

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TITULO:

SELECCIÓN DE FILTROS PASIVOS EN DIGSILENT PARA LA MITIGACIÓN DE CORRIENTES REACTIVAS DE ACUERDO CON EL INFORME DE CALIDAD DE ENERGÍA REALIZADO EN UN TRANSFORMADOR DE 2000 KVA

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Jeremy Jossue Ortiz Tisalema.

Charles Jacob.Tamayo Macias

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo. MEL.

Guayaquil – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Nosotros, Jeremy Jossue Ortiz Tisalema con documento de identificación No. 0953631025 y Charles Jacob con Tamayo Macias documento de identidad No.0943435370 Manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 15 de marzo del año 2025.

Atentamente,

Ortiz Tisalema Jeremy Jossue

0953631025

harles Bamay

Tamayo Macias Charles Jacob

0943435370

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Jeremy Jossue Ortiz Tisalema con documento de identificación N° 0953631025, y Charles Jacob Tamayo Macias con documento de identificación N° 0943435370, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: "Selección de filtros pasivos en DIgSILENT para la mitigación de corrientes reactivas de acuerdo con el informe de calidad de energía realizado en un transformador de 2000 kVa", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de marzo del año 2025.

Atentamente,

Jossue Jeremy Ortiz Tisalema

0953631025

rarles Gamayo

Charles Jacob Tamayo Macias 0943435370

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo. con documento de identificación N° 0102054871, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "SELECCIÓN DE FILTROS PASIVOS EN DIGSILENT PARA LA MITIGACIÓN DE CORRIENTES REACTIVAS DE ACUERDO CON EL INFORME DE CALIDAD DE ENERGÍA REALIZADO EN UN TRANSFORMADOR DE 2000 KVA", realizado por Jeremy Jossue Ortiz Tisalema con documento de identificación N° 0953631025 y por Charles Jacob Tamayo Macias con documento de identificación N° 0943435370, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de marzo del año 2025.

Atentamente,

pitatte

Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MEL 0102054871

DEDICATORIA.

Dedico este trabajo de titulación a Dios, quien me ha dado salud, fuerza y dedicación para perseverar y alcanzar este y muchos otros logros en mi vida.

A mis padres, Mariela Tisalema y Lucio Ortiz, quienes me han apoyado incondicionalmente a lo largo de este camino universitario, siendo un pilar fundamental en mi vida. Gracias por inculcarme valores y enseñarme que con determinación los sueños se pueden hacer realidad.

A mi querida novia, Romina, por su constante ayuda, compañía y aliento, que fueron esenciales en cada paso hacia mis metas.

A toda mi familia y amigos, quienes me brindaron su apoyo incondicional. Gracias por las risas y los momentos inolvidables compartidos, y por enseñarme que con una buena amistad siempre es posible superar cualquier desafío.

Jeremy Ortiz Tisalema.

AGRADECIMIENTO.

Agradezco a Dios por su constante ayuda el hecho de haberme puesto en mi camino a diversas personas inolvidables que han enriquecido mi vida. A la facultad Salesiana y a sus docentes, quienes compartieron su conocimiento y pasión, haciendo que me enamorara aún más de mi carrera.

A todas las personas que me brindaron su apoyo en cada momento, muchas gracias por su ayuda invaluable.

Jeremy Ortiz Tisalema.

DEDICATORIA.

A Dios por siempre estar conmigo en los momentos de incertidumbre, a mi amada madre y amado padre, por siempre demostrarme que el querer es poder, a mis abuelos paterno y mi abuela materna, por darme esa palmadita de apoyo en la espalda para afrontar los obstáculos, y a todos aquellos que con solo un " tú puedes" hicieron que me levante y siga luchando por mis sueños.

Charles Tamayo Macias

AGRADECIMIENTO.

Ante todo, quiero agradecer a Dios por haberme otorgado la sabiduría y la valentía necesarias para emprender este camino. Su guía me ha permitido crecer tanto a nivel académico como personal, y me ha impulsado a superar cada obstáculo que se ha presentado.

A mis padres, de todo corazón les agradezco por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus consejos de vida. Gracias por ser mi fuente de inspiración, por ser el ejemplo de una persona correcta, amorosa, seria, optimista, y por supuesto una y mil veces gracias por creer en mí siempre.

A mi tutor, Otto Astudillo, mi más profundo reconocimiento por su paciencia, dedicación y conocimientos compartidos. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi formación y me han permitido desarrollar las habilidades necesarias para llevar a cabo este trabajo

Charles Tamayo Macias

RESUMEN.

El trabajo presentado con el título "Selección de filtros pasivos en digsilent para la mitigación de corrientes reactivas de acuerdo con el informe de calidad de energía realizado en un transformador de 2000 kva" simula un filtro pasivo en el software DigSILENT Power Factory. El objetivo de este filtro es mitigar las corrientes reactivas mostradas en el análisis de calidad de energía, reduciendo costos de planillas eléctricas y garantizando una energía más limpia.

Este proyecto nace de la imperiosa necesidad de garantizar la integridad y el óptimo funcionamiento de los equipos eléctricos, los cuales se ven constantemente amenazados por problemas de calidad de energía asociados a la presencia de armónicos. Entre las consecuencias más comunes de este fenómeno se encuentran el bajo factor de potencia, la generación de corrientes parásitas y la desconexión intempestiva de bancos de capacitores. Con el objetivo de mitigar estos efectos adversos, se propone la implementación de filtros pasivos, los cuales han demostrado ser una solución eficaz para el control y eliminación de armónicos, permitiendo así mejorar significativamente la calidad de la energía suministrada.

Durante su desarrollo, se hace un análisis de calidad de energía realizado en campo para poder observar el comportamiento de los armónicos sin un filtro pasivo incluida. También se hace una selección del filtro pasivo a través de una simulación que permite estudiar el comportamiento de los indicadores de armónicos con un filtro. Además, estudiamos cómo los diferentes parámetros eléctricos se ven afectador por las corrientes parasitas y propones el uso del filtro pasivo para poder tener una calidad energética mayor.

Utilizando software especializado DigSILENT y el software PowerVisionPlus de visualización de datos eléctricos, se modelará el sistema eléctrico en base al análisis

de calidad de energía para analizar en profundidad el comportamiento de los armónicos. Los resultados de estas simulaciones servirán de base para diseñar soluciones prácticas y eficientes, como sistemas de control de armónicos, que beneficiarán a la industria y a la comunidad profesional.

Este proyecto representa un aporte relevante al campo de la ingeniería eléctrica, ya que se centra en la selección adecuada de filtros pasivos para mejorar la calidad de la energía en redes de distribución eléctrica. A través de un análisis técnico y comparativo, se busca identificar los filtros más eficaces que permitan mitigar perturbaciones armónicas y garantizar un funcionamiento estable y confiable del sistema. Este enfoque contribuye a optimizar la operación de las redes, reduciendo costos y mejorando su desempeño global.

ABSTRACT.

The presented work, titled "Selection of Passive Filters in DigSILENT for the Mitigation of Reactive Currents Based on the Power Quality Report Conducted on a 2000 kVA Transformer," simulates a passive filter using the DigSILENT Power Factory software. The objective of this filter is to mitigate the reactive currents identified in the power quality analysis, reducing electrical billing costs and ensuring cleaner energy.

This project arises from the critical need to guarantee the integrity and optimal performance of electrical equipment, which is constantly threatened by power quality issues associated with the presence of harmonics. Among the most common consequences of this phenomenon are low power factor, the generation of parasitic currents, and the untimely disconnection of capacitor banks. To mitigate these adverse effects, the implementation of passive filters is proposed, as they have proven to be an effective solution for controlling and eliminating harmonics, thereby significantly improving the quality of the supplied energy.

During its development, a field power quality analysis is conducted to observe the behavior of harmonics without a passive filter in place. Additionally, the selection of the passive filter is carried out through a simulation that allows for the study of harmonic indicators with a filter. Furthermore, we examine how different electrical parameters are affected by parasitic currents and propose the use of passive filters to achieve higher energy quality.

Using specialized software such as DigSILENT and PowerVisionPlus for electrical data visualization, the electrical system will be modeled based on the power quality analysis to deeply analyze the behavior of harmonics. The results of these simulations will serve as the foundation for designing practical and efficient

solutions, such as harmonic control systems, which will benefit both the industry and the professional community.

This project represents a significant contribution to the field of electrical engineering, as it focuses on the proper selection of passive filters to improve energy quality in electrical distribution networks. Through a technical and comparative analysis, the aim is to identify the most effective filters to mitigate harmonic disturbances and ensure stable and reliable system operation. This approach contributes to optimizing network performance, reducing costs, and improving overall efficiency.

INDICE DE CONTENIDO

| CERTIFICA | CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | | | | |
|-----------|--|-------|--|--|--|
| CERTIFICA | ADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDA | ١D | | | |
| POLITÉCN | NICA SALESIANA | II | | | |
| CERTIFIC | ADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | 111 | | | |
| DEDICATO | ORIA | IV | | | |
| AGRADEC | CIMIENTO | v | | | |
| RESUMEN | ١ | VIII | | | |
| ABSTRACT | Т | X | | | |
| INDICE DE | E CONTENIDO | . XII | | | |
| ÍNDICE DE | E FIGURAS | .xv | | | |
| ÍNDICE DE | E TABLAS | xvii | | | |
| CAPITULO |) I: INTRODUCCIÓN | 1 | | | |
| 1.1 | TITULO | 1 | | | |
| 1.2 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. | 1 | | | |
| 1.3 | JUSTIFICACIÓN: | 2 | | | |
| 1.4 | OBJETIVOS: | 2 | | | |
| 1.4.1 | OBJETIVO GENERAL. | 2 | | | |
| 1.4.2 | 2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | 3 | | | |
| 2 CAPI | ITULO II: MARCO TEORICO | 4 | | | |
| 2.1 | CALIDAD DE ENERGÍA | 4 | | | |
| 2.2 | DEFINICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA | 5 | | | |
| 2.2.2 | 2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS BÁSICOS | 7 | | | |
| 2.2.3 | 3 INDICADORES Y FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA Y FORMA DE ONDA | 7 | | | |
| 2.2 | 2.3.1 VARIACIONES DE VOLTAJE. | 8 | | | |
| 2.2 | 2.3.2 ARMÓNICOS | 8 | | | |
| 2.2 | 2.3.3 DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN | 8 | | | |
| 2.2 | 2.3.4 PERTURBACIONES EN LA RED | 8 | | | |
| 2.2.4 | 4 COSTOS ASOCIADOS A MALA CALIDAD | 8 | | | |
| 2.3 | ANÁLISIS DE NORMAS INTERNACIONALES. | 9 | | | |
| 2.3.1 | NORMATIVAS QUE REGULAN LAS EMISIONES DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE | 10 | | | |

| | 2.3.2 | INTE | RNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISION (IEC) | 10 |
|-----|--------------|----------|---|-----|
| | 2.3.2 | 2.1 | NORMA IEC 61000-3-2. | 10 |
| | 2.3.2 | 2.2 | NORMA IEC 61000-1-1 | 11 |
| | 2.3.2 | 2.3 | NORMA IEC 61036 | 12 |
| | 2.3.2 | 2.4 | NORMA IEEE 519 - 2022 | 13 |
| | 2.3.2 | 2.5 | NORMA UNE – ENV 6100, 2-2 | 14 |
| | 2 | .3.2.5.1 | I LÍMITES DE ARMÓNICOS EN VOLTAJE | 14 |
| | 2.3.2 | 2.6 | NORMA UNE- EN 6100, 2-4. | 15 |
| | 2 | .3.2.6.1 | I VALORES LÍMITE | 16 |
| | 2.3.2 | 2.7 | NORMA EN 50 160. | 16 |
| | 2.3.3 | MET | ODOS DE MEDICION | 17 |
| | 2.3.3 | 3.1 | ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y DE LA FRECUENCIA | 18 |
| | 2.3.3 | 3.2 | | 18 |
| | 2.3.4 | SIST | EMAS DE MONITOREO DE ENERGIA | 20 |
| 2.4 | 4 C | CLASIF | ICACIÓN DE ARMÓNICOS | 21 |
| | 2.4.1 | ARM | ÓNICOS DE TENSIÓN | 21 |
| | 2.4.2 | ARM | ÓNICOS DE CORRIENTE | 22 |
| 2.5 | 5 A | RMÓN | IICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS | 22 |
| | 2.5.1 | DEFI | NICIÓN DE ARMÓNICOS | 22 |
| | 2.5.2 | ORIC | GEN DE ARMÓNICOS | 24 |
| | 2.5.3 | PRIN | ICIPIO DE ORDENAMIENTO DE LOS ARMÓNICOS | 25 |
| | 2.5.4 | EFEC | CTOS DE ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES | 26 |
| | 2.5.5 | EFEC | CTOS DE ARMÓNICOS SOBRE CAPACITORES | 27 |
| | 2.5.6 | EFEC | CTOS DE ARMÓNICOS SOBRE CONDENSADORES | 28 |
| | 2.5.7 | EFEC | CTOS DE ARMÓNICOS SOBRE MOTORES | 29 |
| | 2.5.8 | EFEC | CTOS DE ARMÓNICOS SOBRE OTROS EQUIPOS CONECTADOS | |
| | 2.5.9 | MED | ICIÓNES DE ARMÓNICOS | |
| | 2.5.10 | LU | JGARES DONDE SE DEBE EFECTUAR EL REGISTRO DE MEDICIONES | |
| 2.6 | 6 E | | DS DE MEDICIÓNES | |
| | 2.6.1 | FOU | IPO DE ANALIZADOR DE REDES MEMOBOX 300 | |
| | 262 | FOU | IPO DE ANÁLIZADOR DE REDES TOPAS 1000 | .34 |
| | 263 | FOU | IPO DE ANÁLIZADOR DE REDES MYEROX- 1500 | 36 |
| | 261 | | PIEDADES V BASES DE OPERACIÓN | |
| | 2.0.4 26/ | 1 1 | | رد |
| | 2.0.4 | 4.2 | CARACTERÍSTICA DEL ANALIZADOR DE REDES TOPAS 1000 | |
| | 2.6.4 | 4.3 | CARACTERÍSTICAS DEL ANALIZADOR DE REDES MYEBOX- 1500. | |
| | | | | |

