia, pero no puede ser una muy alta debido a que produce mayores pérdidas y caídas de voltaje.

- Inductancia de Carga.

Se la dimensionan tomando la impedancia efectiva del reactor entre al 1 al 8 % de la impedancia de carga a una frecuencia fundamental.

3.3.5. Aumento del número de pulsos de convertidores.

Utiliza rectificadores con mayor número de pulsos múltiplos de 6 para reducir la presencia de armónicos, para realizar un aumento de pulsos es necesario realizar arreglos serie paralelo o implementar un modelo nuevo.

3.3.6. Aumento del Calibre del Neutro.

Se instala el conductor de neutro del mismo calibre que las fases, esta alternativa solo garantiza que el conductor no se sobrecaliente con facilidad mientras que la presencia de armónicos permanece.

3.3.7. Desclasificación de Transformadores.

Cuando las corrientes armónicas afectan al sistema estas producen sobrecalentamiento, aumento de pérdidas, aumento de ruido, reducción de la vida útil de los equipos, un método para reducir estos efectos es la desclasificación que consiste en la reducción de su capacidad del transformador, se lo realiza de acuerdo con la normativa esto se lo realiza cuando el factor $k > 5$, mientras que cuando el factor $k \leq 5$ la potencia del transformador es igual a la potencia nominal.

3.3.8. Uso de Transformadores con Factor K.

Son transformadores contruidos con el propósito de soportar ambientes distorsionados y se construye con materiales más robustos o de mejor calidad.

Para mejorar el factor k se puede hacer los siguientes cambios:

- Sobredimensionamiento del bobinado primario.
- Núcleos con densidad más baja.
- Mejor aislamiento de bobinados y así reduce las pérdidas de Eddy.

El factor k es un parámetro que indica la capacidad de un transformador para soportar cargas no lineales y evitar el sobrecalentamiento del equipo, el factor k es un valor definido por el tipo de carga que está conectada, la tabla resume el factor k para transformadores de distribución.

Tabla 3.1. Factor k para transformadores de distribución.

| Tipo de Carga | Factor K |
|---|----------|
| Lámparas incandescentes, transformadores de control, motores, dispositivos electromagnéticos de control. | 1 |
| Lámparas de descarga, equipos de calentamiento de inducción, máquinas de suelda, PLC, controladores de estado sólido. | 4 |
| Equipos de Telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada. | 13 |
| Unidades de estado sólido para motores, circuitos de alimentación, variadores de frecuencia. | 20 |
| Conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, médicos, circuitos industriales y laboratorios institucionales. | 30 |
| Cargas identificadas como productoras de gran cantidad de armónicos. | 40 |

Según el tipo de consumidores se instala diferentes equipos eléctricos por lo tanto cada uno de ellos genera un tipo de armónico a la red, por lo tanto, para evitar los efectos causados por los armónicos se utilizan los transformadores con factor k, para la implementación de estos transformadores se considera si comienza a aparecer los efectos sobre el sistema además considerar si se tienen cargas como las que indica la tabla 3.1.

Los transformadores con factor k permiten controlar las cargas excedentes causadas por los armónicos de corriente, la tabla indica el porcentaje de carga tolerada cuando se utiliza transformadores con factor k Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Cargas Factor k.

| Cargas con Factor k | | | | | |
|----------------------------|------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Armónico | Frecuencia [Hz] | K 1 | K 13 | K 13 | K 20 |
| 1 | 60 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 3 | 180 | 16.667% | 33.333% | 41.667% | 50% |
| 5 | 300 | 10% | 20% | 25% | 30% |
| 7 | 420 | 7.143% | 14.286% | 17.857% | 21.429% |
| 9 | 540 | 5.555% | 11.111% | 13.889% | 16.667% |
| 11 | 660 | 4.545% | 9.091% | 11.364% | 13.636% |
| 13 | 780 | 3.846% | 7.692% | 9.615% | 11.538% |
| 15 | 900 | 3.333% | 6.667% | 8.333% | 10% |

Los transformadores con factor k no garantizan la mitigación armónica del sistema, el factor k se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Factor\ k = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2$$

Donde:

I_h = Corriente armónica de orden h en por unidad

h = Orden de la componente armónica.