| 3 | CAP | TULO III CALIDAD DE ENERGÍA | 43 |
|---|-------|--|----|
| | 3.1 | ANÁLISIS DE LOS INDICADORES ELÉCTRICOS | 45 |
| | 3.2 | ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE CORRIENTE Y TENSIÓN | 48 |
| | 3.3 | ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE Y TENSIÓN | 54 |
| | 3.4 | SELECCIÓN DE FILTROS | 59 |
| 4 | CAP | TULO IV: SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN DIGSILENT | 60 |
| | 4.1.1 | DIAGRAMA UNIFILAR | 60 |
| | 4.2 | CONFIGURACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA EN EL SOFTWARE DIGSILENT | 62 |
| | 4.2.1 | CONFIGURACIÓN DE RED EXTERNA | 62 |
| | 4.3 | CONFIGURACIÓN DE BARRAS. | 63 |
| | 4.3.1 | BARRA B0 | 63 |
| | 4.3.2 | BARRAS B1-B2-B3-B4-B5 | 65 |
| | 4.4 | CONFIGURACIÓN DE LÍNEA | 69 |
| | 4.5 | CONFIGURACIÓN DEL TRANSFORMADOR. | 71 |
| | 4.6 | CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS | 71 |
| | 4.7 | CONFIGURACIÓN DEL FILTRO PASIVO. | 77 |
| 5 | CAP | TULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS | 80 |
| 6 | CAP | TULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. | 86 |
| 7 | BIBL | OGRAFÍA | 88 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| FIGURA 1. PIRÁMIDE DE CALIDAD DE ENERGÍA | 4 |
|---|----|
| FIGURA 2. ONDA DE VOLTAJE SIN SOBRETENSIÓN | 5 |
| FIGURA 3. ONDA CON SOBRETENSIÓN. | 6 |
| FIGURA 4. PARÁMETROS DE UN ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA. | 7 |
| FIGURA 5. COSTOS PRODUCIDOS POR PROBLEMAS DE ARMÓNICOS | 9 |
| FIGURA 6. CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS MENOR A 16A, COMO INDICA LA NORMA IEC 61000-3-2 | 11 |
| FIGURA 7 FILTRO INSTALADO EN LA RED | 19 |
| FIGURA 8 IMPEDANCIA EN FUNCIÓN A LA FRECUENCIA. | 19 |
| FIGURA 9 ONDA SIN PRESENCIA DE ARMÓNICO. | 23 |
| FIGURA 10. ONDA CON PRESENCIAS DE ARMÓNICOS | 24 |
| FIGURA 11. FACTOR DE PROTECCIÓN CONTRA ARMÓNICOS PARA MOTORES. | |
| FIGURA 12. DISTRIBUCION DE PINES DEL MEMOBOX | 33 |
| FIGURA 13. EQUIPO PARA ANÁLISIS TOPAS 1000. | 34 |
| FIGURA 14. ANALIZADOR DE REDES MYEBOX 1500 | 36 |
| FIGURA 15. ANALIZADOR DE REDES MEMOBOX 300. | 37 |
| FIGURA 16. ANALIZADOR DE REDES TOPAS 1000 | 40 |
| FIGURA 17. ANALIZADOR DE REDES MIEBOX-1500 CONECTADO AL SISTEMA ELÉCTRICO | 43 |
| FIGURA 18. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL TRANSFORMADOR DE 2000 KVA | 45 |
| FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE POR FASE DEL TRANSFORMADOR 2000 KVA | 46 |
| FIGURA 20. DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA RED PRODUCIDA POR VARIADORES DE FRECUENCIA | 48 |
| FIGURA 21. COMPORTAMIENTO EN FORMA DE ONDA DE CORRIENTE Y VOLTAJE DEL L1 | 50 |
| FIGURA 22. COMPORTAMIENTO EN FORMA DE ONDA DE CORRIENTE Y VOLTAJE DEL L2 | 51 |
| FIGURA 23. COMPORTAMIENTO EN FORMA DE ONDA DE CORRIENTE Y VOLTAJE DEL L3 | 52 |
| FIGURA 24. ÍNDICE DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE POR FASES PRESENTES EN EL TRANSFORMADOR DE 2000 KVA | 54 |
| FIGURA 25. ÍNDICE DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE POR FASES PRESENTES EN EL TRANSFORMADOR DE 2000 KVA | 55 |
| FIGURA 26. REGISTRO DE % DE ARMÓNICOS DE CORRIENTES PRESENTES EN LA LÍNEA #1 | 56 |
| FIGURA 27. REGISTRO DE % DE ARMÓNICOS DE CORRIENTES PRESENTES EN LA LÍNEA # 2 | 57 |
| FIGURA 28. REGISTRO DE % DE ARMÓNICOS DE CORRIENTES PRESENTES EN LA LÍNEA #3 | 58 |
| FIGURA 29 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED ELÉCTRICA PARA LA MITIGACIÓN DE CORRIENTE REACTIVA EN DIGSILENT | |
| PowerFactory | 61 |
| FIGURA 30 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE FLUJO DE CARGA EN DIGSILENT POWERFACTORY | 62 |
| FIGURA 31 CONFIGURACIÓN DE BARRA DE 13.8 KV EN DIGSILENT POWERFACTORY | 63 |
| FIGURA 32 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL FLUJO DE CARGA EN DIGSILENT POWERFACTORY | 64 |
| FIGURA 33 CONFIGURACIÓN DE BARRA B1 EN TERMINAL - DATOS BÁSICOS | 65 |

| FIGURA 34 CONFIGURACIÓN DE BARRA B2 EN TERMINAL - DATOS BÁSICOS | 66 |
|--|----|
| FIGURA 35 CONFIGURACIÓN DE BARRA B3 EN TERMINAL - DATOS BÁSICOS | 66 |
| FIGURA 36 CONFIGURACIÓN DE BARRA B4 EN TERMINAL - DATOS BÁSICOS | 67 |
| FIGURA 37 CONFIGURACIÓN DE BARRA B5 EN TERMINAL - DATOS BÁSICOS | 67 |
| FIGURA 38 CONFIGURACIÓN DE BARRA B1-B2-B3-B4-B5 EN TERMINAL - CONTROL DE TENSIÓN | 68 |
| FIGURA 39. CONFIGURACIÓN DE BARRA EN TERMINAL | 69 |
| FIGURA 40 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE DATOS BÁSICOS DE LA LÍNEA | 70 |
| FIGURA 41 PARAMETRIZACIÓN DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN SOFTWARE DE SIMULACIÓN ELÉCTRICA | 71 |
| FIGURA 42 PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M1. | 72 |
| FIGURA 43. PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M2 | 73 |
| FIGURA 44. PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M3. | 73 |
| FIGURA 45, PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M4. | 74 |
| FIGURA 46. PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M5. | 74 |
| FIGURA 47 PARAMETRIZACIÓN FLUJO DE CARGA DEL M6 | 75 |
| FIGURA 48. CREACIÓN DE ESCENARIO DE ARMÓNICOS. | 76 |
| FIGURA 49. TABLA DE ARMÓNICOS DESBALANCEADAS PARA CARGAS NO LINEALES. | 77 |
| FIGURA 50 PARAMETRIZACIÓN DEL FILTRO PASIVO. | 78 |
| FIGURA 51 DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO PASIVO. | 78 |
| FIGURA 52 ESTADO INICIAL DE CORRIENTE | 80 |
| FIGURA 53. ESTADO INICIAL DE VOLTAJE | 81 |
| FIGURA 54 ESTADO INICIAL DE ARMÓNICOS. | 82 |
| FIGURA 55 PORCENTAJE DE ARMÓNICO INICIAL | 82 |
| FIGURA 56. ESTADO FINAL DE CORRIENTE | 83 |
| FIGURA 57. ESTADO FINAL DE VOLTAJE | 84 |
| FIGURA 58. PORCENTAJES DE ARMÓNICO DE CORRIENTE PRESENTES EN LA RED | 85 |

ÍNDICE DE TABLAS

| TABLA 2-1 Límites de los contenidos de armónicos de voltajes IEEE 519 14 |
|--|
| Tabla 2-2 Valores máximos de compatibilidad 15 |
| Tabla 2-3 Valores máximos impares 16 |
| Tabla 2-4 Valores máximos de distorsión de voltaje individuales 17 |
| Tabla 2-5 Parámetros principales de la norma 17 |
| Tabla 2-6 Secuencia de armónicos. 26 |
| TABLA 2-7 TABLA DE MEDICIONES DE TOPAS 1000 35 |
| TABLA 3-1 PROBLEMAS SIGNIFICATIVOS ARROJADOS POR EL ANALIZADOR EN EL TRANSFORMADOR DE 2000KVA 46 |
| TABLA 3-2 Sistema eléctrico con cargas predominantemente inductivas y capacitivas |
| Tabla 3-3 Análisis de la Forma de Onda de Corriente y Tensión |
| TABLA 3-4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y UBICACIÓN DE MOTORES 72 |
| Tabla 3-5. Porcentaje de armónicos presentes en cada fase. 76 |
| Tabla 3-6. Dependencia de la frecuencia en R-L y condensador. 79 |

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.

1.1 TITULO.

Selección de filtros pasivos en DIGSILENT para la mitigación de corrientes reactivas de acuerdo con informe de calidad de energía realizado en un transformador de 2000 kVa

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la planta de fabricación de morteros de guayaquil, se han identificado problemas críticos de calidad de energía atribuidos a la presencia de armónicos eléctricos, caracterizados por los siguientes parámetros tales como el bajo factor de potencia, las corrientes parasitas y desconexión de banco de capacitores. Estos problemas están asociados al uso de cargas no lineales, como variadores de frecuencia, que son propensos a generan corrientes parasitas, al momento de que estas se presentan en formas de reactivas se evidencia que el consumo aparente de la planta aumenta generando la distorsión eléctrica de la red. Mediciones con analizadores de red registran picos de corriente y porcentajes elevados dentro del Total Harmonics Distorsión (THD), debido a esto ocurre un decaimiento del factor de potencia, obligando al banco de capacitores de la planta a desactivarse por sobrecarga cuyos picos y frecuencia hayan sido lo suficientemente elevados para inducir corrientes parásitas.

1.3 JUSTIFICACIÓN:

La implementación de filtros pasivos para la mitigación de corrientes reactivas es fundamental para mejorar la calidad de energía en la planta de morteros de Guayaquil. Esta solución económica y eficiente reduce las distorsiones armónicas generadas por cargas no lineales, corrige el factor de potencia y minimiza el consumo de energía reactiva, logrando un desempeño confiable gracias al uso de componentes sintonizados para frecuencias armónicas específicas. Los beneficios incluyen la protección de equipos eléctricos, al disminuir vibraciones y pérdidas térmicas, prolongando su vida útil y reduciendo costos de mantenimiento. Además, un análisis detallado en DIgSILENT permite optimizar el diseño de los filtros para asegurar su efectividad, prevenir resonancias y cumplir con normativas de calidad de energía, maximizando la eficiencia operativa y la estabilidad del suministro energético.

1.4 OBJETIVOS:

1.4.1 OBJETIVO GENERAL.

Seleccionar un sistema de filtros pasivos en el software de simulación DIGSilent para mitigar las corrientes reactivas y las distorsiones armónicas en el sistema eléctrico de un transformador de 2000 kVa. Este proceso tiene como objetivo reducir las pérdidas de energía asociadas a las corrientes reactivas, mejorar el factor de potencia y garantizar una mejor calidad de energía en cumplimiento con los estándares normativos establecidos. La implementación de los filtros pasivos busca optimizar la operación del sistema eléctrico, reducir el desgaste de los equipos y minimizar los costos operativos a largo plazo. El objetivo es diseñar un sistema de filtrado pasivo específico para las condiciones del transformador de 2000 kVa. A través del uso de DIGSILENT, se llevará a cabo una simulación detallada del comportamiento de los filtros pasivos, considerando la compensación de corrientes reactivas y la mitigación de distorsiones armónicas, con el fin de asegurar el máximo beneficio para la eficiencia energética del sistema. La elección de los filtros pasivos estará orientada a ofrecer una solución eficiente, rentable y conforme a las regulaciones vigentes en cuanto a calidad de energía. Se simulará el rendimiento de diferentes configuraciones de filtros pasivos para determinar cuál de ellas presenta la mejor reducción de las corrientes reactivas y las armónicas presentes, garantizando que el transformador opere dentro de los parámetros óptimos de calidad de energía. A través de este enfoque, se busca no solo mejorar la eficiencia operativa del transformador, sino también prolongar su vida útil y reducir el impacto ambiental asociado a las pérdidas de energía.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Registrar la distorsión armónica presente en el transformador de 2000kVa, mediante el uso de un equipo analizador de red, MYeBOX-1500, para identificar los niveles de armónicos más significativos.
- Simular los filtros pasivos, mediante el software DigSILENT, para atenuar los efectos causados por los niveles de armónicos presentes en la red.
- > Analizar el nuevo comportamiento de las corrientes parasitas.

2 CAPITULO II: MARCO TEORICO.

2.1 CALIDAD DE ENERGÍA.

Esta se define como la capacidad del suministro eléctrico para mantener las condiciones necesarias que aseguren el funcionamiento continuo y eficiente de los equipos, Evitando fallas o afectaciones en su desempeño, Interrupciones, Armónicos y eventos transitorios, Los cuales suelen derivar de eficiencias en las instalaciones eléctricas más que del suministro propiamente dicho. Estos problemas pueden dividir en dos categorías principales:

Los que ocasionan interrupciones en el servicio eléctrico o desconexión de circuitos.

Los que afectan la operación de los equipos y sistemas de suministro mediante pérdida funcional

Como lo indica,[1] un diseño eléctrico confiable como un sistema de puesto de tierra adecuado es crucial para minimizar el impacto de esta perturbación, Promoviendo la estabilidad y el correcto desempeño de equipo es sensibles según los principios establecidos en la pirámide de calidad de energía como lo muestra en la **figura 1**.



Fuente: Adaptación propia autor

2.2 DEFINICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA.

La calidad de la energía se refiere a un conjunto de condiciones que determinan el impacto de los fenómenos eléctricos en los equipos del usuario cuando las características de la corriente alternan superan ciertos umbrales como se muestra en la **figura 2**. una forma de onda que actúa como indicador de la calidad del suministro eléctrico aceptables, una forma de Honda que actúa como indicador de la calidad del suministro eléctrico la cual debe cumplir con parámetros específicos [2].

Esta gráfica muestra una onda senoidal normal sin sobretensión.



figura 2. Onda de voltaje sin sobretensión. Fuente: Adaptación propia autor

1. Amplitud.

Mantener un nivel constante en el valor RMS de la tensión.

2. Continuidad.

Garantizar que la onda eléctrica no presente interrupciones.

3. Forma de onda.

Asegura que la onda sea uniforme y esté libre de distorsiones.

4. Frecuencia.

Proveer un rango estable y constante de valores de frecuencia.

Si por alguna razón la forma de dónde ilustrada en la **figura 1**. excede los límites establecidos, Se produce una condición de baja calidad de energía. En este caso, La forma de onda puede transformarse en algo similar a la **figura 3**, Representando un fenómeno conocido como sobretensión de voltaje, el cual se incrementa de manera momentánea generando posibles daños en la fuente de alimentación.

Esta gráfica muestra una onda senoidal roja con sobretensión en un momento específico. La sobretensión se representa como un pico en la onda.



Onda Sinusoidal con Sobretensión

figura 3. Onda con sobretensión. Fuente: Adaptación propia autor

2.2.2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS BÁSICOS.

En un análisis de calidad de energía es esencial registrar los siguientes parámetros mínimos como lo muestra **figura 4**:



figura 4. Parámetros de un estudio de calidad de energía. Fuente: Adaptación propia autor

2.2.3 INDICADORES Y FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA Y FORMA DE ONDA.

Según [3], los principales indicadores de calidad de energía están relacionadas con una fuente de alimentación confiable, que, incluyendo el voltaje, la corriente y junto a ellos la calidad del consumo de energía.

Si estos parámetros llegan a fallar producen variaciones de frecuencia, fluctuaciones, inestabilidad en la red, caída de tensión entre otras que afectan gravemente al sistema como las que son:

2.2.3.1 VARIACIONES DE VOLTAJE.

Este se produce cuando una línea eléctrica es inestable y aumenta o reduce su valor al 10% de voltaje nominal y varía las condiciones o cargas de la línea eléctricas, Estas variaciones provocan daños parciales o totales a los equipos que operan a un voltaje mayor o menor para los cuales fueron diseñados

2.2.3.2 ARMÓNICOS.

Esto reduce el rendimiento de los sistemas eléctricos el cual aumenta el envejecimiento del aislamiento y como consecuencia la reducción de energía y a su vez amplificando los armónicos llevando resonancia en serie y paralelo

2.2.3.3 DESEQUILIBRIOS DE TENSIÓN.

[4] un sistema trifásico desequilibrado puede ocasionar un bajo rendimiento o fallos prematuros en motores y carga trifásica de vida factores como un menor torque corrientes elevada y la circulación de corrientes desequilibradas a través del conductor neutro en configuración estrella

2.2.3.4 PERTURBACIONES EN LA RED

Como señala [5] Las anomalías en el voltaje del suministro eléctrico pueden generar fallos o daños a equipos conectados a la red de distribución los cuales estos cambios bruscos de voltaje son los más perjudiciales debido a su naturaleza imprescindible

2.2.4 COSTOS ASOCIADOS A MALA CALIDAD

Estas perturbaciones en la calidad de energía conllevan costos [6] los cuales se pueden visualizar en la **figura 5**



figura 5. Costos producidos por problemas de armónicos. Fuente: Adaptación propia autor

2.3 ANÁLISIS DE NORMAS INTERNACIONALES.

Desde mediados de la década de 1990, la "Calidad de Potencia" ha ganado visibilidad en Ingeniería Eléctrica, interesando a productores, distribuidores, fabricantes y consumidores. Aunque el término es familiar, su uso es debatido al no referirse directamente a la calidad de la potencia como magnitud física.

El Institute for Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ha oficializado el término a través del comité SCC-22, que coordina estandarización en este ámbito. Según el diccionario del IEEE (basado en [7]):

"Calidad de Potencia: Alimentación y puesta a tierra adecuadas para el funcionamiento de equipos sensibles."

Aunque esta definición es restrictiva, el IEEE aplica el concepto de manera más amplia, abarcando estándares relacionados con la contaminación armónica. Por otro lado, la IEC (International Electrotechnical Commission) prefiere "Compatibilidad Electromagnética (EMC)" en sus estándares, pese a la superposición de significados con la Calidad de Potencia.

2.3.1 NORMATIVAS QUE REGULAN LAS EMISIONES DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE.

Esta se enfoca en el estudio de la compatibilidad electromagnética entre los equipos y la red eléctricos, específicamente en el problema de la distorsión armónica de corriente.

El objetivo es analizar las normativas internacionales que establecen los límites máximos permitidos para estas distorsiones, con el fin de mejorar la calidad de operación y energía adecuada de los sistemas eléctricos. A través de este análisis, se busca comprender la estructura y los requisitos de estas normas para asegurar la interoperabilidad entre los diferentes equipos conectados a la red.

2.3.2 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISION (IEC)

2.3.2.1 NORMA IEC 61000-3-2.

Dicha norma internacional establece un marco regulatorio para los límites de generación de corrientes armónicas en dispositivos que operan con un flujo de entrada de hasta 16 amperios por línea y se conectan a instalaciones públicas de baja tensión.

Dentro de esta norma, los equipos se clasifican según un diagrama de flujo, que permite identificar dicha forma de onda de corriente "especial" caracterizada por tener su envolvente dentro de la forma "T invertida" al menos el 95% del tiempo.

Una de las consideraciones clave en esta norma es la distinción entre categorías de equipos, destacando que los límites de emisión para equipos de Clase B se determinan mediante la extensión al 1,5 de los límites establecidos para los dispositivos de Clase A, asegurando así un enfoque para la evaluación de la emisión de corrientes armónicas en función de la clasificación del equipo como se ilustra en la **figura 6**.



figura 6. Clasificación de equipos menor a 16A, como indica la norma IEC 61000-3-2 Fuente: Cicutor

2.3.2.2 NORMA IEC 61000-1-1.

La norma IEC 61000-1-1 establece los fundamentos para garantizar la compatibilidad electromagnética (EMC) en sistemas de potencia, destacando que el funcionamiento óptimo de estos sistemas depende de una doble armonía: la calidad de la tensión suministrada por la fuente y el nivel de calidad de las corrientes demandadas por la carga.

En este contexto, la EMC se redefine como la eficiencia de un dispositivo, equipo o sistema para coexistir sin interferir dentro de su contexto electromagnético, asegurando que su operación no

solo sea satisfactoria para sí mismo, sino también para otros dispositivos cercanos, creando un entorno electromagnético. saludable donde todos los componentes puedan funcionar en perfecta sincronización[7].

2.3.2.3 NORMA IEC 61036.

Este estándar se enfoca exclusivamente en medidores de vatios-hora estáticos de última generación, diseñados para entornos interiores y exteriores, y que cumplen con las clases de precisión más exigentes: Clase 1 y Clase 2.

Su aplicación se circunscribe a la medición de energía eléctrica. activa en corriente alterna (CA), dentro de un rango de frecuencia específico: 45 Hz a 65 Hz. Las pruebas asociadas a estos medidores también se rigen por este estándar, asegurando un nivel óptimo de exactitud y confiabilidad en la medición de la energía eléctrica[8].

1. Temperatura ambiente:

- Valor de referencia 23 °C.
- \succ Tolerancia permisible: ± 2 °C.

2. Voltaje:

- Valor de referencia: Voltaje de referencia.
- \blacktriangleright Tolerancia permisible: ±1,0 %.

3. Frecuencia:

- Valor de referencia: Frecuencia de referencia.
- > Tolerancia permisible: ± 0.3 %.

4. Forma de onda:

- Valor de referencia: Voltajes y corrientes sinusoidales.
- Tolerancia permisible: Factor de distorsión inferior al 3 %.

5. Inducción magnética externa a frecuencia de referencia:

- Valor de referencia: Inducción magnética igual a cero.
- Tolerancia permisible: ±0,2 % (para clase 1) y ±0,3 % (para clase 2), pero no debe superar los 0,05 metros cuadráticos por metro.

Notas adicionales:

Si las pruebas se realizan a una temperatura diferente a la de referencia, los resultados deben corregirse usando el coeficiente de temperatura del medidor.

Procedimiento de prueba:

- Monofásico:
 - > Medir los errores con el medidor conectado a la red.
 - Si la diferencia entre ambos errores excede el valor permitido, la prueba debe repetirse a factores de potencia de 0,1 y 0,5.
- Trifásico:
 - Realizar tres mediciones a factores de potencia de 0,1 y 0,5.
 - Cambiar el orden de conexión de los circuitos de voltaje 120° y asegurarse de que no haya secuencia inversa de fases.
 - > El mayor valor de diferencia entre errores determinará la variación del error.

2.3.2.4 NORMA IEEE 519 - 2022.

Estas regulaciones vinculadas a los armónicos han sido compiladas por [9] el cual nos indica que, La norma define límites y pautas para manejar la distorsión armónica en los sistemas de energía eléctrica. Su principal meta es asegurar que la electricidad sea de buena calidad, reduciendo al máximo los problemas causados por los armónicos. Estos armónicos son generados por equipos como dispositivos electrónicos, variadores de velocidad y otros aparatos que, al funcionar, pueden alterar la red eléctrica.

Estos controles para verificar la calidad de energía referente al contenido de armónico y el balance de voltaje se debe hacer anual para la mayoría de las instalaciones, semestral para instalaciones

con carga no lineales o donde se hayan detectado problemas, estos con el objetivo de verificar que se mantengan dentro de los límites permitidos, los ítems se muestran en la tabla **;Error! No se e ncuentra el origen de la referencia.**

| TENSIÓN DE BARRAS (KV) | DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL MÁXIMA vi(%) | VTHD MÁXIMO (%) |
|---------------------------|--|--------------------|
| $Vn \le 69kV$ | 3.00 | 5.00 |
| $69 < Vn \le 161 kV$ | 1.50 | 2.50 |
| > 161kV | 1.00 | 1.50 |

Tabla 2-1 Límites de los contenidos de armónicos de voltajes IEEE 519

2.3.2.5 NORMA UNE – ENV 6100, 2-2.

Esta normativa define los niveles de compatibilidad electromagnética para perturbaciones de baja frecuencia y la transmisión de señales en redes de baja tensión pública. Se enfoca en perturbaciones que ocurren hasta 10 kHz, incluyendo armónicos, fluctuaciones de voltaje, caídas de voltaje, micro cortes y desequilibrios. Aplica a redes de distribución alternas de 50 o 60 Hz, con voltajes máximos de 240 V en sistemas monofásicos y 415 V en sistemas trifásicos.

El propósito de esta normativa es establecer los niveles de compatibilidad electromagnética que deben cumplirse en las redes públicas de baja tensión, garantizando que los armónicos generados por dispositivos no excedan los límites especificados y que cada dispositivo opere correctamente a pesar de las perturbaciones presentes.

2.3.2.5.1 LÍMITES DE ARMÓNICOS EN VOLTAJE

Los niveles máximos permitidos de armónicos en voltaje para las redes públicas de distribución se detallan en la **;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La tasa total de distorsión a rmónica en voltaje (THD) debe ser menor al 8%. Esto implica que todos los dispositivos deben

ser capaces de soportar este nivel de distorsión y, al mismo tiempo, no deben contribuir a superar este límite.

| múltiplos de 3 | | múltiplos de 3 | | Armónicos pares | |
|----------------|--------------|----------------|--------|-----------------|--------|
| Rango | Uh (%) | Rango (h) | Uh (%) | Rango (h) | Uh (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,3 | 6 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,2 | 8 | 0,5 |
| 17 | 2 | >21 | 0,2 | 10 | 0,5 |
| 19 | 1,5 | | | 12 | 0,2 |
| 23 | 1,5 | | | >12 | 0,2 |
| 25 | 1,2 | | | | |
| >25 | 0,2+0,5x25/h | | | | |

Tabla 2-2 Valores máximos de compatibilidad

2.3.2.6 NORMA UNE- EN 6100, 2-4.

Esta norma clasifica los entornos en tres categorías

- Clase 1: Redes protegidas con niveles de compatibilidad más estrictos que los de las redes públicas.
- Clase 2: Entornos industriales generales, con los mismos niveles de compatibilidad que las redes públicas.
- Clase 3 Entornos industriales severos, donde se permiten niveles más altos de perturbaciones.

2.3.2.6.1 VALORES LÍMITE

La Tabla 2 muestra los niveles máximos permitidos de armónicos en voltaje para armónicos impares no múltiplos de 3, según las diferentes clases.

| Armónicos impares no múltiplos de 3 | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--|--|
| Rango | Clase 1 Uh (%) | Clase 2 Uh (%) | Clase 3 Uh (%) | | |
| 5 | 3 | 6 | 8 | | |
| 7 | 3 | 5 | 7 | | |
| 11 | 3 | 3,5 | 5 | | |
| 13 | 3 | 3 | 4,5 | | |
| 17 | 2 | 2 | 4 | | |
| 19 | 1,5 | 1,5 | 4 | | |
| 23 | 1,5 | 1,5 | 3,5 | | |
| 25 | 1,5 | 1,5 | 3,5 | | |
| >25 | 0,2+12,5/h | 1,5 | $5 \mathrm{x} \sqrt{11/h}$ | | |
| THD (V) | 5 | 8 | 10 | | |

Tabla 2-3 Valores máximos impares

2.3.2.7 NORMA EN 50 160.

La Norma EN 50 160 establece los límites y variaciones permitidos para la calidad del voltaje en redes públicas de distribución. Cumplir con esta norma implica realizar mediciones exhaustivas y continuas de varios parámetros del voltaje, como la frecuencia, los valores reales, las caídas y aumentos de voltaje, las interrupciones, la concentración de armónicos y el índice de severidad Flicker, entre otros. Es necesario registrar estos valores de manera ininterrumpida durante al menos una semana para garantizar un control adecuado.

| Armónicos impares no múltiplos de 3 | | Armónicos impares múltiplos de 3 | | Armónicos pares | |
|--|--------|-------------------------------------|-----------|-----------------|--------|
| Rango (h) | Uh (%) | Rango (h) | Uh (%) | Rango (h) | Uh (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 624 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,2 | | | | |
| THD (V) < 8 % | | | | | |

| Tabla 2-4 Valores máximos de distorsión de voltaje individual |
|--|
|--|

| Parámetros | Método de medición | Intervalo | Período de monitoreo |
|---|---|--|-------------------------|
| Variaciones de voltaje | Promedio de los valores RMS instantáneos | Intervalo de 10 minutos | 1 semana |
| Eventos repentinos en Voltaje | Duración y amplitud | Capturado como evento individual | 1 día |
| Interrupciones de voltaje | Duración | Capturado como evento individual | 1 día |
| Armónicos e Interarmónicos de voltaje | Promedio de valores RMS 20 ms (acorde a IEC 1000-4-7). | Intervalo de 10 minutos | 1 semana |
| Flicker Plt | Índice de severidad Flicker de corto tiempo (Pst) para 10 minutos (acorde a IEC 868 o IEC 1000-4-15). | Promedio de 12 valores Pst (= 2h intervalo) | 1 semana |
| Desequilibrio | Valor promedio de relación entre componentes con secuencia negativa a secuencia positiva. | Intervalo de 10 minutos | 1 semana |
| Telecomandos | Clasificación de valores promedio de 3 - segundos. | Intervalo de 3 segundos | 1 día |
| Frecuencia de red | Clasificación de valores promedio de 10 - segundos. | Intervalo de 10 segundos | 1 semana |

Tabla 2-5 Parámetros principales de la norma

2.3.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN.

La calidad de la energía eléctrica se evalúa según estándares establecidos que sirven como guías para medir y valorar el suministro eléctrico. Estas normas no solo aseguran que las mediciones sean consistentes, sino que también ayudan a identificar diversos problemas relacionados con la calidad de la energía. Además, garantizan que los sistemas eléctricos cumplan con los criterios de calidad y confiabilidad requeridos[2].

Para entender y mitigar los efectos de los armónicos, se utilizan índices específicos que miden el nivel de distorsión en las ondas eléctricas. Estos índices se comparan con límites establecidos por las normas o con los niveles que los equipos pueden soportar sin afectar su funcionamiento. A continuación, se explican los índices más comunes utilizados en este análisis.

Índice para armónicos de corriente

2.3.3.1 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y DE LA FRECUENCIA

En el contenido revisado, se ha determinado que la transformada de Fourier, $F(\omega)$, de f(t), representa las magnitudes relativas de las diferentes armónicas de f(t). Entonces, $F(\omega)$ constituye la representación de f(t) en el dominio de la frecuencia, especificando el espectro de frecuencias de f(t). Mientras tanto, la representación en el dominio del tiempo define a la señal en cada instante de tiempo. Ambas representaciones definen única y completamente a la señal. De este modo, se pueden especificar las señales en dos formas: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia[10].

2.3.3.2 ANÁLISIS DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA.

Cuando se utilizan condensadores de potencia en sistemas con presencia de armónicos, pueden surgir condiciones de resonancia. En un circuito LC, la frecuencia de resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva iguala a la capacitiva. En sistemas que emplean condensadores para mejorar el factor de potencia o ajustar el perfil de tensiones, pueden aparecer resonancias en serie, en paralelo o una combinación de ambas.

En el caso de una resonancia en paralelo, la impedancia total en la frecuencia de resonancia es extremadamente alta (teóricamente infinita). Si una pequeña fuente de corriente externa excita el circuito a esta frecuencia, se genera una corriente significativa entre el condensador y la inductancia en paralelo, lo que aumenta la tensión en ese punto. Si las frecuencias generadas por las fuentes armónicas coinciden con estas resonancias, pueden producirse grandes corrientes armónicas y sobretensiones, lo que puede llevar a fallos en los capacitores, fusibles que se queman frecuentemente, sobrecalentamiento de transformadores y daños en cables aislados.
Los estudios de impedancia en función de la frecuencia buscan determinar cómo responde la red eléctrica a diferentes frecuencias desde un nodo específico. Esto se hace inyectando una corriente de 1A a una frecuencia dada y midiendo la tensión resultante en el nodo. La **figura 8** ilustra la impedancia en función de la frecuencia para el circuito mostrado en la **figura 7**.



figura 7 Filtro instalado en la red

Fuente: Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico



figura 8 Impedancia en función a la frecuencia. Fuente: Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico

La ubicación y magnitud de los polos y ceros dependen en gran medida de la precisión con que se conozcan las impedancias individuales.

- Las líneas de transmisión muestran variaciones significativas en sus parámetros con la frecuencia, por lo que su modelado preciso es crucial para obtener resultados confiables de Z(ω).
- Los transformadores de potencia también experimentan cambios en su inductancia con la frecuencia, ya que, al aumentar la frecuencia, disminuye la corriente de magnetización y aumenta el flujo de dispersión. Generalmente, esta disminución se observa después del armónico 17, por lo que en la mayoría de los casos se puede considerar constante. La reducción no es muy grande (alrededor del 80% en el armónico 25).
- La resistencia es uno de los parámetros que más varía con la frecuencia, especialmente en conductores gruesos donde el efecto piel se intensifica. Es necesario corregir este efecto para analizar resonancias en frecuencias medias y altas (más allá del armónico 17), y siempre debe tenerse en cuenta.
- Los conductores en máquinas y transformadores, compuestos por pequeños subconductores aislados, son muy sensibles al efecto piel.

2.3.4 SISTEMAS DE MONITOREO DE ENERGÍA

Un sistema de medición de parámetros eléctricos es fundamental para registrar las variables eléctricas en un momento dado, proporcionando así información esencial para comprender el comportamiento de un sistema de potencia.

Los sistemas de monitoreo energético pueden ser diseñados a medida según las necesidades específicas de medición de una planta. Es posible crear un sistema económico que capte las variables deseadas o un sistema más complejo que permita ampliaciones futuras

Entre las plataformas que se utilizan se encuentran[11], [12]:

- ➢ ELSPEC: Sapphire.
- ELSPEC: PQScada/Investigator.
- Schneider Electric: Power Monitoring Expert (anteriormente ION Enterprise).
- ➢ General Electric: Cimplicity.
- Mitsubishi: SCADA MC Works.

También ofrecemos sistemas de monitoreo personalizados y micro-sistemas para plantas pequeñas.

Equipos Esenciales Un sistema de monitoreo energético consiste en una combinación de sensores y medidores conectados a un servidor que centraliza la información, permitiendo al usuario visualizar los datos en tiempo real y acceder a los datos históricos.

Algunos elementos básicos necesarios para cualquier sistema de monitoreo son:

- Un servidor (que puede ser una computadora o un controlador logicístico programable, PLC).
- Sensores/Medidores para registrar electricidad, agua, aire, gas, vapor, entre otros.
- Sistemas de comunicación como Ethernet, WIFI, celular, RS232, RS485, radiofrecuencia, entre otros.

Estos sistemas permiten al usuario visualizar los datos en tiempo real y acceder a los registros históricos, brindando una herramienta valiosa para comprender y optimizar el desempeño del sistema de potencia.

2.4 CLASIFICACIÓN DE ARMÓNICOS

2.4.1 ARMÓNICOS DE TENSIÓN.

Los armónicos de tensión son distorsiones que alteran la forma de la onda de voltaje en un sistema eléctrico. Estas perturbaciones son el resultado de la presencia de frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (generalmente 50 o 60 Hz. La medida de distorsión armónica específica de tensión se define utilizando la siguiente ecuación (1):

$$D_{v} = \frac{V_{i}}{V_{n}} * 100\%$$
(1)

 $D_v =$ Índice de distorsión armónica individual de tensión.