3.3.9. Filtros

Sistemas que dejan pasar ciertas frecuencias anulando otras, cumplen la función de modificar el espectro de frecuencia de la onda de entrada, los equipos diseñados con filtros ayudan a disminuir la presencia de armónicos en los equipos o en el sistema eléctrico de potencia, los filtros se clasifican en:

Activos

Son fuentes de voltaje o corriente compuestos por elementos activos como puente de rectificadores con semiconductores conectados en serie para fuentes de voltaje o en paralelo

para fuentes de corriente, el ancho de banda varía dependiendo el resultado del monitoreo en tiempo real, se utilizan en amplificadores operacionales debido a que eliminan las inductancias y reducen el tamaño del circuito al igual que la inversión.

Estos filtros no tienen el principio de sintonización a una fuente dada ya que pueden censar y compensar cualquier forma de onda que tenga armónicos, las ventajas de este tipo de filtros son:

- Pueden mitigar cualquier armónico de la forma de onda de voltaje y corriente.
- Su implementación no se afecta por la configuración del sistema.

Desventajas:

- Costo más elevado que un filtro pasivo.
- No soportan grandes potencias debido a estar compuestos por semiconductores.

Pasivos

Se conocen como filtros pasivos a los que están estructurados por resistencias, capacitores e inductores que a través de resonancias en serie o paralelo logran impedancias cero o infinitas para convertirse en camino que atrae armónicos para impedir su paso, se los utiliza debido a su baja sensibilidad y poca disipación de energía, actúan en un ancho de banda definitivo y fijo, para dimensionar estos filtros se sintonizan las R, L, C de forma que la frecuencia a la cual la resonancia sea la frecuencia a la cual se espera el cortocircuito, son más utilizados a nivel industrial

Las ventajas de estos filtros son:

- Filtros económicos
- Soportan altas corrientes y potencias

Desventajas:

- Eliminan solo armónicos establecidos.
- Se desintonizan con la interacción de las impedancias del sistema.

Pasa Banda

Eliminan los armónicos de la frecuencia definida, se utilizan para ahorrar el uso de filtros para los armónicos quinto y séptimo, se forma de la unión de varios filtros resonantes que actúan en las onceavas y treceavas armónicas.

Este filtro tiene como ventaja el aspecto económico, pero en el punto de vista eléctrico no es recomendable debido a que aumenta la impedancia debido a los armónicos a bajas frecuencias.

Sintonizados

Son circuito RLC que se ajustan a la frecuencia del armónico que se requiera, tienen baja impedancia que mueve los armónicos, para estos filtros se controla la resonancia en serie por la interacción entre la fuente de generación y los filtros, para el diseño se considera la tolerancia de los elementos del filtro para evitar la generación de resonancias.

Características.

- Eliminación de armónicos definidos.
- El filtro se sintoniza a la frecuencia que se desea eliminar.
- La impedancia del filtro es mínima.

Son utilizados en rectificadores, inversores PWM y en casos específicos para fuentes de armónicos como hornos de arco.

Ventajas:

- Ofrece una mayor atenuación a los armónicos individuales.
- Bajas pérdidas respecto a la resistencia del inductor.
- Cuando se opera a la frecuencia individual puede proporcionar potencia reactiva al sistema.

Desventajas:

- Sufren desintonía debido a los elementos que sufren variación de temperatura.
- Causan resonancia en paralelo cuando está interactuando con la red.

Amortiguadores.

Este tipo de filtros tienen las siguientes ventajas:

- Poco sensible a los cambios de temperatura, desviación de la frecuencia y tolerancia de los componentes que tiene el filtro.
- Baja impedancia para el espectro de frecuencia.

- Mejor que los filtros sintonizantes en condiciones de resonancia paralelo a bajas frecuencias.

Desventajas:

- Su diseño debe considerar altos voltajes.
- Altas pérdidas en la resistencia y en el reactor.

Potencia

Son diseñados para reducir los armónicos en redes eléctricas de distribución, debido al aumento de cargas no lineales en redes de alimentación estos filtros son los adecuados para reducir la distorsión de las señales de corriente en las redes de baja tensión.