 V_i = Valor de tensión de cada componente armónico.

 V_n = Voltaje nominal del sistema de alimentación.

La medida de distorsión armónica total de voltaje se establece mediante la ecuación (2):

$$THD_{v} = \frac{1}{V_{n}} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V_{i})^{2} * 100\%}$$
(2)

2.4.2 ARMÓNICOS DE CORRIENTE.

En el caso de la corriente, se utilizan dos tipos de indicadores: los de distorsión armónica específica y los de distorsión armónica global. El indicador de distorsión armónica individual se establece con la siguiente ecuación (3):

$$D_i = \frac{I_i}{I_n} \times 100\% \tag{3}$$

 $D_i =$ Índice de distorsión armónica específica de corriente.

 $I_i = Valor de correspondiente a armónico.$

 I_n = Corriente nominal del sistema de alimentación.

Los indicadores de distorsión armónica total se establecen como lo muestra la ecuación (4):

$$THD_{I} = \frac{1}{I_{L}} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_{i})^{2} x 100\%} \qquad TDD = \frac{1}{I_{d}} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_{i})^{2} x 100\%}$$
(4)

2.5 ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

2.5.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS

Para definir este concepto, es importante comprender primero la calidad de la onda de tensión. Una onda de tensión de calidad debe mantener una amplitud y frecuencia constantes, con una forma de onda sinusoidal ideal. La **figura 9** ilustra una onda de este tipo, sin contenido armónico, con una frecuencia constante de 60 Hz y una amplitud de 1 pu [13].



figura 9 Onda sin presencia de armónico. Fuente: Armonic.

Sin embargo, cuando una onda periódica no presenta esta forma sinusoidal pura, se dice que tiene contenido armónico. Esto puede alterar tanto el valor pico como el valor eficaz (RMS) de la onda, lo que a su vez puede provocar interrupciones en el funcionamiento normal de los equipos expuestos a dicha tensión.

La frecuencia de la onda periódica original se denomina frecuencia fundamental, mientras que los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia fundamental.

En otras palabras, la calidad de la onda de tensión se define por su forma sinusoidal, con amplitud y frecuencia constantes. Cualquier desviación de esta forma ideal implica la presencia de armónicos, los cuales pueden afectar el rendimiento de los equipos eléctricos conectados al sistema.

La figura 10 ilustra una onda de tensión que contiene un 30% del quinto armónico.



figura 10. Onda con presencias de armónicos

2.5.2 ORIGEN DE ARMÓNICOS.

Los armónicos son un fenómeno que surge a partir de cargas no lineales, las cuales presentan una respuesta distorsionada ante una señal de entrada sinusoidal. Existen diversas fuentes principales de armónicos:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga, como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran generadores de armónicos de tensión, con predominio de los armónicos impares. Típicamente se observa un 20% del 3er armónico, 10% del 5to, 6% del 7mo y 3% del 9no, en relación con la fundamental.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas, que requieren corriente de tercer armónico para la excitación del hierro.
- La corriente de irrupción de los transformadores, que produce armónicos de segundo y cuarto orden.
- Controladores de velocidad ajustables utilizados en ventiladores, bombas y procesos industriales.
- Interruptores de estado sólido que modulan corrientes de control, iluminación, calefacción, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.

- Rectificadores a base de diodos o tiristores, empleados en soldadura, cargadores de baterías, entre otros.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones de transmisión en corriente continua de alta tensión.
- Convertidores de corriente alterna a corriente continua (inversores).

2.5.3 PRINCIPIO DE ORDENAMIENTO DE LOS ARMÓNICOS.

En sistemas trifásicos equilibrados bajo condiciones normales, las ondas de corriente o voltaje tienen un desfase de 120° entre sí, con una secuencia de fases positiva (A, B, C). Los armónicos en cada fase, al tener frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental, presentan ángulos de desfase diferentes a los de las ondas fundamentales, lo que puede dar lugar a distintas secuencias de fase. En un sistema trifásico donde las ondas fundamentales están equilibradas y las tres fases tienen la misma forma de onda, podemos realizar el siguiente análisis. Tomando como referencia la componente fundamental de la fase A, las componentes fundamentales están definidas por la ecuación (5):

$$V_{a} = A \angle 0^{\circ} \qquad V_{b} = A \angle -120^{\circ} \qquad V_{c} = A \angle 120^{\circ} \tag{5}$$

A: Magnitud de la onda fundamental.

En el caso del armónico de orden k, el desfase θ_K con respecto a la frecuencia fundamental es igual en las tres fases, una condición necesaria para que las formas de onda sean iguales. Así, las componentes armónicas de orden k se expresan como muestra la ecuación (6):

$$V_{AK} = A_K \angle \phi_K \qquad V_{BK} = A_K \angle (\phi_K + \phi_{AB}) \qquad V_{CK} = A_K \angle (\phi_K + \phi_{AC}) \tag{6}$$

 A_K = Magnitud del armónico de orden k.

 φ_{AB} = Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B, expresado en grados del armónico k.

 ϕ_{AC} = Ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y C, expresado en grados del armónico k.

Tabla 2-6 ilustra la norma que sigue la secuencia de fases en los diversos armónicos.

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| armónicos | | | | | | | | | | | | | |
| Secuencia. | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + |

Tabla 2-6 Secuencia de armónicos.

2.5.4 EFECTOS DE ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES.

Los transformadores están diseñados para funcionar con corriente alterna a 50 o 60 Hz, y deben manejar el calor generado por sus pérdidas sin sobrecalentamiento. Estas pérdidas se dividen en dos tipos: sin carga (o de núcleo) y con carga. Los armónicos afectan principalmente las pérdidas con carga, aumentando las pérdidas I²R debido al efecto piel, y las pérdidas por corrientes de Eddy, que son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia. Esto puede elevar la temperatura en los devanados y afectar la vida útil del transformador. En resumen, los armónicos pueden aumentar las pérdidas en un transformador, lo que puede reducir su eficiencia y vida útil.

En términos técnicos, las pérdidas sin carga no se ven significativamente afectadas por los armónicos, mientras que las pérdidas con carga sí lo hacen. Es importante considerar estos factores al diseñar y operar transformadores para minimizar los efectos negativos de los armónicos y garantizar un funcionamiento eficiente y seguro.

Los estándares de la industria, específicamente la normativa ANSI/IEEE C57.110 [14] publicada en 1986, proporcionan un marco para evaluar la capacidad de carga de transformadores de potencia que operan con cargas no lineales. En este se tiene un índice de corriente máxima del transformador. el cual se calcula por:

$$I_{\max}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(PU)}{\left[\left(\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_{h}^{2}h^{2}/\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_{h}^{2}\right)\right]}\right] * P_{EC-R}(pu)I_{\max}(pu)$$
(7)

Imax(pu): Valor máximo de corriente de carga en unidades porcentuales

P_{LL-R}(PU): Pérdidas en el cobre (I2R) a carga nominal

f_h: Corriente armónica h en unidades relativas de la corriente fundamental

h: Número total de armónico

P_{EC-R}: Pérdidas de Eddy en relación con I2R

2.5.5 EFECTOS DE ARMÓNICOS SOBRE CAPACITORES.

Cuando se instalan capacitores en un sistema de potencia, existe la posibilidad de que se produzca resonancia entre estos y el sistema. Este fenómeno puede generar voltajes y corrientes mucho más altos de lo normal, lo que no ocurriría si no hubiera resonancia.

La reactancia de los capacitores disminuye a medida que aumenta la frecuencia, lo que hace que actúen como una especie de "imán" para las corrientes de alta frecuencia, como los armónicos. Esto puede provocar un mayor esfuerzo dieléctrico y un calentamiento interno en el capacitor. Afortunadamente, el calentamiento no suele ser un problema grave, ya que muchos capacitores modernos están diseñados con películas y láminas especiales que reducen significativamente las pérdidas. Sin embargo, el esfuerzo dieléctrico sí es un aspecto crítico, ya que los voltajes armónicos se suman al voltaje máximo de la frecuencia fundamental, lo que puede sobrecargar el capacitor.

Aunque los capacitores están construidos con materiales dieléctricos laminados que soportan altos voltajes, la exposición prolongada a sobretensiones puede desgastar el dieléctrico, reducir su vida útil y causar fatiga en el material. Por eso, es importante monitorear y gestionar estos efectos para evitar daños a largo plazo.

2.5.6 EFECTOS DE ARMÓNICOS SOBRE CONDENSADORES.

El análisis de armónicos en bancos de condensadores necesita un tratamiento particular debido a que su impedancia disminuye con el incremento de la frecuencia, lo que hace que gran parte de las corrientes armónicas fluyan por ellos. Se han definido y adoptado tres indicadores para medir el contenido de armónicos en estos bancos. Estos indicadores son:

Como indica la ecuación (8) para tensiones:

$$\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{Uc}} = \frac{1}{\mathrm{Uc}} \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \mathrm{Ui}^2} \le 1,1$$
(8)

Como indica la ecuación (9) para corrientes:

$$\frac{I}{In} = \frac{f_n}{f_c} \frac{U_n}{Uc} \sqrt{1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i^2 - 1) \left[\frac{U_i}{U_n}\right]^2} \le 1.3$$
(9)

Como indica la ecuación (10) para potencia reactiva:

$$\frac{Q}{Qc} = \frac{f_n}{f_c} \left[\frac{U_n}{Uc}\right]^2 \left\{ 1 + \sum_{i=2}^{\infty} (i^2 - 1) \left[\frac{U_i}{U_n}\right]^2 \right\} \le 1,35$$

$$(10)$$

2.5.7 EFECTOS DE ARMÓNICOS SOBRE MOTORES.

Los armónicos de voltaje tienen un impacto significativo en las máquinas rotativas, como los motores de inducción y las máquinas sincrónicas. Uno de los efectos más notables es el aumento de calor debido a las pérdidas en el hierro y el cobre a altas frecuencias. Este incremento de temperatura no solo reduce la eficiencia de la máquina, sino que también afecta el torque que puede generar.

Además, los armónicos de corriente en los motores pueden aumentar el ruido audible en comparación con una operación con corriente sinusoidal. También pueden alterar la distribución del flujo magnético en el entrehierro, lo que puede provocar problemas como el "cogging" (dificultad para arrancar suavemente) o el "crawling" (alto deslizamiento) en los motores de inducción.

Cuando hay pares de armónicos, como el quinto y el séptimo, pueden generarse oscilaciones mecánicas en sistemas como turbinas-generadores o motores con carga. Estas oscilaciones ocurren cuando el torque fluctúa debido a la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto y séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor a la frecuencia del sexto armónico. Si esta frecuencia coincide con una resonancia mecánica, pueden generarse fuerzas mecánicas intensas que afecten partes del motor.

Las corrientes armónicas también alteran el flujo magnético giratorio de la máquina, lo que significa que se necesita más corriente para realizar el mismo trabajo, reduciendo así la eficiencia. Cuando los motores operan con tensiones no sinusoidales, no pueden funcionar a su capacidad nominal. La Figura 9 ilustra cómo se reduce la capacidad del motor en función del factor de tensión armónica, lo que es crucial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.



figura 11. Factor de Protección contra Armónicos para Motores.

Donde con la fórmula de HVF:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n}}$$
(11)

El Factor de Tensión Armónica (HVF) es una medida que cuantifica la distorsión de una señal de voltaje debido a la presencia de armónicos. En términos más simples, nos indica qué tan "sucia" está una señal eléctrica. Un valor de HVF elevado sugiere una mayor distorsión, lo que puede generar problemas en equipos eléctricos como el calentamiento excesivo, vibraciones y una disminución en la eficiencia.

Esta medida se calcula a través de una fórmula que suma las contribuciones al cuadrado de los armónicos de orden 5 y superiores, ponderadas por su orden, y luego toma la raíz cuadrada del resultado. En esencia, la fórmula nos proporciona un valor numérico que representa el nivel de distorsión armónica presente en la señal

2.5.8 EFECTOS DE ARMÓNICOS SOBRE OTROS EQUIPOS CONECTADOS.

Los dispositivos electrónicos sensibles pueden funcionar de manera incorrecta debido a la presencia de armónicos. En ciertos casos, estos equipos necesitan detectar con precisión el momento en que el voltaje pasa por cero o analizar otros detalles de la forma de la onda eléctrica. Por eso, si hay distorsiones en la señal, su funcionamiento puede verse comprometido.

En cuanto a los equipos de medición e instrumentación, las armónicas también pueden causar problemas, especialmente si presentan situaciones de resonancia que generen armónicos elevados en el sistema. Esto puede llevar a errores en las mediciones, ya sea sobreestimando o subestimando los valores, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas presentes [15].

2.5.9 MEDICIÓNES DE ARMÓNICOS.

Garantizar la eficiencia del servicio eléctrico es una prioridad tanto para los usuarios como para las empresas distribuidoras. Esto implica mantener un suministro estable, sin interrupciones, sobretensiones o distorsiones armónicas, y con variaciones de voltaje controladas. Los armónicos, que son alteraciones en la onda eléctrica, pueden afectar negativamente a los equipos conectados a la red.

Detectar problemas armónicos requiere el uso de dispositivos de medición de valores eficaces verdadero, ya que los de valor promedio no son precisos con señales distorsionadas, pudiendo subestimar hasta un 40% el valor real. Predecir estos problemas sin mediciones es complicado, ya que pequeños cambios en el sistema, como desbalances o tolerancias de equipos, pueden alterar significativamente el flujo de energía .

Los problemas causados por armónicos, como disparos frecuentes, fusibles quemados, errores en mediciones o daños en equipos pueden abordarse con estudios de flujo de armónicos basados en mediciones precisas. Soluciones como reubicar equipos, instalar filtros o ajustar la compensación del factor de potencia pueden ser efectivas, pero primero es crucial identificar las fuentes de distorsión mediante modelos o mediciones directas.

Este tipo de análisis demanda recursos significativos, pero es esencial para seleccionar los métodos y equipos adecuados que aseguren un servicio eléctrico eficiente y de calidad, especialmente con el aumento de cargas sensibles en los sistemas de distribución.

2.5.10 LUGARES DONDE SE DEBE EFECTUAR EL REGISTRO DE MEDICIONES.

Es importante identificar los lugares donde haya cargas que generen armónicos o donde se hayan instalado elementos pasivos, como condensadores, que podrían estar absorbiendo los armónicos producidos en otras áreas. Conocer estas características ayuda a decidir en qué puntos realizar las mediciones, qué tipo de mediciones son necesarias y qué resultados se pueden esperar [16].

2.6 EQUIPOS DE MEDICIÓNES.

2.6.1 EQUIPO DE ANALIZADOR DE REDES MEMOBOX 300

El MemoBox 300 [17] es un instrumento de medición portátil y versátil, diseñado para evaluar de manera precisa y exhaustiva la calidad de la energía eléctrica en sistemas trifásicos. Este equipo permite monitorear en tiempo real una amplia gama de parámetros eléctricos, como tensiones, corrientes, frecuencia, armónicos y factores de potencia, facilitando así la detección temprana de anomalías y perturbaciones en la red eléctrica.

Gracias a su diseño compacto y ligero, el MemoBox 300 resulta ideal para su uso en campo, permitiendo realizar mediciones in situ de forma rápida y sencilla. Además, cuenta con una amplia memoria interna para almacenar los datos registrados, lo que facilita su posterior análisis y generación de informes detallados gracias a;

- Flexibilidad y amplio rango de medición y configurabilidad para adaptarse a diferentes tipos de instalaciones.
- Precisión de sus conversores analógico-digitales de alta resolución y algoritmos de cálculo avanzados para garantizar la exactitud de los resultados.

- Robustez y su diseño resistente y protección IP65 para asegurar un funcionamiento fiable en entornos industriales.
- Facilidad de uso de su interfaz intuitiva y software de configuración y análisis de datos que simplifica su operación.

ESTE SE LO PUEDE APLICAR EN:

- Análisis de la calidad energética en entornos industriales y comerciales.
- > Detección y análisis de perturbaciones en la red eléctrica.
- > Verificación del cumplimiento de los estándares de calidad de energía.
- > Optimización de la eficiencia energética.

En la figura 12 se muestra la repartición de pines y estructura del equipo MEMOBOX 300.



figura 12. Distribucion de pines del MEMOBOX.

- 1. Conector de energía del dispositivo.
- 2. Puerto RS232.
- 3. Botón de configuración.
- 4. Luces LED para la señal de medición.
- 5. LED indicador del nivel de batería.

- 6. Entradas para la señal de corriente.
- 7. Entradas para la señal de voltaje.

2.6.2 EQUIPO DE ANÁLIZADOR DE REDES TOPAS 1000.

El TOPAS 1000 es un analizador de energía de alta precisión diseñado para evaluar la calidad de la energía eléctrica en sistemas trifásicos. Permite identificar y cuantificar perturbaciones en la red, así como realizar un análisis detallado de los parámetros eléctricos clave.las funciones que se pueden efectuar con topas son:

- > Detección y análisis de perturbaciones.
- > Análisis de parámetros eléctricos.
- > Análisis de la calidad de servicio.
- > Evaluación de fenómenos transitorios.
- > Estudio de la variación de la tensión eléctrica.



figura 13. Equipo para análisis TOPAS 1000.

El TOPAS 1000 es un equipo de medición diseñado para evaluar de manera precisa la calidad de la energía eléctrica en sistemas trifásicos. Su robusta construcción (IP65) lo hace ideal para entornos industriales exigentes, este presenta unas características de:

- Alta capacidad de almacenamiento con 1 GB de memoria interna, el TOPAS 1000 puede almacenar registros de datos a largo plazo, permitiendo análisis detallados de la calidad de la energía a lo largo del tiempo.
- Versatilidad en las mediciones de medir tanto corrientes como voltajes, ofreciendo una visión completa del estado del sistema eléctrico.
- Análisis detallado, Realizando cálculos precisos de diversos parámetros eléctricos, incluyendo armónicos, factores de potencia y desequilibrios de tensión.

Con este se pueden visualizar las siguientes mediciones:

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------|---|
| Tensión | Valor eficaz (RMS), valor máximo, valor mínimo, valor |
| | promedio |
| Corriente | Valor eficaz (RMS), valor máximo, valor mínimo, valor |
| | promedio |
| Potencia | Activa (kW), reactiva (kVAR), aparente (kVA), factor |
| | de potencia |
| Energía | kWh, kvarh, kvarh |
| Armónicos | Hasta el armónico 50, con ángulo y modo |
| Frecuencia | Valor instantáneo |
| Desequilibrio de tensión | Evalúa la diferencia entre las fases |

| Tabla 2-7 Tabla de mediciones de topas 100 |
|--|
|--|

2.6.3 EQUIPO DE ANÁLIZADOR DE REDES MYeBOX-1500.

MYeBOX es una gama de analizadores eléctricos portátiles diseñados para realizar mediciones y análisis de parámetros eléctricos en instalaciones monofásicas, bifásicas y trifásicas (con o sin neutro). Este equipo destaca por su flexibilidad y capacidad de configuración, ya que puede ser manejado tanto localmente como de forma remota a través de una aplicación móvil (APP) o una plataforma web.

Su principal función es medir, registrar y analizar parámetros eléctricos, transitorios con forma de onda y la calidad de la red eléctrica, siguiendo la norma EN 50160. Además, MYeBOX permite el acceso remoto a los datos en tiempo real, lo que facilita el monitoreo y análisis sin necesidad de desplazamientos físicos.

El equipo está dirigido a profesionales que requieren una herramienta versátil y eficiente para el control de instalaciones eléctricas, ofreciendo funcionalidades avanzadas como el envío de datos a la nube (MYeBOX Cloud) y la visualización de información en gráficos o tablas, el equipo tiene una visualización previa como se muestra en la **figura 14**.



figura 14. Analizador de redes MYeBOX 1500 fuente: circutor

2.6.4 PROPIEDADES Y BASES DE OPERACIÓN.

2.6.4.1 CARACTERÍSTICA DEL ANALIZADOR DE REDES MEMOBOX 300.

El analizador de redes MEMOBOX 300 está diseñado para supervisar la calidad de la tensión, analizar perturbaciones eléctricas y optimizar el rendimiento de redes de baja y media tensión. Se encuentra disponible en tres versiones diferentes para satisfacer diversas necesidades de los usuarios, cuenta con monitoreo de:

- 1. Tensión monofásica
- 2. Monitoreo de tensión trifásica
- 3. Supervisión de tensión trifásica como de potencia.



figura 15. Analizador de redes MEMOBOX 300. Fuente MEMOBOX.ing

El equipo cuenta con las siguientes características destacadas:

- Realiza un registro completo y detallado de voltaje, corriente y factor de potencia, permitiendo un análisis integral de la calidad eléctrica.
- Su amplio rango de medición de voltaje abarca desde 115 V hasta 830 V, adaptándose a diversas aplicaciones eléctricas.
- Incluye transductores de corriente LEM-flex fijos, capaces de medir corrientes desde 5 A hasta 1500 A.

- Es configurable para medir tanto redes eléctricas con conexión Delta de 3 hilos como configuraciones Estrella de 4 hilos.
- Permite el ajuste de valores máximos y mínimos de voltaje, potencia, con una sensibilidad de medición de hasta 8 milisegundos a 60 Hz.
- Permite supervisar caídas de tensión, sobrecargas e interrupciones con configuraciones a partir de 8 milisegundos.
- Efectúa comprobaciones de parpadeo (flicker) en conformidad con la pauta de IEC 61000-4-15.
- Se enlaza fácilmente a una computadora mediante un puerto RS-232 para transferencia de datos.
- Incluye el software Codam Plus, que facilita la programación, adquisición y análisis de los datos recopilados.
- Está diseñado para resistir condiciones ambientales adversas, siendo a prueba de intemperie.
- > Compacto y ligero, con un peso de solo 1.5 kg, lo que facilita su transporte y manejo.

2.6.4.2 CARACTERÍSTICA DEL ANALIZADOR DE REDES TOPAS 1000.

El equipo cuenta con:

8 ENTRADAS DE 16 BITS.

- ➢ 4 dedicadas a corriente.
- ➢ 4 o 8 para tensión.

OPCIONES DE CONEXIONES.

- ➢ Puerto RS232.
- Conexión Ethernet.

- Disco interno de 1 Gigabyte y resistencia IP65.
- ▶ Incluye cables RS232, ethernet, de potencia y software incluido.

OPERACIÓN BASADA EN TRIGGER.

- Disparo manual o automático (3 s)
- > analiza simultáneamente corriente, tensión y distorsión armónica total (THD).

EVALUACIÓN DE FENÓMENOS TRANSITORIOS.

- > Capacidad de hasta 10 MHz.
- ➢ 4 entradas para medición de voltajes.
- ➢ Rango de muestreo entre y 10 MHz
- \blacktriangleright Captura de eventos con intervalos de 20 µs.

CONECTIVIDAD GSM

Incluye módem antena y cables para conexión inalámbrica con otros equipos.



figura 16. Analizador de redes TOPAS 1000. Fuente: TOPAS SPECIAL.

ACCESORIOS:

- ▶ 4 pinzas de corriente (5-50 a).
- ▶ 4 pinzas lemflex (100-1000 a).
- ➢ 4 pinzas de alta capacidad (1000-6000 a).
- ➢ 4 sensores de tensión (400 v).

peso:

➤ 4 kg.

2.6.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL ANALIZADOR DE REDES MYEBOX-1500.

MYeBOX es un equipo completo y versátil que combina hardware robusto con software intuitivo, ofreciendo una solución integral para el análisis y monitoreo de sistemas eléctricos. Sus características técnicas, como la conectividad remota, la capacidad de almacenamiento en la nube y el cumplimiento de la norma EN 50160, lo convierten en una herramienta esencial para profesionales que requieren precisión y eficiencia en el análisis de la calidad de la energía eléctrica.

ENTRADAS DE ALTA PRECISIÓN:

- > 8 entradas de 16 bits para mediciones precisas.
- > entradas dedicadas a corriente.
- > 8 entradas para tensión, dependiendo de la configuración.

OPCIONES DE CONEXIONES:

- Puerto RS232 para comunicación serial.
- Conexión Ethernet para acceso remoto y transferencia de datos.
- Disco interno de 1 Gigabyte para almacenamiento de datos.
- Resistencia IP65, lo que garantiza protección contra polvo y chorros de agua.
- Incluye cables RS232, Ethernet, de potencia y software para una configuración rápida y sencilla.

OPERACIÓN BASADA EN TRIGGER:

- Disparo manual o automático (cada 3 segundos).
- Analiza simultáneamente corriente, tensión y distorsión armónica total (THD).
- Ideal para capturar eventos específicos en sistemas eléctricos.

EVALUACIÓN DE FENÓMENOS TRANSITORIOS:

Capacidad de hasta 10 MHz para análisis de alta frecuencia.

ENTRADAS PARA MEDICIÓN DE VOLTAJES.

- Rango de muestreo entre y 10 MHz, permitiendo capturas detalladas.
- > Captura de eventos con intervalos de 20 μs, ideal para detectar transitorios rápidos.

FUNCIONALIDADES ADICIONALES:

- Visualización de datos en tiempo real a través de la APP o plataforma web.
- > Configuración local mediante teclado capacitivo y menús en pantalla.
- > Envío de datos a MYeBOX® Cloud para almacenamiento y análisis posterior.
- Compatible con sistemas monofásicos, bifásicos y trifásicos (con o sin neutro).

NORMAS Y CERTIFICACIONES:

- Cumple con la norma EN 50160 para calidad de la red eléctrica.
- > Evalúa parámetros como armónicos, flicker y desequilibrios de tensión.

ALIMENTACIÓN:

- > Diseñado para funcionar en instalaciones eléctricas monofásicas, bifásicas o trifásicas.
- Adaptable a diferentes entornos y voltajes.



figura 17. analizador de redes MIeBOX-1500 conectado al sistema eléctrico fuente: Automatización Org.

3 CAPÍTULO III CALIDAD DE ENERGÍA.

En el sector industrial, es frecuente la presencia de armónicos de alto orden, lo que afecta la calidad de la energía eléctrica. Estos problemas surgen principalmente por dos razones: el suministro de media tensión proveniente de un proveedor externo y el uso de cargas no lineales, como equipos electrónicos y variadores de frecuencia, que introducen distorsiones armónicas en el sistema, comprometiendo su estabilidad y eficiencia.

Para analizar este fenómeno, nos centramos en parámetros clave establecidos por normas internacionales, con especial énfasis en la distorsión armónica de corriente, el núcleo de nuestra investigación.

- > Niveles de voltaje: Para garantizar que el sistema opere dentro de los rangos adecuados.
- > Factor de potencia: Un indicador crítico de la eficiencia energética del sistema.
- > Distorsión de voltaje armónico (THD-V): Mide la contaminación armónica en el voltaje.

Distorsión de corriente armónica (THD-I): Nuestro principal foco, ya que refleja el impacto de las cargas no lineales en la red.

El estudio se llevó a cabo en la cabecera del transformador de 2000 kVA, un punto estratégico para medir la calidad de la energía. Durante un día, se registraron datos con intervalos de 15 minutos, lo que permitió capturar un panorama detallado del comportamiento del sistema eléctrico y la influencia de los armónicos en la corriente. Este enfoque nos permitirá identificar no solo los niveles de distorsión armónica presentes, sino también proponer soluciones para mitigar sus efectos y mejorar la calidad de la energía en entornos industriales.

En este trabajo de investigación, nos centraremos específicamente en un aspecto clave: las corrientes parásitas [18].

Analizaremos cómo los armónicos y otros fenómenos eléctricos generan corrientes parásitas en el sistema, las cuales pueden causar pérdidas de energía, sobrecalentamiento en equipos como transformadores y cables, y reducir la eficiencia general del sistema eléctrico.

Como primer punto, analizamos el comportamiento de los armónicos de corriente según el estudio de calidad de energía realizado en el transformador de 2000 kVA. Para ello, utilizamos el equipo analizador portátil de red MYeBOX, instalado en la cabecera del transformador. Este dispositivo nos permitió capturar y evaluar datos precisos, de los cuales se desprenden los siguientes comportamientos de los armónicos de corriente, como se muestra en la **figura 18**. Estos datos serán fundamentales para entender cómo las corrientes parásitas se generan y afectan el sistema [19].

3.1 ANÁLISIS DE LOS INDICADORES ELÉCTRICOS.

| | L1 | L2 | L3 | Ш |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Voltaje | | | | |
| Tensión fase - neutro (V) | 272.66 | 270.53 | 270.11 | 271.10 |
| Tensión fase - fase (V) | 471.02 | 467.36 | 470.38 | 469.58 |
| Tensión de neutro (V) | | | | 0.00 |
| Distorsión total (THD) (%) | 4.75 | 4.77 | 5.04 | |
| Distorsión en tensión de neutro (%) | | | | 0.00 |
| Factor cresta | 1.48 | 1.49 | 1.49 | |
| Frecuencia (Hz) | 59.98 | | | |
| Pinst | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| - Corriente | | | | |
| Corriente (A) | 902 | 872 | 872 | 882 |
| Corriente de neutro (A) | | | | 0 |
| Corriente de fuga (A) | | | | 0 |
| Distorsión total (THD) (%) | 27.83 | 30.82 | 28.57 | |
| Distorsión en corriente de neutro (%) | | | | 0.00 |
| Factor cresta | 0.01 | 0.01 | 0.01 | |
| Factor K | 3.37 | 3.85 | 3.45 | |
| | | | | |

figura 18. Parámetros eléctricos del transformador de 2000 kVA

| Distorsión Total de Armónicos (THD) en Tensión: | Distorsión Total de Armónicos (THD) en Corriente: | Factor K: |
|---|--|---|
| Están entre 4.75% y 5.04%, lo que indica la presencia de armónicos en el sistema. | Están entre 27.83%, 30.82% y 28.57%, Esto indica una presencia de armónicos en las corrientes de las fases. | Los valores están entre 3.37 y 3.85. Valores superiores a 1 que indican que hay calentamiento adicional en el trasformador. |

En la Tabla 3-1 se presentan los siguientes problemas identificados en figura 18:

Tabla 3-1 Problemas significativos arrojados por el analizador en el transformador de 2000kVa

La **figura 19** muestra los valores de potencia consumida en un sistema trifásico, desglosados por fase (L1, L2, L3) y un total general (III).

| Potencia consumida (+) | L1 | L2 | L3 | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Activa (kW) | 226.000 | 214.000 | 218.000 | 660.000 |
| Capacitiva (kvarC) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Inductiva (kvarL) | 65.000 | 66.000 | 56.000 | 188.000 |
| Aparente (kVA) | 245.000 | 235.000 | 235.000 | 715.000 |
| Factor de potencia | 0.92 | 0.91 | 0.93 | 0.92 |
| Coseno phi | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.96 |

figura 19. Distribución de potencia activa, reactiva y aparente por fase del transformador 2000

En la Tabla 3-2 se presentan los siguientes problemas identificados en figura 19 :

| Presencia de Cargas Inductivas: | Ausencia de Potencia Capacitiva: | | | |
|--|---|--|--|--|
| La potencia inductiva es significativa (188 | No hay potencia capacitiva, lo que indica que | | | |
| kvarL), lo que sugiere la presencia de motores | no se están utilizando compensadores | | | |
| o transformadores. Esto podría justificar la | capacitivos en el sistema. | | | |
| instalación de bancos de capacitores para | | | | |
| mejorar el factor de potencia. | | | | |

 Tabla 3-2
 Sistema eléctrico con cargas predominantemente inductivas y capacitivas

3.2 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE CORRIENTE Y TENSIÓN.



figura 20. Distorsión armónica de la red producida por variadores de frecuencia

| | Forma de Onda de Corriente: | Forma de Onda de Tensión: |
|----|-------------------------------------|--|
| L1 | Presenta picos que alcanzan valores | Se muestra una forma de onda más |
| | altos (1,200 A a - 400 A). | estable, con valores que oscilan entre 0 |
| | | V y 12,500 V. |
| L2 | Presenta picos que alcanzan valores | Se muestra una forma de onda más |
| | altos (1,000 A a - 300 A). | estable, con valores que oscilan entre 0 |
| | | V y 13,392 V. |
| L3 | Presenta picos que alcanzan valores | Se muestra una forma de onda más |
| | altos (1,000 A a - 200 A). | estable, con valores que oscilan entre 0 |
| | | V y 16,016 V. |

En la Tabla 3-3 se presentan los siguientes problemas identificados en figura 20 :

Tabla 3-3 Análisis de la Forma de Onda de Corriente y Tensión



figura 21. Comportamiento en forma de onda de corriente y voltaje del L1



figura 22. Comportamiento en forma de onda de corriente y voltaje del L2



figura 23. Comportamiento en forma de onda de corriente y voltaje del L3

Como se muestran en las **figura 21**, **figura 22** y **figura 23** hay un comportamiento similar en el sistema eléctrico, la corriente en las fases L1, L2 y L3 está fuertemente distorsionada, con niveles de distorsión armónica (THD) entre 26.4% y 28.9%. Esto indica que el sistema está siendo afectado por corrientes armónicas, las cuales alteran la forma de onda y pueden provocar problemas como sobrecalentamiento, pérdidas de energía e interferencias en equipos sensibles [20].

3.3 ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE Y TENSIÓN.