Las funciones que realizan los filtros activos de potencias son:

- Reducir los armónicos de corriente que circulan por las redes entre los filtros y los centros de generación.
- Reducir las corrientes de neutro cuando existe armónicos de corrientes de frecuencia múltiplo de tres.
- Reducir los armónicos de voltaje conectados en la carga.
- Regulación de voltaje y reducción de flicker.

3.4. Análisis y diseño de armónicos de 3 y 5 orden.

El análisis completo de las mediciones tomadas en el año 2022 se determinó que la frecuencia de armónicos de voltaje máximo que predominan en los resultados son el de orden tercero y quinto como se muestra en la tabla THD individual en el capítulo 2, las demás frecuencias si tienen valores diferentes de cero, aunque no en la misma magnitud.

Para solucionar el problema de la presencia de armónicos en el sistema se analiza alguna alternativa que permita reducirlos en su mayor posibilidad o en el mejor de los casos la mitigación, existe diferentes tipos de soluciones como son permanentes o temporales.

- Dimensionar el neutro del mismo calibre que alguna fase.
- Implementación de transformadores de aislamiento de estrella – triangulo
- Transformadores con doble secundario o conocido como los de conexión en zigzag.
- Filtros que ayuden a la contención de las frecuencias armónicas los más utilizados son en conexión en shunt resonantes.

Los métodos de mitigación propuestos para los resultados obtenidos son:

Mejor dimensionamiento de Transformadores.

La instalación de equipos eléctricos de potencia se lo hace con criterios de planificación en los que considera el crecimiento de la población con la finalidad de soportar la carga total a mediano y largo plazo. Considerando aspectos técnicos y económicos se busca diseñar el sistema eléctrico para su correcto funcionamiento sin el desperdicio de recursos, la presencia de armónicos en transformadores causa:

- Calentamiento en los Bobinados.
- Resonancia en los Bobinados.
- Aumento en las pérdidas del cobre y del núcleo.
- Pérdidas de corriente por efecto I
- Pérdidas por corriente de Eddy.

El aumento en la capacidad de los transformadores se lo realiza al siguiente valor nominal de comercialización, esta alternativa no elimina los armónicos del sistema solamente reduce los efectos de los mismo a los equipos eléctricos.

Cuando comienza a ser notorio los efectos de los armónicos en el sistema eléctrico es momento de intervenir en los equipos para reducir los mismos, la alternativa que es utilizada mayormente es cambiar los transformadores a uno de mayor capacidad ya que permite reducir los efectos de los armónicos en los transformadores además de mejorar su capacidad ante el constante aumento de la demanda.

Filtros Armónicos

Esta solución es recomendada para este tipo de usuarios debido a que sobredimensionar los equipos es una inversión considerable debido a que el número de usuarios beneficiados no es al mismo nivel que con cargas residenciales. Para solucionar el problema del 3 y 5 armónico se utiliza un filtro pasivo como se muestra en la Figura 32.

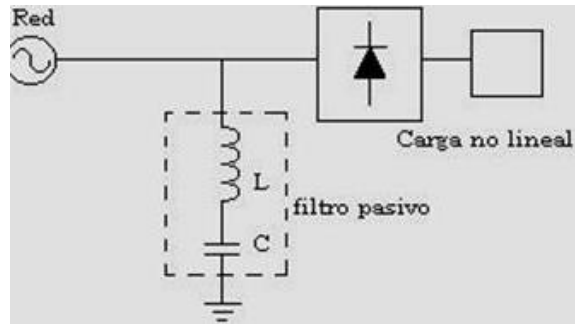


Figura 32. Filtro Pasivo.

Fuente: (Velasco, 2021)

Los filtros son diseñados a partir de elementos como capacitores, inductores y resistencias, se considera el tipo de frecuencia armónica que se desea suprimir, dependiendo el nivel de armónicos presentes en el alimentador.

El convertidor se conecta en paralelo con la red como se muestra en la Figura 33, con esto se logra que la corriente de red sea sinusoidal, además tiene la capacidad de corregir factor de potencia anulando la componente reactiva que entrega la red, también puede balancear la carga de las fases en caso de alimentas un consumo desequilibrado.