Los niveles de distorsión armónica en la tensión para las fases L1, L2 y L3, así como los armónicos individuales desde el 2° hasta el 24°. Muestra que los valores de THD (Distorsión Armónica Total) están entre 4.75% y 5.04%, lo que sugiere una distorsión moderada en la tensión como se muestra en la **figura 24**.

| | L1 | L2 | L3 | Ν |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Armónicos de tensión | | | | |
| RMS Vn (V) | 471.02 | 467.36 | 470.38 | 469.58 |
| Distorsión en tensión (%) | 4.75 | 4.77 | 5.04 | |
| Fundamental (V) | 272.3 | 270.2 | 269.7 | 0.0 |
| Armónico 2 (%) | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.00 |
| Armónico 3 (%) | 0.23 | 0.38 | 0.37 | 0.00 |
| Armónico 4 (%) | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 5 (%) | 3.89 | 3.87 | 4.03 | 0.00 |
| Armónico 6 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 7 (%) | 1.72 | 1.66 | 1.81 | 0.00 |
| Armónico 8 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 9 (%) | 0.05 | 0.17 | 0.22 | 0.00 |
| Armónico 10 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 11 (%) | 1.29 | 1.40 | 1.49 | 0.00 |
| Armónico 12 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 13 (%) | 0.69 | 0.57 | 0.67 | 0.00 |
| Armónico 14 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 15 (%) | 0.03 | 0.12 | 0.15 | 0.00 |
| Armónico 16 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 17 (%) | 0.72 | 0.84 | 0.89 | 0.00 |
| Armónico 18 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 19 (%) | 0.58 | 0.48 | 0.55 | 0.00 |
| Armónico 20 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 21 (%) | 0.04 | 0.13 | 0.16 | 0.00 |
| Armónico 22 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Armónico 23 (%) | 0.44 | 0.56 | 0.58 | 0.00 |
| Armónico 24 (%) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |

figura 24. índice de armónicos de voltaje por fases presentes en el transformador de 2000 kVa
Los valores de THD en corriente son altos, entre 27.83% y 30.82%, lo que indica una fuerte presencia de armónicos. En los armónicos destacados de mayor magnitud son el 5° (alrededor del 26%), el 7° (alrededor del 7.4%) y el 11° (alrededor del 6%) como se muestra en la **figura 25**.

| | I | L1 L2 | L3 | N |
|-----------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Armónicos de corriente | | | | |
| RMS An (A) | 902 | 872 | 872 | 882 |
| Distorsión en corriente (%) | 27.83 | 30.82 | 28.57 | |
| Fundamental (A) | 870.000 | 835.000 | 841.000 | 0.000 |
| Armónico 2 (%) | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.00 |
| Armónico 3 (%) | 1.49 | 3.23 | 2.02 | 0.00 |
| Armónico 4 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 5 (%) | 25.75 | 28.50 | 26.40 | 0.00 |
| Armónico 6 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 7 (%) | 7.36 | 7.43 | 7.37 | 0.00 |
| Armónico 8 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 9 (%) | 0.11 | 0.72 | 0.71 | 0.00 |
| Armónico 10 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 11 (%) | 5.86 | 6.83 | 6.06 | 0.00 |
| Armónico 12 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 13 (%) | 2.41 | 2.16 | 2.14 | 0.00 |
| Armónico 14 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 15 (%) | 0.00 | 0.24 | 0.36 | 0.00 |
| Armónico 16 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 17 (%) | 1.95 | 2.51 | 2.26 | 0.00 |
| Armónico 18 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 19 (%) | 1.38 | 1.20 | 1.18 | 0.00 |
| Armónico 20 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 21 (%) | 0.00 | 0.12 | 0.24 | 0.00 |
| Armónico 22 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Armónico 23 (%) | 0.92 | 1.20 | 0.95 | 0.00 |
| Armónico 24 (%) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | | | | |

figura 25. índice de armónicos de corriente por fases presentes en el transformador de 2000 kVa



figura 26. Registro de % de armónicos de corrientes presentes en la línea #1



figura 27. Registro de % de armónicos de corrientes presentes en la línea # 2



figura 28. Registro de % de armónicos de corrientes presentes en la línea #3

3.4 SELECCIÓN DE FILTROS.

Existen dos tipos de filtros: pasivos y activos. Los filtros pasivos están compuestos por elementos básicos como condensadores, inductancias y resistencias, mientras que los filtros activos incorporan componentes semiconductores para un control más avanzado.

Características de los Filtros Pasivos:

- > Operación estática: Suelen estar sintonizados a una sola frecuencia, lo que limita su flexibilidad.
- Costo reducido: Tanto los equipos como su mantenimiento son más económicos en comparación con los filtros activos.
- Eficiencia energética: Tienen un buen rendimiento energético (pocas pérdidas), excepto en casos de filtros más complejos, como los pasa banda, que incluyen resistencias.
- Mantenimiento sencillo: No requieren de un mantenimiento especial, lo que los hace más prácticos en ciertas aplicaciones.

Características de los Filtros Activos:

- Flexibilidad: Pueden adaptarse a diferentes frecuencias dentro de ciertos límites, lo que los hace más versátiles.
- Costo elevado: Su construcción y mantenimiento son más costosos en comparación con los filtros pasivos.
- > Mantenimiento especializado: Requieren de un mantenimiento más cuidadoso y técnico.
- Limitaciones en tamaño y velocidad: Los filtros activos de gran tamaño y respuesta rápida son difíciles de construir, lo que puede ser un desafío en aplicaciones específicas.

4 CAPITULO IV: SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN DIGSILENT.

4.1.1 DIAGRAMA UNIFILAR.

En la **figura 29** se presenta el diagrama unifilar de la red eléctrica en la que se realizará una intervención para mitigar la corriente reactiva. La mitigación de la corriente reactiva es crucial para mejorar la eficiencia del sistema, reducir las pérdidas de energía, y mantener la estabilidad del voltaje. Esta intervención, que se implementará después del análisis completo de la red, busca optimizar el flujo de potencia y mejorar el factor de potencia. El diseño de la intervención considera la ubicación estratégica de dispositivos de compensación de potencia reactiva (como filtros pasivos). evaluando factores como la impedancia de la línea y la carga existente El objetivo final es contribuir a una operación más confiable, eficiente y sostenible de la red eléctrica.

Elementos en el Diagrama Unifilar:

El diagrama unifilar muestra una red eléctrica con los siguientes elementos:

- Líneas de transmisión: Representadas por líneas con valores de impedancia (ej. 0,26 + j0,34).
- Barra de conexión: Puntos de conexión de diferentes elementos de la red (B0, B1, B2, B3, B4, B5).
- Transformador: Representado por el símbolo doble círculo (entre B0 y B1).
- Equipos de Generación: Indicados por GU (Generador Unitario) Generadores de potencia repartidos en la red (GU22, GU21).
- **Cargadores:** Indicados por (BT Banco de Transformadores), (CP Cargas puntuales), (VR- Variador de velocidad), (EC Equipos de control), (MS1, MS2, MS3, MS4)
- Protecciones: Protecciones en cada tramo de línea y dispositivo.
- Filtro Shunt: Un filtro de paso de banda destinado a compensación de pérdidas.



figura 29 Diagrama Unifilar de la Red Eléctrica para la Mitigación de Corriente Reactiva en DIgSILENT PowerFactory

4.2 CONFIGURACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA EN EL SOFTWARE DIGSILENT.

4.2.1 CONFIGURACIÓN DE RED EXTERNA.

Configuración de los parámetros para modelar la red externa. Establecimos un valor de 2 MVA con un factor de potencia de 1, como se muestra en la **figura 30** configurando estos datos en la sección correspondiente para modelar la red externa. Este modelo asegura que el suministro de energía cumple con los estándares de calidad y confiabilidad necesarios. Además, ajustamos la tensión de operación a 1 PU y verificamos los límites de capacidad reactiva para garantizar la estabilidad del sistema.

| 🖄 Red Externa - Grid\External Grid.ElmXnet | | × |
|--|---|----------|
| Datos Básicos | General Avanzado Despacho Automático | ОК |
| Descripción | Control de subestación Externa \checkmark \rightarrow | |
| Flujo de Carga | Controlador Secundario Externo ♥ → | Cancelar |
| Cortocircuito VDE/IEC | | Figura |
| Cortocircuito Completo | Tine de Davis | lr a |
| Cortocircuito ANSI | Punto de Opera local | |
| Cortocircuito IEC 61363 | Fuera de servicio cuando la potencia activa es cero | |
| Cortocircuito DC | Punto de Operacion | |
| Simulación Cuasi Dinámica | Modo de Entrada P, cos(fi) ~ | |
| Simulación RMS | Potencia Activa 2. MW | |
| Simulación EMT | Factor de Potencia 1. Ind. V | |
| Calidad de Energía/Armónicos | Tensión de Operación 1. p.u. | |
| Confiabilidad | Ángulo 0. deg | |
| Análisis de la Capacidad de Integración | Para de Deferencia | |
| Flujo Óptimo de Potencia | | |
| Planificación del Despacho | | |
| Colocación Óptima de Equipos | Polarización de Frecuencia Prito. MW/Hz | |
| | Polarización de Frecuencia sec <mark>0. MW/Hz</mark> | |
| | Límites Operativos de Potencia Reactiva | |
| | | |
| | Mín9999. Mvar Factor de Escala (mín.) 100. % | |
| | Máx. 9999. Mvar Factor de Escala (máx.) 100. % | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | - | |

figura 30 Configuración de Parámetros de Flujo de Carga en DIgSILENT PowerFactory

4.3 CONFIGURACIÓN DE BARRAS.

4.3.1 BARRA B0.

Desde esta interfaz de la **figura 31**, se configura el tipo de sistema como corriente alterna (AC), la tecnología de fases como ABC y el uso del elemento como tipo busbar. Además, se establece el voltaje de línea a línea en 13.8 kV, obteniendo automáticamente un voltaje de línea a tierra de 7.967434 kV. Esta configuración es esencial para garantizar que la barra sea representada correctamente en el modelo

| Terminal - Grid\B0.ElmTerm | | × |
|--|---|-----------|
| Datos Básicos | Nombre B0 | ОК |
| beschpcion | - Tipo →ipment Type Library\BARRA 13.8 KV | Cancelar |
| Flujo de Carga | Zona 🗸 🗸 | |
| Cortocircuito VDE/IEC | Área | ira |
| Cortocircuito Completo | | Cubículos |
| Cortocircuito ANSI | | |
| Cortocircuito IEC 61363 | Fuera de servicio | |
| Cortocircuito DC | Tipo de Sistema AC ~ Usage Busbar ~ | |
| Simulación RMS | Tecnología de Fases ABC Y | |
| Simulación EMT | Tansián Nominal | |
| Análisis de Arco Eléctrico Calidad de Energía/Armónicos Opt. de Enlaces Abiertos Confiabilidad Análisis de la Capacidad de Integración Flujo Óptimo de Potencia Planificación del Despacho Colocación Óptima de Equipos | Línea Línea 13.8 KV Línea a Tierra 7.967434 KV | |
| | | |

figura 31 Configuración de Barra de 13.8 kV en DIgSILENT PowerFactory

En esta ventana que se muestra en la **figura 32**, se define el control de tensión, estableciendo un valor de tensión destino de 1.0 P.U. (13.8 kV). Se configuran los valores máximo y mínimo de Delta V en ± 5 %, además de asignar una prioridad de -1. Asimismo, se ajustan los límites de tensión del estado estable, con un límite superior de 1.05 P.U. y un límite inferior de 0.0 P.U., junto con los límites de cambio del paso de tensión para eventos como "n-1" y "n-2," asignando valores del 6 % y 12 %, respectivamente.

Una vez configurados todos los parámetros, se presiona el botón **OK** para guardar los cambios y proceder con el análisis.

| Datos Básicos | Control de Tensión | | | | ОК |
|---|-----------------------|------------------------|------|------|----------|
| Descripción | Tensión Destino | 1. p.u. | 13.8 | kV | |
| Flujo de Carga | Máx. Delta V | 5. % | | | Cancelar |
| Cortocircuito VDE/IEC | Min Delta V | _5 % | | | Ir a |
| Cortocircuito Completo | Will. Delta V | -3. 70 | | | Cubiculo |
| Cortocircuito ANSI | Prioridad | -1 | | | Cubiculo |
| Cortocircuito IEC 61363 | Límites de Tensión d | el Estado Estable | | | |
| Cortocircuito DC | Límite Superior de T | ensión | 1.05 | | |
| Simulación RMS | | | | p.u. | |
| Simulación EMT | Limite Interior de Te | nsion | 0. | p.u. | |
| Análisis de Arco Eléctrico | Límites del Camb | io del Paso de Tensión | | | |
| Calidad de Energía/Armónicos | n-1 | | 6. | % | |
| Opt. de Enlaces Abiertos | n-2 | | 12 | | |
| Confiabilidad | Entra de Denna | | 12 | ~~ | |
| Análisis de la Capacidad de Integración | Falla de Barra | | 12. | 76 | |
| Flujo Óptimo de Potencia | | | | | |
| Planificación del Despacho | | | | | |
| Colocación Óptima de Equipos | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

figura 32 Configuración de Parámetros para el Flujo de Carga en DIgSILENT PowerFactory

4.3.2 BARRAS B1-B2-B3-B4-B5.

Desde la ventana de configuración de barra, se selecciona la pestaña de "Datos Básicos", se puede observar que se ha seleccionado la barra "B" y se ha configurado el "Tipo" como "Equipment Type Library\BARRA 480V", indicando que se trata de una barra de 480V. Además, se ha definido el "Tipo de Sistema" como "AC" y el "Usage" como "Busbar". Estos ajustes iniciales son cruciales para la correcta definición de las características de la barra en el sistema eléctrico.

Para configurar los parámetros principales. En esta sección, se define el tipo de sistema como "AC", la tecnología de fases como "ABC" y el uso como "Busbar". Además, se establece el voltaje de línea a línea en 0.48 kV, ya que la barra B1-B2-B3-B4-B5 se encuentra ubicada después del transformador. Estos mismos parámetros deben ser configurados para cada una de las barras del sistema como se muestra en las **figura 33**, **figura 34**, **figura 35**

| Patos Básicos | Nombre B1 | ОК |
|--|--|-----------|
| Descripción | Tipo ✓ → Equipment Type Library\BARRA 480V | |
| lujo de Carga | Zona V → | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | | Ir a |
| ortocircuito Completo | | Cubículos |
| ortocircuito ANSI | | |
| ortocircuito IEC 61363 | Fuera de servicio | |
| ortocircuito DC | Tipo de Sistema AC ~ Usage Busbar | \sim |
| imulación RMS | Tecnología de Fases ABC ~ | |
| imulación EMT | Tensión Nominal | |
| nálisis de Arco Eléctrico | Línea-Línea 0.48 kV | |
| alidad de Energía/Armónicos | Línea a Tierra 0.2771281 kV | |
| pt. de Enlaces Abiertos | | |
| onfiabilidad | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | Aterrizado | |
| lujo Óptimo de Potencia | | |
| lanificación del Despacho | | |
| olocación Óptima de Equipos | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

figura 33 Configuración de Barra B1 en Terminal - Datos Básicos

| atos Básicos | Nombre | B2 | OK |
|--|----------------|---------------------------------------|----------|
| escripción | T | | OK |
| ujo de Carga | Про | ✓ → Equipment Type Library\BAKKA 480V | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | Zona | \checkmark \rightarrow | Ir a |
| ortocircuito Completo | Area | \checkmark \rightarrow | |
| ortocircuito ANSI | | | Cubiculo |
| ortocircuito IEC 61363 | 🗌 Fuera de se | icio | |
| ortocircuito DC | Tipo de Sisten | AC ~ Usage Busbar | ~ |
| imulación RMS | Tecnología de | ises ABC ~ | |
| imulación EMT | - Tensión Nor | al | |
| nálisis de Arco Eléctrico | Línea-Línea | 0.48 | |
| alidad de Energía/Armónicos | Línea a Tierr | 0.2771281 kV | |
| pt. de Enlaces Abiertos | | | |
| onfiabilidad | | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | Aterrizad | | |
| ujo Óptimo de Potencia | | | |
| lanificación del Despacho | | | |
| olocación Óptima de Equipos | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

figura 34 Configuración de Barra B2 en Terminal - Datos Básicos

| atos Básicos escripción | Nombre | ОК |
|--|---|-----------|
| uio de Carga | Tipo \checkmark \rightarrow Equipment Type Library\BARRA 480V | Cancelar |
| ajo de Calga | Zona 🗸 🔿 | la a |
| ortocircuito VDE/IEC | Área \checkmark \rightarrow | Ir a |
| artocircuito ANSI | | Cubículos |
| artocircuito IEC 61262 | | |
| artacircuita DC | | |
| | Tipo de Sistema AC V Usage Busbar V | |
| mulación RMS | Tecnología de Fases ABC ~ | |
| mulación EMT | Tensión Nominal | |
| nálisis de Arco Eléctrico | Línea-Línea 0.48 kV | |
| alidad de Energía/Armónicos | Línea a Tierra 0.2771281 kV | |
| pt. de Enlaces Abiertos | | |
| onfiabilidad | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | | |
| ujo Óptimo de Potencia | | |
| anificación del Despacho | | |
| olocación Óptima de Equipos | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

figura 35 Configuración de Barra B3 en Terminal - Datos Básicos

| atos Básicos | · | | |
|--|------------------|---------------------------------------|-----------|
| lescripción | Nombre | B5 | ОК |
| luio de Carga | Tipo | ✓ → Equipment Type Library\BARRA 480V | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | Zona | \checkmark \rightarrow | le a |
| ortocircuito Completo | Área | \checkmark \rightarrow | 11 a |
| ortocircuito ANSI | | | Cubículos |
| ortocircuito IEC 61363 | Euera de servi | rio. | |
| ortocircuito DC | Tipo de Sistema | AC V Usage Bushar V | |
| imulación RMS | | | |
| imulación FMT | Tecnología de Fa | es ABC ~ | |
| nélisis de Area Eléstrica | Tensión Nomina | | |
| alidad de Energía (Armónicos | Línea-Línea | 0.48 kV | |
| int de Enlaces Abjertos | Línea a Tierra | 0.2771281 kV | |
| onfiabilidad | | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | | | |
| luio Óptimo de Potencia | ☐ Aterrizado | | |
| lanificación del Despacho | | | |
| olocación Óptima de Equipos | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

figura 36 Configuración de Barra B4 en Terminal - Datos Básicos

| atos Básicos | Nombre | B5 | ОК |
|--|-------------------|--|-----------|
| escripción | Tipo | \checkmark \rightarrow Equipment Type Library/BARRA 480V | |
| lujo de Carga | 7 | | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | Zona | | Ir a |
| ortocircuito Completo | Area | | Cubículos |
| ortocircuito ANSI | | | Cubiculos |
| ortocircuito IEC 61363 | 🗌 Fuera de servi | cio | |
| ortocircuito DC | Tipo de Sistema | AC ~ Usage Busbar ~ | |
| imulación RMS | Tecnología de Fas | ses ABC V | |
| imulación EMT | Tensión Nomina | | |
| nálisis de Arco Eléctrico | | | |
| alidad de Energía/Armónicos | Línea-Línea | 0.7771201 W/ | |
| pt. de Enlaces Abiertos | Linea a rierra | 0.2771201 KV | |
| onfiabilidad | | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | Aterrizado | | |
| lujo Óptimo de Potencia | L] Atem2000 | | |
| lanificación del Despacho | | | |
| olocación Óptima de Equipos | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

figura 37 Configuración de Barra B5 en Terminal - Datos Básicos

La **figura 38 figura 38** muestra la pestaña de "Control de Tensión" en la ventana de configuración de la barra. Aquí se pueden establecer los límites y parámetros relacionados con el control de la tensión en el sistema de las cinco barras.

| Terminal - Grid\B1.ElmTerm | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------|---------|------|------|-----------|
| Datos Básicos | Control de Tensión | | | | | ОК |
| Descripcion | Tensión Destino | 1. | p.u. | 0.48 | kV | Cancelar |
| Hujo de Carga | Máx. Delta V | 5. | % | | | |
| | Mín. Delta V | -5. | % | | | Ir a |
| Cortocircuito Completo | Prioridad | -1 | | | | Cubículos |
| | | | | | | |
| Lortocircuito IEC 61363 | Límites de Tensión d | el Estado Esta | ble | | | |
| Lortocircuito DC | Límite Superior de T | ensión | | 1.05 | p.u. | |
| Simulación RMS | Límite Inferior de Te | nsión | | 0. | p.u. | |
| Simulación EMT | _ | | | | | |
| Análisis de Arco Eléctrico | Límites del Camb | io del Paso de | Tensión | | | |
| Calidad de Energía/Armónicos | n-1 | | | 6. | % | |
| Opt. de Enlaces Abiertos | n-2 | | | 12. | % | |
| Confiabilidad | Falla de Barra | | | 12 | ~ | |
| Análisis de la Capacidad de Integración | | | | | | |
| Flujo Óptimo de Potencia | | | | | | |
| Planificación del Despacho | | | | | | |
| Colocación Óptima de Equipos | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

figura 38 Configuración de Barra B1-B2-B3-B4-B5 en Terminal - Control de Tensión

4.4 CONFIGURACIÓN DE LÍNEA

La **figura 39** muestran la configuración de una barra en el sistema eléctrico utilizando el Terminal. En la pestaña de "Datos Básicos", se observa la definición de parámetros clave como el tipo de sistema (AC), tecnología de fases (ABC), uso (Busbar) y voltaje nominal (0.48 kV).

| Tipo de Línea - Equipment Type Library\CC | NEXIÓN DE BARRAS.TypLne | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------|-------------|-----------------------------|---------------|----------|----------|
| Datos Básicos | Nombre | NEXIÓN DE BARR | 45 | | | | OK |
| Descripción | Tensión Nominal 0.4 | 18 kV | | | | | OK |
| Versión | | | | | | . | Cancelar |
| Flujo de Carga | Corriente Nominal 1. | KA | (enterrado) | Corriente Nominal (en aire) | 1. | kА | |
| Cortocircuito VDE/IEC | Cable / Aéreo Ca | ble | \sim | | | | |
| Cortocircuito Completo | Tipo de Sistema 🛛 🗛 | · ~ | Fases : | 3 ~ No. de Neutre | os O | ~ | |
| Cortocircuito ANSI | Frecuencia Nominal 60 | Hz | | | | | |
| Cortocircuito IEC 61363 | | | | | | | |
| Cortocircuito DC | Parámetros de Secuencia | s 1,2 (por Long.) | | Parámetro de Secuencia C | ero por Long. | 1 | |
| Simulación RMS | Resistencia AC R'(20°C |) 0. | Ohm/km | Resistencia AC RO | 0. | Ohm/km | |
| Simulación EMT | | | ¢ | | | \$ | |
| Protección | Reac <u>t</u> ancia X' | 0. | Ohm/km | Reactancia X0' | 0. | Ohm/km | |
| Análisis de Cables | | | | | | | |
| Calidad de Energía/Armónicos | | | | | | | |
| Confiabilidad | | | | | | | |
| Análisis de la Capacidad de Integración | | | | | | | |
| Flujo Óptimo de Potencia | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

figura 39. Configuración de Barra en Terminal.

Lo más destacado en la figura 40 es que se trata de una línea con dos terminales, B3 y B1, configurada como un cable con parámetros concentrados (modelo PI). De igual manera los terminales con pares de B3 - B1, B3 - B2, B4 - B3, B5 - B3

| ្នុ Línea - Grid\Line.ElmLne | | | | | × |
|--|---|--|--|---|--------------------------|
| Datos Básicos Descripción Flujo de Carga Cortocircuito VDE/IEC Cortocircuito Completo | Nombre Line Tipo v Terminal i v Terminal j v | → Equipment Type Library\CONEX → Grid\83\Cub_1 → Grid\81\Cub_2 | IÓN DE BARRAS B3 B1 | | OK Cancelar Figura |
| Cortocircuito ANSI Cortocircuito IEC 61363 Cortocircuito DC Simulación RMS | Zona Tern Área Tern D Fuera de servicio Número de | ninal i \checkmark \rightarrow | Valores resultantes | | |
| Simulación EMT Análisis de Cables Calidad de Energía/Armónicos Opt. de Enlaces Abiertos Confiabilidad Análisis de la Capacidad de Integración Flujo Óptimo de Potencia Planificación del Despacho | Líneas en paralelo Parámetros Capacidades Térmicas Longitud de Línea Factor de Reducción Medio | 1 → 1. km 1. Tierra ∨ | Corriente Nominal (act.) Impedancia Sec. Pos, Z1 Impedancia Sec. Pos, Ag. Resistencia Sec. Pos, X1 Reactancia Sec. Cos, X1 Resistencia Sec. Cero, X0 Reactancia Sec. Cero, X0 Corriente de tierra, Ice Factor tierra k0, Magnitud Factor tierra k0, Magn. | 1. kA 0. Ohm 0. deg 0. Ohm 0. Ohm 0. Ohm 0. A 0. 0. 0. deg | |
| Colocación Óptima de Equipos | Tipo de Línea Modelo de la Línea Parámetros Concen Parámetros Distribu Cargas de Seccione | Cable trados (PI) uidos ts/Líneas | | | |

figura 40 Configuración de parámetros de datos básicos de la línea.

4.5 CONFIGURACIÓN DEL TRANSFORMADOR.

Para realizar la parametrización del transformador de 2MVA, nos ubicamos en la sección "Datos Básicos" del software. En esta sección, seleccionamos el tipo de transformador (Transformador Trifásico) y colocamos los valores de potencia nominal (2MVA), frecuencia nominal (60Hz), tensión nominal del lado de alta (13.8kV) y del lado de baja (0.48kV). Además, configuramos la conexión del transformador como DYN como se visualiza en la **figura 41**.

| Ipo de Transformador de dos Devanados | - Equipment Type Library\TRANS | FOMADOR 2000 | (va 13.8/0.480 KV. | IypTr2 | | | > |
|---|--------------------------------|--------------|--------------------|-------------------|------|--------|----------|
| Datos Básicos | Nombre | TRANSFOMA | OOR 2000KVA 13.8 | /0.480 KV | | | ОК |
| Descripción | Tecnología | Transformado | or Trifásico | ~ | | | |
| Versión | | | 7 | | | | Cancelar |
| Flujo de Carga | Potencia Nominal | 2. | MVA | | | | |
| Cortocircuito VDE/IEC | Frecuencia Nominal | 60. | Hz | | | | |
| Cortocircuito Completo | Tensión nominal | | | Grupo Vectorial | | | |
| Cortocircuito ANSI | Lado de <u>A</u> lta (AT) | 13.8 | kV | Lado de Alta (AT) | D ~ | | |
| Cortocircuito IEC 61363 | Lado de <u>B</u> aja (BT) | 0.48 | kV | Lado de Baja (BT) | YN ~ | | |
| Cortocircuito DC | | | | | | | |
| Simulación RMS | | | | Ángulo de Desfas | e 5 | *30deg | |
| Simulación EMT | Impedancia de Secuencia Po | ositiva | ٥ | Angulo de Desitas | | soucy | |
| Protección | <u>T</u> ensión de c.c. uk | 6. | % | | | | |
| Calidad de Energía/Armónicos | Pérdidas en el Cobre | 0. | kW | Nombre | Dyn5 | | |
| Confiabilidad | Impedancia Sec 0 | | | | | | |
| Análisis de la Capacidad de Integración | Impedancia Sec 0 | 6 | | | | ٥ | |
| Eluio Óntimo de Potencia | lension de c.c. uku | 6. | % | | | | |
| | Tensión c.c.(Re(uk0)) uk0r | 0. | % | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

figura 41 Parametrización de Transformador Trifásico en Software de Simulación Eléctrica.

4.6 CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS

La **Tabla 4-1** presenta datos técnicos de motores, incluyendo su capacidad en megavatios (MW), factor de potencia (FP), tipo de conexión, voltaje de operación, frecuencia en hercios (Hz) y ubicación, para facilitar el análisis y gestión de su desempeño y eficiencia

| MOTORES | CAPACIDAD MW | FP | Conexión | Voltaje | ΗZ | UB | ICACI | ÓN |
|---------|--------------|-------|----------|---------|----|----|-------|----|
| M1 | 0.0075 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M2 | 0.0015 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M3 | 0.0156 | 0.83 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M4 | 0.1624 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M5 | 0.0015 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M6 | 0.0559 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B2 | B3 | B1 |
| M7 | 0.1624 | 0.835 | DELTA | 440 | 60 | B4 | B3 | B1 |
| M8 | 0.0124 | 0.835 | DELTA | 440 | 60 | B4 | B3 | B1 |
| M9 | 0.0124 | 0.835 | DELTA | 440 | 60 | B4 | B3 | B1 |
| M10 | 0.008 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B4 | B3 | B1 |
| M11 | 0.26248 | 0.85 | DELTA | 440 | 60 | B5 | B3 | B1 |

Tabla 4-1 Especificaciones técnicas y ubicación de motores

| Basic Data | General | Advanced | | | | OK |
|------------------------------|-----------|--------------|---------|-------------|-----------------|---------|
| Description | Input Mod | le | | P, cos(phi) | ~ | OK |
| Load Flow | Balanced/ | Unbalanced | | Balanced | ~ | Cancel |
| Short-Circuit VDE/IEC | Operatin | g Point | | | Actual Values | Figure |
| Short-Circuit Complete | Active P | ower | 0.007 | 5 MW | 0.0075 MW | Jump to |
| Short-Circuit ANSI | Davias | | 0.05 | · | 0.05 | |
| Short-Circuit IEC 61363 | Powerra | ictor | 0.85 | ind. ~ | 0.85 | |
| Short-Circuit DC | Voltage | | 1. | p.u. | | |
| Simulation RMS | Scaling I | Factor | 1. | | 1. | |
| Simulation EMT | 🗹 Adju | sted by Load | Scaling | Zone Scal | ling Factor: 1. | |
| Power Quality/Harmonics | | | | | | |
| Voltage Profile Optimisation | | | | | | |
| Reliability | | | | | | |
| Hosting Capacity Analysis | | | | | | |
| Optimal Power Flow | | | | | | |
| Unit Commitment | | | | | | |
| State Estimation | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

figura 42 Parametrización flujo de carga del M1.

| Basic Data | General | Advanced | | | | OV |
|--|------------|------------|------------|-------------|---------------|----------|
| Description | Input Mode | e | | P, cos(phi) | ~ | <u> </u> |
| oad Flow | Balanced/U | Jnbalanced | | Balanced | ~ | Cancel |
| hort-Circuit VDE/IEC | Operating | g Point | | | Actual Values | Figure |
| hort-Circuit Complete | Active Po | wer | 0.001 | 5 MW | 0.0015 MW | Jump to |
| hort-Circuit ANSI | Power Fa | ctor | 0.85 | ind. ~ | 0.85 | |
| hort-Circuit IEC 61363 | Voltago | | 1 | | | |
| Simulation PMS | Carling D | | 1. | p.u. | 1 | |
| Simulation FMT | Scaling F | actor | <u>н</u> . | Zono Scali | I. | |
| Reliability Reliability Josting Capacity Analysis Dptimal Power Flow Jnit Commitment State Estimation | | | | | | |

figura 43. Parametrización flujo de carga del M2

| Basic Data | General Advanc | ed | | | OK |
|------------------------------|--------------------|------------|----------------|---------------|---------|
| Description | Input Mode | P, co | os(phi) ~ | | ÖK |
| oad Flow | Balanced/Unbalance | ed Bala | anced ~ |] | Cancel |
| Short-Circuit VDE/IEC | Operating Point | | | Actual Values | Figure |
| Short-Circuit Complete | Active Power | 0.0156 | MW | 0.0156 MW | Jump to |
| Short-Circuit ANSI | Power Factor | 0.83 | ind. ~ | 0.83 | |
| Short-Circuit IEC 61363 | Voltage | 1 | | | |
| Simulation DMC | voltage | L. | p.u. | | |
| Simulation KMS | Scaling Factor | 1. | | 1. | |
| | Adjusted by Lo | ad Scaling | Zone Scaling F | actor: I. | |
| Power Quality/Harmonics | | | | | |
| Voltage Profile Optimisation | | | | | |
| Reliability | | | | | |
| Posting Capacity Analysis | | | | | |
| Init Commitment | | | | | |
| State Estimation | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

figura 44. Parametrización flujo de carga del M3.