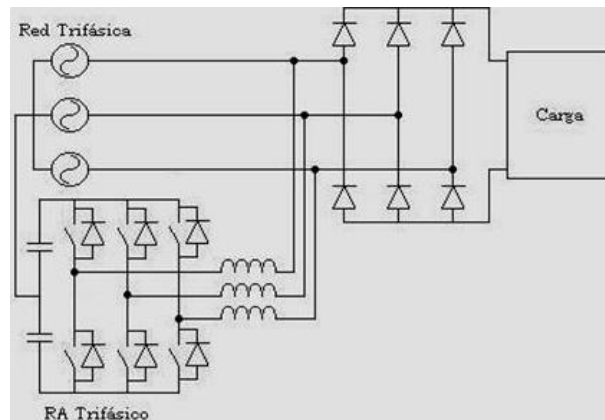


Figura 33. Configuración tipo puente inversor trifásico con conexión de neutro.

Fuente: (Velasco, 2021)

El funcionamiento es muy sencillo debido a que cada rama del RA se controla en forma independiente ya que existe un punto común con la red en el neutro. Se genera una señal de referencia senoidal para cada fase desplazadas 120° , logrando que la corriente de red siga esta referencia. La tensión de cada condensador debe ser mayor al voltaje máximo entre fase y neutro de la red.

3.5. Compensación en el desequilibrio de voltaje

Métodos de compensación de voltaje

Las soluciones para atenuar el desbalance permanente en las redes de distribución, es el balanceo de cargas y el replanteo de cargas monofásicas y bifásicas. Por lo tanto, podemos indicar que el desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia, que produce demandas y pérdidas de energía adicionales generalmente desatendidos por las compañías y por los usuarios polifásicos. El coeficiente de Desclasificación, que indica la asimetría del sistema, es una alternativa que permite caracterizar el desbalance en el sistema eléctrico. Con su disminución crece la eficiencia energética en el sistema y se aprovecha su capacidad de transporte y distribución.

3.6. Simulación de filtro pasivo para armónico de tercer orden.

Para demostrar que las sugerencias mencionadas para mitigar armónicos de voltaje, se realizó simulaciones en la herramienta online llamada Desmos la cual nos ayuda a visualizar de forma gráfica ecuaciones. Con la simulación mediante la curva sinusoidal se representa los armónicos de voltaje, en ella se pueden observar las deformaciones de la forma de la onda. Para representar la forma de onda ideal sin que los armónicos afecten se utiliza la ecuación:

$$y_1 = \sqrt{2} A_1 \sin(1x + 1a_1)$$

En donde:

A: La amplitud o valor del armónico

a: El desfase

y: Variable en el eje y

x: variable en el eje x

Con la que se obtiene la siguiente gráfica:

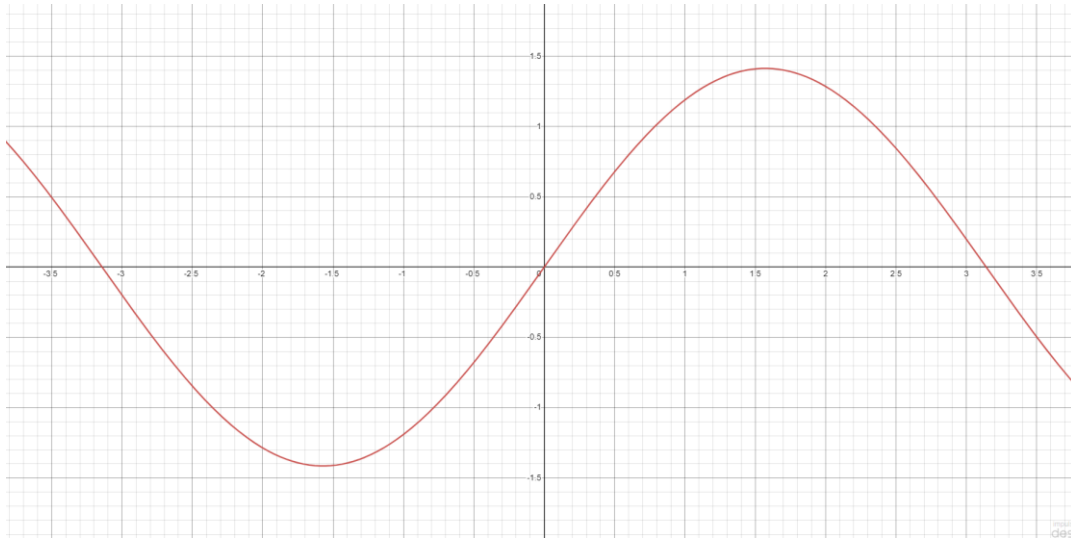


Figura 34. Onda senoidal en Desmos.

Fuente: Autor

Esta es la onda senoidal Figura 34, representa la forma de onda sin que esta sufra ningún tipo de contaminación de armónicos. A continuación, se presenta una onda fundamental contaminada con el tercer armónico, la cual se representa en la Figura 35.

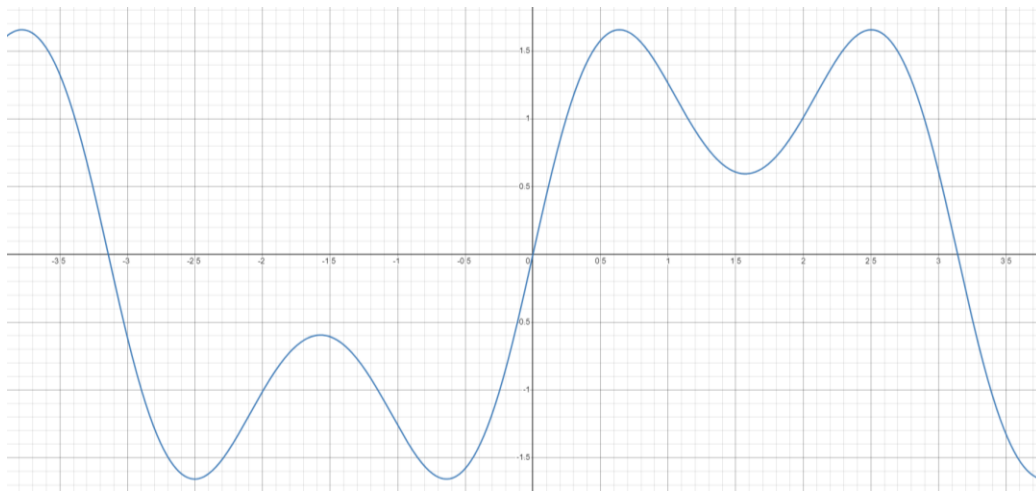


Figura 35. Onda contaminada con el armónico de tercer orden.

Fuente: Autor

Para obtener esta forma de onda se utilizó un 6,2% de contaminación de armónico de tercer orden en un caso hipotético. Con la finalidad de reducir la deformación de onda, se implementa un filtro pasivo para el armónico homopolar aguas abajo del punto de conexión de dicho filtro. Este filtro pasivo desfasa 180 hz el armónico de voltaje de tercer orden, lo que corrige la forma de onda, acercándose a la onda fundamental como se observa en la Figura 36.

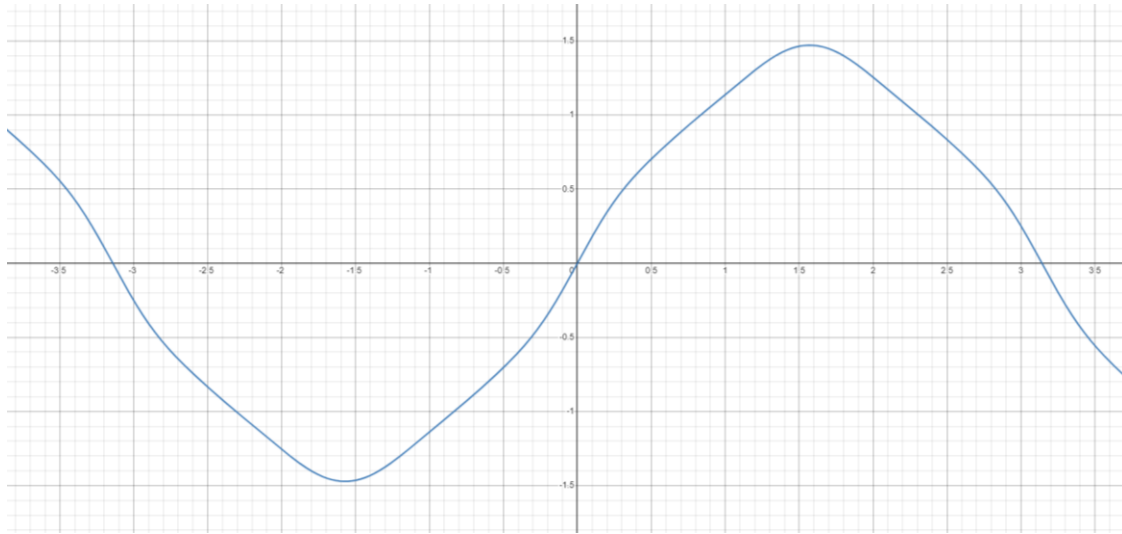


Figura 36. Aplicación de filtro pasivo.

Fuente: Autor

El filtro a esa frecuencia entra en resonancia, esto significa que a esa frecuencia la amplitud de la señal de salida del filtro reduce el valor de la impedancia para cuando exista contaminación de armónico de tercer orden, esto hace que la contaminación pase por el filtro y vaya a tierra.



Figura 37. Filtro de armónicos Matrix® serie E.

Fuente: (MTE, 2020)

Con la implementación del filtro pasivo, la onda contaminada se corrige acercándose a la fundamental, comprobando que el filtro Figura 37 funciona y mitiga armónicos de voltaje.

Conclusiones

- La normativa internacional IEC 61000-4 a comparación de la regulación nacional ARCERNNR – 002/20 tiene límites de calidad de producto más estrictos, como en el caso de los armónicos, en estos se tienen más parámetros para la distorsión armónica de voltaje como son THD, THDS y THDG. Para las perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker), esta se registra mediante 5 etapas, esto es diferente en la regulación nacional ARCERNNR – 002/20 se establecen parámetros de calidad de energía, siendo más específicos en calidad de producto, estableciendo límites permisivos para cada uno de estos parámetros.
- Los resultados obtenidos por el software especializado Power Monitoring Expert y la herramienta Power Advisor, se determinó que no existe ningún incumplimiento de los parámetros respecto a calidad de producto. Además, con históricos obtenidos de analizadores de bajo voltaje instalados en el secundario del transformador, se determinó que existen incumplimientos en armónicos individuales de orden homopolar. Una de las razones por las que el software que se utiliza en SCADA para calidad de producto no va a tener índices de incumplimiento de armónicos, es porque la potencia de corto circuito es alta y la impedancia es baja. El armónico va a crecer en función del voltaje rms, así como en la fórmula del cálculo de armónicos de la regulación nacional, entre más lejos se encuentre de la fuente la caída de voltaje hace que el armónico tienda a elevarse, esto se da en horas pico el porcentaje de mayor demanda de 19Hrs a 21Hrs.
- Existen diferentes formas de mitigación de armónicos, por ejemplo, banco de condensadores que se utiliza para mejorar el factor de potencia, banco capacitores cuya función es que la impedancia se reduzca mejorando el voltaje y por ende el rms suba, esto hace que se mitiguen los armónicos de voltaje. También se utilizan filtros pasivos para la mitigación de armónicos. Además, para mantener los niveles de voltaje se utilizan reguladores que mantienen estos valores constantes. Cada solución se aplicará dependiendo del caso en el que se encuentre y del costo económico que representa utilizar los distintos métodos.

Recomendaciones

- Realizar un estudio para determinar los puntos factibles y poner los sensores conectados con fibra al departamento centro de control SCADA los cuales monitoreen los parámetros de calidad de producto, aguas abajo de la fuente. Con esto se puede identificar los puntos donde se pueden dar soluciones para no incumplir con la regulación nacional, evitando multas a la empresa distribuidora. Con esto se podrá brindar una calidad de producto, dentro de los estándares solicitados en la regulación nacional.

Referencias

- Alkahtani, A. A. (2020). Power Quality in Microgrids including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*
- ARCERNNR. (2020, 11 13). Regulación No. ARCERNNR-002/20. Ecuador: ARVERNNR.
- Cortés, M. A. (2009). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Puebla: Calidad de la Energía Eléctrica.
- Eletricidade, E. D. (2016, 10 31). *O que é corrente e tensão alternadas?* Desterro Eletricidade: <https://www.desterroeletricidade.com.br/blog/eletrica/o-que-e-corrente-e-tensao-alternadas/>
- Flórez, J. J. (2013, 03 04). *Interrupción del servicio de energía eléctrica*. UDG.es: http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/curso3_interrupciones.pdf
- Fuentes, C. (2015). EVALUACIÓN Y MEDICIÓN DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO. Cuernavaca, Morelos, Mexico.
- Granero, A. (2020, 05 05). *Blogger.com*. Imseingenieria.blogspot: https://imseingenieria.blogspot.com/2020/05/perturbaciones-en-el-suministro_5.html
- Grover, A., & Lall, B. (2020). A novel solution to prevent diesel pilferage at telecom tower site. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 89-99.
- Hernández, C. (2017). CALIDAD DE ENERGIA. *1er. Seminario de Ahorro de Energía Eléctrica Campeche, Campeche* (p. 99). Campeche: Comisión Federal de Electricidad.
- Kazemi-Robati, E. (2019). Passive harmonic filter planning considering daily load variations and distribution system reconfiguration. *Elsevier Ltd*, 125-135.
- Kobold, P. H. (2004). *Analisis de los SAGS de voltaje en redes de media tension*. Repertorio Uniandes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21784/u258486.pdf>

- Krzysztof, Ł., & Zbigniew, N. (2022). Voltage Fluctuations and Flicker in Prosumer PV Installation. *MDPI*, 1-18.
- Ku, T.-T., & Lin, C.-H. (2019). Coordination of transformer on-load tap changer and pv smart inverters for voltage control of distribution feeders. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 256-264.
- Milad Dalali, A. J. (2015, 05 27). *Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC61000-4-7 standard*. Ietresearch: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-gtd.2015.0366>
- Montoya, D. E. (2008). *Comparación entre el modelaje y simulación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15*. Researchgate.net: https://www.researchgate.net/profile/Dan-EI-Montoya/publication/266523501_Comparison_between_the_modeled_and_simulation_of_the_Flickermeter_based_on_the_Standard_IEC-61000-4-15_through_the_Discrete_Wavelet_Transform_and_Fast_Fourier_Transform/links/54d4bd
- Pedroni, P. (2020). *Distribución de la energía eléctrica (2a. ed.)*. Córdoba, Argentina: Jorge Sarmiento Editor - Universitas.
- Pinto, R. E. (2020). *Calidad de la energía eléctrica*. Córdoba, Argentina: Jorge Sarmiento Editor - Universitas.
- Procobre Mexico. (2016). *Calidad de la Energía*. Mexico: Procobre Mexico.
- Razavi, S.-E. (2019). Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. *Elsevier Ltd*, 157-167.
- Sánchez, G. C. (2015). *IMPACTO DE LOS SAGS DE VOLTAJE EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA*. Sistemamid: <https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/352/356/1936.pdf>
- Sherif, I., & Shady H.E, A. A. (2019). State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Elsevier Ltd*, 1002-1020.

Tecsup Virtual. (2019). *Idoc.pub*. Perturbaciones En Un Sistema Electrico:
<https://idoc.pub/documents/perturbaciones-en-un-sistema-electrico-d4pqx3wxownp>

Xiang, W., & Yang, S. (2019). A Transient Voltage-Based DC Fault Line Protection Scheme for MMC-Based DC Grid Embedding DC Breakers. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 334-345.

Zhang, X. (2020). Electricity consumption pattern analysis beyond traditional clustering methods: A novel self-adapting semi-supervised clustering method and application case study. *Elsevier Ltd.*

ANEXOS

ANEXO 1

Documentos adjuntos o al link de onedrive

[Reporte Software](#)