| | General Avanzado | | | | OK |
|--|-------------------------|---------------|----------------------------|------------------|--------------|
| escripción | Modo de Entrada | P, cos | (fi) ~ | | ÖK |
| ujo de Carga | Balanceado/Desbalanc | eado Balan | ceado 🗸 | | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | Punto de Operación | | | Valores actuales | Figura |
| ortocircuito Compieto | Potencia <u>A</u> ctiva | 0.1624 | MW | 0.1624 MW | <u>I</u> r a |
| ortocircuito IEC 61363 | Eactor de Potencia | 0.85 | Ind. ~ | 0.85 | |
| ortocircuito DC | Tensión | 1. | p.u. | | |
| mulación RMS | Factor de Escalamien | tc 1. | | 1. | |
| imulación EMT | Ajustado por el Es | calamiento de | la Cargafactor de Escala o | le Zona: 1. | |
| alidad de Energía/Armónicos | | | | | |
| ptimización del Perfil de Tensión | | | | | |
| onfiabilidad | | | | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | | | | | |
| ujo Óptimo de Potencia | | | | | |
| anificación del Despacho | | | | | |
| stimación de Estado | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |



| Basic Data | General Advance | d | | | ОК |
|--|--|---|-------------------------------|--|-------------------|
| Description | Input Mode | P, cos(p | ohi) ~ | | - OK |
| Load Flow | Balanced/Unbalance | d Balance | ed v | | Cancel |
| Short-Circuit VDE/IEC Short-Circuit Complete Short-Circuit ANSI Short-Circuit IEC 61363 Short-Circuit IEC Simulation RMS Simulation EMT Power Quality/Harmonics | Departing Point Active Power Power Factor Voltage Scaling Factor | 0.0015 0.85 1. 1. d Scaling | MW ind. p.u. Zone Scaling Fa | Actual Values 0.0015 MW 0.85 1. ctor: 1. | Figure Jump to |
| Voltage Profile Optimisation Reliability Hosting Capacity Analysis Optimal Power Flow Unit Commitment State Estimation | | | | | |

figura 46. Parametrización flujo de carga del M5.

| Basic Data | General Advance | d | | | OK |
|---|---------------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| Description | Input Mode | P, co | s(phi) ~ | | ÖK |
| Load Flow | Balanced/Unbalanced | a Balar | nced ~ | | Cancel |
| Short-Circuit VDE/IEC | Operating Point | | | Actual Values | Figure |
| Short-Circuit Complete | Active Rower | 0.0550 | NOW | 0.0550 MW | lump to |
| Short-Circuit ANSI | Active Power | 0.0555 | | 0.0555 10100 | sump to i |
| Short-Circuit IEC 61363 | Power Factor | 0.85 | ind. ~ | 0.85 | |
| Short-Circuit DC | Voltage | 1. | p.u. | | |
| Simulation RMS | Scaling Factor | 1. | | 1. | |
| Simulation EMT | Adjusted by Load | d Scaling | Zone Scaling F | actor: 1. | |
| Power Quality/Harmonics Voltage Profile Optimisation | | | | | |
| Reliability | | | | | |
| Hosting Capacity Analysis | | | | | |
| Optimal Power Flow | | | | | |
| Unit Commitment | | | | | |
| State Estimation | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

figura 47 Parametrización flujo de carga del M6

| Fundamental (A) | 870 | 835 | 841 | |
|-----------------|------|------|------|------|
| 2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | |
| 3 | 1.5 | 3.2 | 2 | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | |
| 5 | 25.8 | 28.5 | 26.4 | VAL |
| 6 | 0 | 0 | 0 | -OR |
| 7 | 7.4 | 7.4 | 7.4 | ES |
| 8 | 0 | 0 | 0 | POI |
| 9 | 0.1 | 0.7 | 0.7 | CE |
| 10 | 0 | 0 | 0 | TN |
| 11 | 5.9 | 6.8 | 6.1 | UAL |
| 12 | 0 | 0 | 0 | ES |
| 13 | 2.4 | 2.2 | 2.1 | ARI |
| 14 | 0 | 0 | 0 | - No |
| 15 | 0 | 0.2 | 0.4 | |
| 16 | 0 | 0 | 0 | OS |
| 17 | 2 | 2.5 | 2.3 | PO |
| 18 | 0 | 0 | 0 | R C, |
| 19 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | AD/ |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 4 FA |
| 21 | 0 | 0.1 | 0.2 | SE |
| 22 | 0 | 0 | 0 | |
| 23 | 0.9 | 1.2 | 1 | |
| 24 | 0 | 0 | 0 | |

Tabla 4-2. Porcentaje de armónicos presentes en cada fase.

Con los datos obtenidos procedemos ingresar los datos como escenario para poderlo replicar en el resto de las cargas[21]

| Invecciones de Corrientes Armonic | :as |
|-----------------------------------|--|
| Corrientes Armónicas | \checkmark →y\ARMONICOS DESBALANCEADOS |
| Tipo de Fuentes de Armónicos | Desbalanceada, Fase Correcta |
| Corrientes Armónicas Referidas a | Corriente Fundamental \sim |
| | |
| | |

figura 48. Creación de escenario de armónicos.

| | Nombre | ARMONICOS DESBALAN | NCEADOS | | | | | ОК |
|------------|---------|----------------------------|------------|----------------|-----------|---------------|---------|----------|
| escripción | | | | | | | | |
| | Tipo de | e Fuentes de Armónicos | | | | | | Cancelar |
| | O Bal | anceada, Fase Correcta | | | | | | |
| | Des | sbalanceada, Fase Correcta | | | | | | |
| | ○ IEC | 61000 | Preconfigu | urar para BDEV | N/VDE | | | |
| | | | | | | | | |
| | Armónio | 05' | | | | | | |
| | Amonie | Orden del Armónico | la h/la 1 | lb h/lb 1 | lc h/lc 1 | fiA h-h*fiA 1 | fiB h-ł | |
| | | | % | % | % | deg | de | |
| | 1 | 3. | 1.5 | 3.2 | 2. | 0. | | |
| | 2 | 5. | 25.8 | 28.5 | 26.4 | 120. | | |
| | 3 | 7. | 7.4 | 7.4 | 7.4 | 0. | | |
| | 4 | 11. | 5.9 | 6.8 | 6.1 | 240. | | |
| | 5 | 13. | 2.4 | 2.2 | 2.1 | 120. | | |
| | 6 | 15. | 0. | 0.2 | 0.4 | 0. | | |
| | 7 | 17. | 2. | 2.5 | 2.3 | 240. | | |
| | 8 | 19. | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 120. | | |
| | 9 | 21. | 0. | 0.1 | 0.2 | 0. | | |
| | 10 | 23. | 0.9 | 1.2 | 1. | 240. | | |
| | | | | | | - | | |

figura 49. Tabla de armónicos desbalanceadas para cargas no lineales.

4.7 CONFIGURACIÓN DEL FILTRO PASIVO.

Como se muestra en la **figura 50**, la configuración del filtro pasivo tipo R-L-C, conectado a la barra B3, diseñado para compensar reactivamente 1.0 Mvar a una frecuencia de resonancia de 300 Hz. Los parámetros de distribución como susceptancia, reactancia y resistencia también se muestran.

| atos Básicos | General Protocolo de medición Conductor de Secuencia | a Cero/Neutro | OK |
|--|--|---------------------------------------|----------|
| lescripción | Nombre Shunt/Filtro | | UK |
| lujo de Carga | Terminal ∨ → Grid\B3\Cub 5 | B3 | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | 7000 | | Figura |
| ortocircuito Completo | , | | |
| ortocircuito ANSI | Area | | ıra |
| ortocircuito IEC 61363 | ✓ Fuera de servicio | | |
| ortocircuito DC | Tipo de Sistema AC 🗸 Tecnología | З F- Ύ' ~ | |
| imulación RMS | Tanaida Naminal | | |
| imulación EMT | | Rs I C | |
| alidad de Energía/Armónicos | Tipo de Shunt R-L-C ~ | | |
| onfiabilidad | Modo de Entrada Por defecto ~ | | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | Controlador | | |
| lujo Óptimo de Potencia | Máx. No. de Pasos 1 | Potencia Reactiva Nominal Má1. Mvar | |
| lanificación del Despacho | No. de Pasos act. | Potencia activa real 1. Mvar | |
| | | | |
| | Parámetros de Diseño (por Paso) | Parámetros de Distribución (por Paso) | |
| | Pot.Reactiva Nominal, L-C | Susceptancia 4166667 uS | |
| | Frecuencia de Resonancia 300. Hz | | |
| | Factor de Calidad (a fr) 0. | | |
| | | Reactancia 0.0096 Ohm | |
| | | Basistansia 0. Ohm | |
| | | Next Centre 1 | |

figura 50 Parametrización del filtro Pasivo.

| atos Básicos | Dependencia de | a Frecuencia del Elemento R-L | OK |
|--|----------------|-------------------------------|----------|
| escripción | Inductancia | 0.02546479 mH | - OK |
| ujo de Carga | L(f) | \checkmark \rightarrow | Cancelar |
| ortocircuito VDE/IEC | Resistencia | 0. Ohm | Figura |
| ortocircuito Completo | Rs(f) | \checkmark \rightarrow | |
| ortocircuito ANSI | | | Ir a |
| ortocircuito IEC 61363 | | | |
| ortocircuito DC | | | |
| imulación RMS | | | |
| imulación EMT | Dependencia de | la Frequencia del Condensador | |
| alidad de Energía/Armónicos | Capacitancia | 11052.43 uF | |
| onfiabilidad | C(f) | \checkmark \rightarrow | |
| nálisis de la Capacidad de Integración | | | |
| ujo Óptimo de Potencia | | | |
| lanificación del Despacho | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

figura 51 Dimensionamiento del filtro Pasivo.

| Dependencia de la Frecuencia del Elemento R-L | Dependencia de la Frecuencia del Condensador |
|--|---|
| Inductancia L(f): 0.02546479 mH | Capacitancia C(f): 11052.43 µF |
| Resistencia Rs(f): 0.0 Ohm | |

La **figura 51** muestra los detalles de la dependencia de la frecuencia de los elementos R-L y del condensador en un filtro/shunt eléctrico, tal como se describe en la.:

Tabla 4-3. Dependencia de la frecuencia en R-L y condensador.

Esto indica que:

- ▶ La inductancia del elemento R-L varía con la frecuencia, siendo 0.02546479 mH.
- La resistencia del elemento R-L es constante e igual a 0.0 Ohm.
- La capacitancia del condensador es de 11052.43 μF y también depende de la frecuencia.

5 CAPITULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.



figura 52 Estado inicial de corriente



figura 53. Estado inicial de voltaje.



figura 54 Estado inicial de armónicos.

| PORCENTAJE DE ARMONICOS INICIAL | | | | | | |
|---------------------------------|---------|---------|---------|--|--|--|
| Ord. De Armónico | % line1 | % line2 | % line3 | | | |
| 5 | 26.303 | 27.644 | 26.607 | | | |

figura 55 Porcentaje de armónico inicial

Según la norma IEEE 519, los límites de distorsión armónicos totales son del 5% para sistemas de baja tensión. En las imágenes se observa que:

- Las corrientes de fase muestran variaciones significativas, lo que determina presencia de armónicos.

- Las tensiones línea-tierra también presentan variaciones que indican distorsión armónica.

- Los porcentajes de distorsión armónica en la tercera imagen muestran valores que superan ampliamente el límite del 5%, lo que indica un incumplimiento de la norma IEEE 519.

En resumen, los datos sugieren que los niveles de armónicos en el sistema analizado no cumplen con los límites establecidos por la norma IEEE 519.



figura 56. Estado final de corriente



figura 57. Estado final de Voltaje.

La aplicación del filtro pasivo ha tenido un impacto positivo en el sistema, como se evidencia en la siguiente **figura 58**. La reducción de distorsiones, el equilibrio entre fases y la estabilidad de las corrientes indican que el filtro está funcionando correctamente



figura 58. Porcentajes de armónico de corriente presentes en la red

- El sistema eléctrico analizado cumple con la norma IEEE 519 al momento de poner en servicio el filtro pasivo, ya que los niveles de distorsión armónica (THD) no superan el 3%, lo que está por debajo del límite del 5%.
- Las variaciones en las corrientes y tensiones sugieren la presencia de armónicos, pero estos no representan un problema significativo en este momento.

6 CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. CONCLUSION

Tras analizar las implicaciones y consecuencias de los fenómenos asociados a la calidad de la energía, se evidencia la importancia de realizar estudios técnicos profundos que vayan más allá de la simple corrección del factor de potencia. La selección adecuada de un filtro pasivo, basada en un análisis riguroso de la calidad de la energía, permite obtener variables reales que reflejan el comportamiento del sistema eléctrico y sus problemáticas específicas. Este enfoque no solo garantiza la mitigación efectiva de los armónicos y las corrientes reactivas, sino que también contribuye a la confiabilidad, eficiencia y estabilidad de la instalación.

La correcta selección de un filtro pasivo, respaldada por datos precisos y un análisis técnico detallado, no solo previene pérdidas económicas y materiales derivadas de fallas técnicas, sino que también optimiza el desempeño energético del sistema. De esta manera, se logra un equilibrio entre el cumplimiento de las normativas de los operadores de red y la protección de los equipos, asegurando una operación sostenible y eficiente a largo plazo. En definitiva, este trabajo resalta la importancia de priorizar un enfoque integral en la selección de filtros pasivos, donde el análisis de calidad de energía sea la base para tomar decisiones técnicas acertadas y beneficiosas para la instalación

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo, se recomienda que, en futuros proyectos o instalaciones industriales, se priorice la realización de un análisis exhaustivo de la calidad de la energía como paso previo a la selección e implementación de filtros pasivos. Dicho análisis debe incluir mediciones reales de variables como armónicos, corrientes reactivas, factor de potencia y distorsión armónica total (THD), con el objetivo de identificar las problemáticas específicas del sistema eléctrico y tomar decisiones técnicas fundamentadas. se sugiere emplear herramientas de simulación avanzadas, como DigSILENT Power Factory, que permitan modelar el comportamiento del sistema y validar la eficacia del filtro seleccionado bajo diferentes condiciones operativas.

Se recomienda adoptar un enfoque preventivo y proactivo en la gestión de la calidad de la energía, donde la implementación de filtros pasivos forme parte de una estrategia integral que garantice un funcionamiento óptimo, confiable y eficiente de la instalación. Este enfoque no solo contribuirá a la sostenibilidad energética, sino que también minimizará riesgos asociados a fallas técnicas, reduciendo costos operativos y mejorando el desempeño global del sistema eléctrico.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. A, "Calidad de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución," 2005.
- [2] "Calidad de energía: definición, por qué y cómo la medimos | Hioki." Accessed: Dec. 14, 2024. [Online]. Available: https://www.hioki.com/us-es/learning/electricity/power-quality.html
- [3] "Cuáles son los indicadores de calidad de la energía eléctrica Conocimiento." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: https://es.transformer-tester.com/info/what-are-thequality-indicators-of-electric-en-80286306.html
- [4] "¿Qué son los desequilibrios de tensión y corriente? | Fluke." Accessed: Dec. 16, 2024.
 [Online]. Available: https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/motores-sistemas-deimpulsion-bombas-compresores/desequilibrio-de-tension
- [5] M. de Apráiz Casuso and M. de Apráiz Casuso, "Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico," Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico, 2013.
- [6] "Armónicos eléctricos CIRCUTOR." Accessed: Nov. 12, 2024. [Online]. Available: https://circutor.com/soporte/formacion/notebooks/armonicos-electricos/
- [7] "IEEE SA IEEE 1100-1999." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/1100/1642/
- [8] "IEC 61036:1996 | IEC." Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/en/publication/18923
- [9] "Compresión del estándar IEEE 519-2022 para distorsión armónica." Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: https://es.ytelect.com/blog/understanding-ieee-519-2022-standard-for-harmonic-distortion_b223
- [10] E. Por, M. Ángel, and A. Cruz, "APUNTES DE COMUNICACIONES 1."
- [11] I. S. Candanedo, S. R. González, and L. Muñoz, "Diseño de un Modelo Predictivo en el Contexto Industria 4.0," *KnE Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 543, Feb. 2018, doi: 10.18502/KEG.V3I1.1458.

- [12] "Sistemas de Monitoreo de Energía | Ahorro y Calidad de Energía Eléctrica S.A de C.V." Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://acee.com.mx/sistemas-de-monitoreode-energia/
- [13] J. Dariel Arcila, "IEB S", Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: http://www.ieb.com.co
- [14] "IEEE SA IEEE C57.110-1986." Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/C57.110/2788/
- [15] D. Fernando and V. Garcia, "ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN SOBRE LA EFICIENCIA Y LA POTENCIA DEL MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN MEDIANTE MODELOS ELÉCTRICOS Y TÉRMICOS," 2015.
- [16] D. Maya Simonee Figueroa Romero Mildred Real Flores Judith Saldivar Romero Jazmin Estefany Asesor, F. Lara Jose Luis México, and C. DE México, "INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICO 5 'BENITO JUÁREZ'".
- [17] "MEMOBOX 300 SMART M&D Consultores." Accessed: Dec. 31, 2024. [Online]. Available: https://myd-consultores.com/portfolio/memobox-300-smart/
- [18] U. Zacatenco, "INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA".
- [19] "Tesis de grado sobre armonicos | PDF." Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: https://es.slideshare.net/slideshow/tesis-de-grado-sobre-armonicos/75863233
- [20] "Power Quality in Electrical Systems".
- [21] "UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA."