

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO) PARA LA LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE MAYOR CONCENTRACIÓN DE ARMÓNICOS Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS QUE MEJOREN LA CALIDAD DEL PRODUCTO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

RONALD ALEXIS FLORES GAVILANES

ronald.flores@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. Ing. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

gabriel.salazar@epn.edu.ec

Quito, Enero 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ronald Alexis Flores Gavilanes, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Gabriel Salazar Yépez.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Ronald Alexis Flores Gavilanes, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Ronald Alexis Flores Gavilanes

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico a mis padres Roció Gavilanes y Yamil Flores que me brindaron su confianza desde el momento que me propuse estudiar una carrera universitaria, sin su apoyo permanente hoy no estaría aquí además de motivarme a seguir adelante y cumplir con las metas que me proponga.

AGRADECIMIENTO

A mi madre que con sus consejos me encamino a seguir avanzando pese a todas las adversidades que tuve que afrontar en mi vida universitaria y al final poder culminar mis estudios, a mi padre que con sus enseñanzas de vida me daba la fuerza para cumplir las metas que me proponga, ambos me guiaron para formarme como una gran persona y gran profesional.

A mis hermanos Christian, Angélica, Andy, Beatriz, Esmeralda y a todos los miembros de mi familia que me dieron su apoyo y sus buenos deseos al momento de seguir con mis estudios.

A mi director de tesis el Dr. Ing. Gabriel Salazar que me dio su apoyo incondicional a lo largo de la realización de este proyecto.

A los ingenieros de la Empresa Eléctrica de Ambato por su apoyo y la ayuda brindada.

A mis amigos Cesar, Fernando, Dayana, Oscar, Jorge, Cristian, Alex, Andrés, Paul, Sandy, David, Darío por todo el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi estancia en la universidad además de los grandes momentos compartidos con cada uno de ellos.

Y por último quiero agradecer a las personas que han sido participes de mi vida y me apoyaron en cada etapa de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	3
1.3.1. SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN.....	3
1.3.1.1. Estructura De Los Sistemas De Distribución.....	4
1.3.2. ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	11
1.3.2.1. Fuentes de Armónicos.....	14
1.3.2.2. Efecto de los Armónicos.....	16
1.3.3. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	20
1.3.3.1. Estándar IEEE 1159-1995.....	21
1.3.4. MÉTODOS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	32
1.3.4.1. Transformadores en Delta.....	33
1.3.4.2. Transformadores con Diferentes Tipos de Conexión.....	34
1.3.4.3. Transformadores derivadores o en Zigzag.....	34
1.3.4.4. Inductancias de Choque o de Aislamiento.....	34
1.3.4.5. Aumento del número de pulsos de convertidores.....	34
1.3.4.6. Aumento del Calibre del Neutro.....	35
1.3.4.7. Desclasificación de Transformadores.....	35
1.3.4.8. Uso de Transformadores con Factor K.....	35

1.3.4.9. Filtros	37
1.3.5. MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	40
2. METODOLOGÍA.....	43
2.1. MANEJO DE INFORMACIÓN	45
2.2. ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	50
2.3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	56
2.4. INTERFAZ GRÁFICA.....	59
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1. VALORES ÓPTIMOS PARA EL ALGORITMO PSO	63
3.2. ALIMENTADORES ANALIZADOS	64
3.3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.....	78
3.4. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	80
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
4.1. CONCLUSIONES	83
4.2. RECOMENDACIONES	84
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
6. ANEXOS	89
ANEXO A.....	89
ANEXO B.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Esquema de Distribución de Energía Eléctrica.....	4
Figura 1.2. Estructura Sistema de Distribución.....	5
Figura 1.3. Red Aérea	6
Figura 1.4. Red Subterránea	7
Figura 1.5. Triángulo de Potencia.....	13
Figura 1.6. Factor de Potencia Verdadero.....	13
Figura 1.7. Límite de Operación de Banco de Capacitores.....	18
Figura 1.8. Transitorio Impulsivo.	22
Figura 1.9. Transitorio Oscilatorio.....	22
Figura 1.10. Variación de Voltaje de Corta Duración.....	24
Figura 1.11. Medición de Voltaje Desbalanceado.....	26
Figura 1.12. Componente DC.....	29
Figura 1.13. Notches de Voltaje.	30
Figura 1.14. Fluctuación de Voltaje	30
Figura 1.15. Distorsión de onda de voltaje	31
Figura 1.16. Análisis del armónico de orden 3.....	32
Figura 1.17. Análisis del armónico de orden 5.....	32
Figura 1.18. Filtro Activo de Potencia.	40
Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de análisis.	46
Figura 2.2. Logo librería Matplotlib.	47
Figura 2.3. Logo librería Seaborn	48
Figura 2.4. Logo librería Bokeh	49
Figura 2.5. Logo librería NumPy.....	49
Figura 2.6. Logo librería SciPy	50
Figura 2.7. Logo librería Pandas	50
Figura 2.8. Diagrama Algoritmo PSO	51
Figura 2.9. Parámetros para crear partículas	51
Figura 2.10. Parámetros del algoritmo.....	52
Figura 2.11. Principio algoritmo PSO	53
Figura 2.12. Parámetros mover partículas.....	53
Figura 2.13. Función a optimizar	54
Figura 2.14. Desplazamiento de la Partícula	55
Figura 2.15. Resultado Algoritmo PSO.....	56

Figura 2.16. Armónicos de Voltaje máximos	58
Figura 2.17. Resumen de Resultados.	59
Figura 2.18. Interacción Operación Interfaz.....	60
Figura 2.19. Diagrama del proceso HMI	60
Figura 2.20. Interfaz de Diseñada	61
Figura 3.1. Relación Número de Partículas e Iteraciones	63
Figura 3.2. Aviso de fin de proceso por condiciones de parada.....	64
Figura 3.3. Alimentadores analizados en el 2018	65
Figura 3.4. Resultados índice de coincidencia.....	66
Figura 3.5. Medición en alimentador rural de 2018.....	67
Figura 3.6. Medición en alimentador urbano de 2018.....	68
Figura 3.7. Tendencia Diaria Armónicos de voltaje Fase 1 de 2018	69
Figura 3.8. Tendencia mensual armónicos de voltaje Fase 1 de 2018	69
Figura 3.9. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 2 de 2018	70
Figura 3.10. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 2 de 2018	71
Figura 3.11. Análisis Alimentadores 2019	72
Figura 3.12. Medición en alimentador rural de 2019.....	74
Figura 3.13. Medición en alimentador urbana de 2019.....	75
Figura 3.14. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 1 de 2019	75
Figura 3.15. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 1 de 2019	76
Figura 3.16. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 2 de 2019	76
Figura 3.17. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 2 del 2019	77
Figura 3.18. Medición de diferentes frecuencias armónicas	78
Figura 3.19. Frecuencias Armónicas Máximas.....	79
Figura A.1. Tendencia Diaria Fase 1 – 2018	89
Figura A.2. Tendencia Mensual Fase 1 – 2018	89
Figura A.3. Tendencia Diaria Fase 2 – 2018	90
Figura A.4. Tendencia Mensual Fase 2 – 2018	90
Figura A.5. Tendencia Diaria Fase 1 – 2019	91
Figura A.6. Tendencia Mensual Fase 1 – 2019.....	91
Figura A.7. Tendencia Diaria Fase 2 – 2019	92
Figura A.8. Tendencia Mensual Fase 2 – 2019	92
Figura B.1. Ventana Inicial	93
Figura B.2. Ventana Asignada para el proceso de análisis.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Factor k para transformadores de distribución.	35
Tabla 1.2. Cargas con factor k.....	36
Tabla 2.1. Datos de las mediciones	44
Tabla 2.2. Valores de Posición de las Partículas	54
Tabla 2.3. Parámetros de Prueba para algoritmo PSO.	56
Tabla 2.4. Mediciones de Armónicos	57
Tabla 3.1. Alimentadores seleccionados para el estudio.	62
Tabla 3.2. Parámetros Algoritmo PSO	63
Tabla 3.3. Resultados Análisis 2018	65
Tabla 3.4. Valores atípicos Análisis 2018	66
Tabla 3.5. Armónicos de voltaje altos en Alimentadores 2018	71
Tabla 3.6. Resultados Análisis Alimentadores 2019	72
Tabla 3.7. Valores atípicos Análisis 2019	73
Tabla 3.8. Armónicos de voltaje altos en Alimentadores 2019	78
Tabla 3.9. Relación Alimentadores durante 2 años.....	80
Tabla 3.10. Especificaciones Transformadores de Distribución	81

RESUMEN

Los armónicos son los principales causantes del apareamiento de perturbaciones sobre las redes de energía eléctrica y son los que provocan problemas como la variación del nivel de voltaje que llega a los consumidores, para la identificación de los mismos las empresas encargadas de la distribución de la energía eléctrica realizan periódicamente mediciones de los niveles de voltaje y los armónicos de voltaje presentes en los alimentadores que se encuentran en su zona de cobertura, con las mediciones realizadas se elaboran índices de calidad del producto que ayuda a los organismos reguladores a comprobar cómo se maneja la energía.

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas PSO permite analizar una gran cantidad de datos simultáneamente para encontrar valores máximos y mínimos globales lo que implementándolo a una base de datos no lineales permite optimizar la búsqueda de los valores máximos de armónicos de voltaje además de identificar el orden del armónico de los mismo, con esto se puede realizar un análisis del efecto que puede causar sobre el sistema, si no se toma medidas que logren controlar sus efectos sobre los equipos de distribución afecta al sistema.

Con la ayuda de un software de programación permite incorporar los datos de las mediciones al algoritmo además de implementar una interfaz que permita al usuario visualizar de manera más precisa el funcionamiento del modelo y los resultados obtenidos para determinar el comportamiento del sistema.

PALABRAS CLAVE: armónicos, índices, algoritmo, optimización, eficiente, distribución

ABSTRACT

Harmonics are the main cause of the appearance of disturbances on electric power networks and are the ones that cause problems such as the variation of the voltage level that reaches consumers, for the identification of the same companies responsible for the distribution of electric power periodically perform measurements of voltage levels and voltage harmonics present in the feeders that are in their coverage area, with the measurements made product quality indexes that help regulatory agencies to check how energy is handled are developed.

The particle swarm optimization algorithm PSO allows to analyze a large amount of data simultaneously to find global maximum and minimum values, which by implementing it to a nonlinear database allows to optimize the search for the maximum values of voltage harmonics in addition to identifying the order of the harmonic of the same, with this you can perform an analysis of the effect that can cause on the system, if measures are not taken to control their effects on the distribution equipment affects the system.

With the help of a programming software allows to incorporate the data of the measurements to the algorithm in addition to implementing an interface that allows the user to visualize more accurately the functioning of the model and the results obtained to determine the behavior system.

KEYWORDS: harmonics, indexes, algorithm, optimization, efficiency, distribution

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de distribución es el encargado de brindar servicio eléctrico a todos los usuarios luego de una serie de procesos que comienzan con la generación de energía eléctrica pasando por los sistemas de transmisión, subtransmisión y distribución. Las empresas encargadas de la distribución de energía eléctrica ofrezcan un servicio de alta calidad se rigen a las normativas de las entidades reguladoras de energía, las cuales son las que determinan los límites permitidos de pérdidas sobre el sistema. La calidad del producto se ve afectada por la interrupción del servicio, la existencia de perturbaciones principalmente por los armónicos sobre las redes de distribución las mismas que causan variación de los niveles de voltaje a los consumidores.

Las cargas no lineales son responsables de introducir armónicos en las redes eléctricas, estas cargas están compuestas por elementos inductivos y capacitivos, estos producen cambios en el voltaje aplicado a los equipos electrónicos, los aparatos electrónicos más comunes que producen armónicos son las lámparas fluorescentes, computadores, reguladores de velocidad, etc. Todos los consumidores del sistema eléctrico ya sean industriales, comerciales, residenciales o para alumbrado público tienen al menos un equipo electrónico que causa perturbaciones a la red. Una de las tareas de las empresas de distribución es buscar alternativas para controlar o mitigar la presencia de armónicos en las redes eléctricas, esto se lo puede hacer implementando diversos métodos que permiten reducir los efectos de los armónicos sobre los equipos pero solo es una solución paliativa.

La Empresa Eléctrica de Ambato realiza periódicamente mediciones especiales en los alimentadores en donde constan el nivel de voltaje que es suministrado además de diversos parámetros que detallan el comportamiento del sistema, entre esos parámetros medidos están los armónicos de voltaje que son los analizados en este proyecto. Las mediciones se realizan durante siete días consecutivos en periodos de diez minutos en cada fase de los alimentadores escogidos al azar por toda la zona de cobertura, alimentadores urbanos o rurales, toda la información tomada sirve para realizar estudios y determinar algún problema.

Para el manejo de los datos es necesario el uso de herramientas computacionales que permitan manipular una amplia cantidad de valores y facilita la selección de información más relevante y adecuada. Debido a que las mediciones realizadas obtienen gran cantidad de datos es útil analizarlos en formato .csv ya que tiene facilidad de importar los valores al software Python además realizar una programación del algoritmo por enjambre de partículas para optimizar una variable que sea mayor entre todos los valores medidos

considerando las restricciones de cada medición, con este análisis se encuentran los valores máximos de armónicos de voltaje en cada fase de los alimentadores identificando el orden del mismo para considerar los métodos de mitigación más adecuados para controlarlos, identificar los problemas que tienen las redes del sistema eléctrico de manera oportuna puede ser beneficioso para proteger los equipos instalados además de hacer mantenimientos preventivos.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Analizar los datos de mediciones de voltajes de armónicos utilizando el algoritmo de optimización PSO en Python que permita localizar los valores máximos de armónicos de voltaje en las fases de los alimentadores además de implementar una interfaz que ayude en la interacción con el usuario para apreciar los resultados obtenidos.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Obtener la base de datos de las mediciones de voltajes de armónicos en formato .csv.
- Utilizar las herramientas de Python para implementar el modelo de optimización por enjambre de partículas de una variable considerando los datos medidos.
- Comprobar los resultados obtenidos del modelo de optimización PSO de los diferentes alimentadores analizados buscando la presencia de valores anormales que puedan significar problemas en el sistema eléctrico.
- Implementar una interfaz que permita al usuario interactuar con los parámetros del algoritmo además de poder visualizar los resultados obtenidos.
- Proponer alternativas para la disminución o mitigación de armónicos en los alimentadores de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.

1.2 ALCANCE

La información de la Empresa Eléctrica Ambato de mediciones realizadas en los alimentadores urbanos y rurales de la zona de cobertura son utilizados para la determinación de índices de calidad del producto, para realizar el análisis de perturbaciones causadas por la presencia de armónicos en las fases de los alimentadores del sistema de distribución se utiliza los valores de voltajes de armónicos, la primera etapa consiste en la revisión de toda la información obtenida además de convertirla al formato

.csv que permite el análisis y vinculación con software de tratamiento de datos, después investigar todas las variables que necesita el algoritmo de optimización para analizar los datos se implementa un modelo en Python que permita al usuario definir parámetros para el funcionamiento del algoritmo de optimización.

Para la próxima fase se programa el algoritmo PSO en el software Python utilizando todas herramientas disponibles, estableciendo todas las constantes necesarias para el correcto funcionamiento además de establecer dos parámetros que sean controlados por el usuario que permita verificar el funcionamiento del algoritmo, la programación vincula la base de datos adquirida y el algoritmo para analizar las fases de los alimentadores e identificar cuales alimentadores con mediciones atípicas.

En la fase de prueba incorporamos todas las modificaciones que sean necesarias para que el algoritmo implementado analice los valores de manera más eficiente, para esto se modifica los parámetros controlados por el usuario como son el número de partículas y de iteraciones, para la siguiente fase en la que validamos los resultados obtenidos se comparará con las mediciones en otros alimentadores, con esto se espera identificar valores atípicos en los alimentadores además de determinar casos donde exista una mayor presencia de armónicos de voltaje en el sistema y la posibilidad de proponer alguna alternativa de acuerdo a las características del sistema que permita mantener una buena calidad del producto garantizando

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1. SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN

El sistema eléctrico de potencia está compuesto por diferentes procesos, la figura 1.1 detalla las etapas desde la generación de energía eléctrica hasta que llega a los consumidores pasando por etapas como transmisión, subtransmisión y distribución, cada una de estas etapas se las divide por el nivel de voltaje. La etapa de distribución de energía eléctrica es la que se encarga de garantizar el suministro hasta los centros de carga de forma segura, esta etapa implica que se haga un proceso de planificación y diseño considerando criterios de crecimiento de carga, operación y mantenimiento de tal manera que garantice la calidad del servicio. [1]

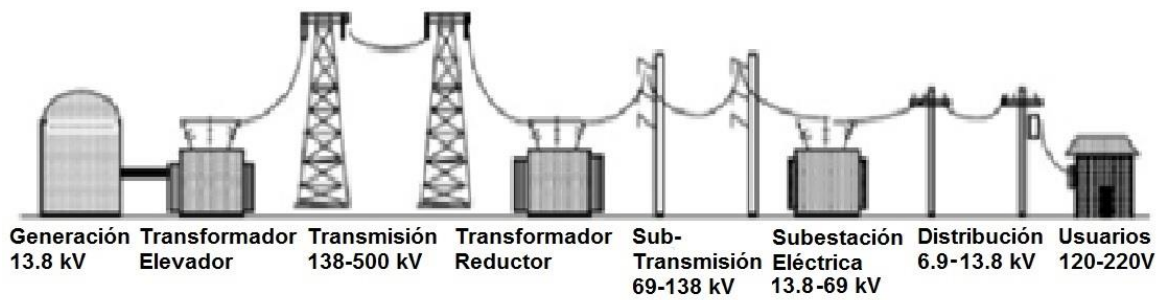


Figura 1.1. Esquema de Distribución de Energía Eléctrica. [17]

Los centros de consumo se clasifican según la carga que manejan dividiéndose en residencial, comercial e industrial, estos tipos de carga pueden encontrarse en toda la zona de cobertura tanto urbana como rural, se los diferencia por el nivel de voltaje y la densidad de carga que tengan ya sea grande o pequeña respectivamente. Los grandes consumidores se clasifican por el grado de confiabilidad del servicio que tienen, por ejemplo los hospitales los cuales alguna falla en el suministro implicaría pérdidas económicas muy altas por tal razón su confiabilidad debe ser del 100%, para estos casos los centros de carga son alimentados por varios fuentes como medida de respaldo.

1.3.1.1. Estructura De Los Sistemas De Distribución.

El sistema de distribución está conformado por subestaciones de distribución, elementos de protección, alimentadores de distribución o primarios, transformadores de distribución, circuitos secundarios y acometidas o circuitos de conexión con los consumidores. [6]

Los circuitos de subtransmisión se conectan directamente desde las fuentes de energía hasta las diversas subestaciones.

- Las Subestaciones eléctricas están conectadas a las líneas de subtransmisión y son las encargadas de transformar el voltaje y conectarlos a los alimentadores primarios.
- Los circuitos principales o alimentadores primarios se encuentran en toda la zona de cobertura, este circuito manejan medio voltaje los cuales comprenden voltajes de 6.9 kV en adelante conforme el sistema lo necesite y son conectados a los transformadores de distribución.
- Los transformadores de distribución son los encargados de transformar el medio voltaje a bajo voltaje para suministrar los circuitos secundarios.

- El circuito secundario está conectado con los consumidores y tiene voltajes como 120 V, 220 V, dependiendo el tipo de usuario puede tener hasta 600 V. [6]

La figura 1.2 indica el diagrama unifilar de un sistema de distribución básico en donde muestra la conexión desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales.

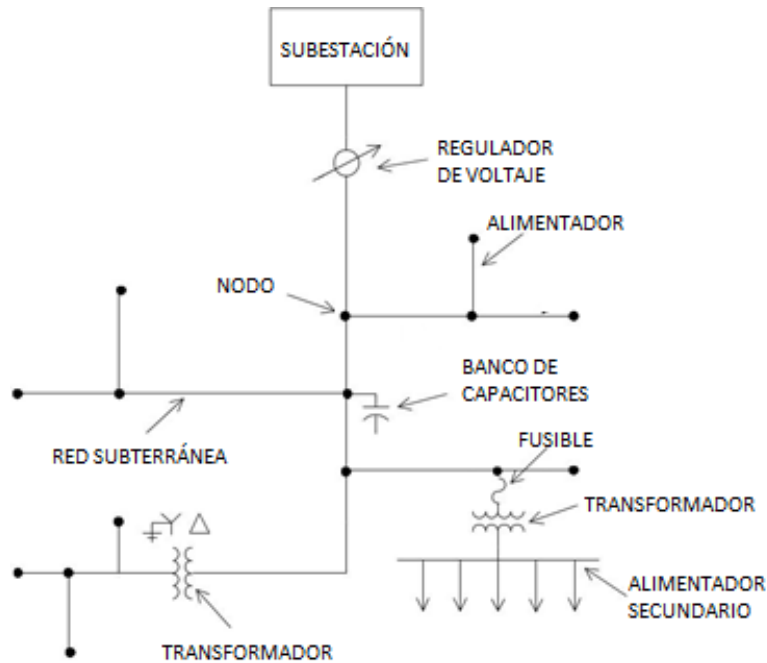


Figura 1.2. Estructura Sistema de Distribución. [27]

El sistema eléctrico de distribución comprende varios aspectos, se clasifica de acuerdo a varios criterios como:

1.3.1.1.1. Por su Construcción

Describe la forma por donde está trazado los circuitos eléctricos. [1]

a. Redes de Distribución Aéreas.

Es aquella que transmite la energía eléctrica generalmente utilizando conductor desnudo, están ubicados en espacios abiertos sobre postes o estructuras con aisladores puestos en crucetas como se indica en la figura 1.3.



Figura 1.3. Red Aérea [27]

Los componentes del Sistema de Distribución Aérea son:

- Poste, pueden ser fabricados de concreto, madera o metálicos, para circuito urbanos o rurales se utilizan postes de 10, 12 y 14 metros [2], cada uno cuenta con un valor de resistencia de ruptura la cual se considera de acuerdo a la cantidad de elementos a instalarse en esa estructura.
- Conductor, se utiliza de Aluminio o ACSR desnudo, para circuitos primarios y secundarios se usa calibre 4/0, 3/0, 2/0, 1/0 y 2 AWG, los circuitos son de 3 y 4 hilos con neutro conectado a tierra, para su selección se considera resistividad, conductividad y resistencia a la deformación. [2]
- Aislador, son utilizados para mantener al conductor fijo, separado y aislado de las estructuras que no están bajo carga, son seleccionadas de acuerdo a las normas ANSI que especifican las condiciones ambientales del circuito.
- Las crucetas se usan para soportar a los aisladores y conductores en los postes o estructuras, constan de diferente forma para cubrir las necesidades del entorno donde se vayan a colocar.
- Seccionamiento, se considera equipo de protección debido a que entra en operación cuando surge algún cortocircuito y desconecta parcialmente al circuito para no afectar el suministro de los sectores que no presente ningún tipo de problema.

Ventajas en comparación con redes de distribución subterráneas.

- Inversión Baja.

- Operación y Mantenimiento más sencilla.
- Localización de fallas sencilla.
- Rápida construcción.

Desventajas:

- Poco aspecto estético.
- Peligro a los transeúntes.
- Menor Confiabilidad.
- Susceptibles a fallas y suspensión del servicio.
- Están expuestos a polvo, lluvia, granizo, descargas atmosféricas, fenómenos de la naturaleza.[2]

b. Redes de Distribución Subterráneas.

Se implementan en casos de estética, aglomeración o en condiciones de seguridad donde no es recomendada las redes aéreas, se utiliza conductores cubiertos de capas aislantes y cubiertas protectoras dependiendo el nivel de voltaje. La figura 1.4 indica el proceso de instalación de una red subterránea en donde se puede observar la conexión de cajas de distribución mediante tuberías de diferente grosor dependiendo el nivel de voltaje y el número de circuitos a ser instalados.



Figura 1.4. Red Subterránea [27]

Componentes del Sistema Subterráneo:

- a. Las Cámaras son utilizadas para inspección y conexión de circuitos ya que pueden almacenar uno o más circuitos, deben tener las dimensiones necesarias para alojar hasta 2 operarios, la distancia entre cámaras varía según la instalación además de su tamaño y forma puede variar dependiendo las características de la zona.
- b. Ductos, generalmente se utiliza tubería PVC o metálica, el diámetro de la tubería depende del número de conductores, debido a normas de instalación se deja el 40% de la tubería libre para criterios de circuitos de respaldo o para reemplazar conductores.
- c. Los Conductores utilizados tienen mayor aislamiento debido a las condiciones de la instalación debido a que deben tener mayor aguante, pueden ser monoplares o tripolares.

Ventajas en comparación con redes de distribución aéreas.

- a. Ofrece mayor confiabilidad.
- b. Mejora la estética.
- c. Dan mayor seguridad.
- d. Más protegidas contra vandalismo.

Desventajas.

- a. Dificultad en localización de fallas.
- b. Mantenimiento complicado.
- c. Exposición a humedad.
- d. Alta Inversión.

1.3.1.1.2. Por su Ubicación Geográfica.

- a. Redes de Distribución Urbana

Son diseñadas de acuerdo a criterios de mejoramiento o remodelación tomando en cuenta el crecimiento de la carga, tienen en su mayoría configuración radial que garantiza mayor confiabilidad en el servicio [6], principales características:

- Zonas muy concentradas.

- Fácil acceso.
- Generalmente se utiliza estructuras de concreto.
- Utiliza circuitos monofásicos, bifásicos y trifásicos.
- El trazado de los circuitos eléctricos necesitan coordinarse con las redes telefónicas, redes de agua potable y de alcantarillado.
- Utiliza conductores de aluminio, cobre y ACSR.
- Se utiliza transformadores trifásicos en zonas de gran densidad de carga y monofásicos en zonas de carga moderada.

b. Redes de Distribución Rural

La instalación de redes de distribución rural se las realiza por consentimiento social ya que se debe suministrar energía a todos los usuarios que lo necesiten, el consumo per cápita no se compara con las redes urbanas, características:

- Usuarios ubicados en zonas dispersas.
- Cargas principalmente monofásicas.
- Dificultad de acceso en ciertas zonas de consumo.
- Algunas zonas disponen de estructuras de madera.
- Los circuitos eléctricos tienen instalados transformadores bifásicos y trifásicos.
- Estas zonas son consideradas como esquemas de alivio de carga cuando el sistema los requiera.

c. Redes de Distribución Suburbana

Estas redes tienen características de redes urbanas y rurales, es decir zonas de gran concentración donde la demanda no es significativa por ejemplo los asentamientos.

d. Redes de Distribución Turísticas

Estas redes de distribución se caracterizan por el nivel de carga con la temporada vacacional.

1.3.1.1.3. *Por el Tipo de Carga*

Para su clasificación se toma en cuenta a los usuarios del sistema.

a. Cargas Residenciales

Son las que comprenden generalmente departamentos, condominios, urbanizaciones, se caracterizan por tener en su mayoría cargas resistivas, además de una pequeña carga reactiva ocasionada por la presencia de electrodomésticos. [1]

Las cargas residenciales se las clasifican en zonas de acuerdo al nivel socioeconómico de los clientes.

- Clase Alta, usuarios con alto consumo de energía.
- Clase Media, usuarios con un moderado consumo.
- Clase Baja, representan a los usuarios con un bajo consumo de energía.

b. Cargas Comerciales

Se caracterizan por estar en zonas de comercio o áreas céntricas de las ciudades, las cargas constan de una parte resistiva e inductiva que generalmente causan que el factor de potencia disminuya.

c. Cargas Industriales.

Su carga presenta componente reactivo por la cantidad de maquinaria o equipos instalados, generalmente motores, ya que afectan al sistema el necesario establecer una corrección en el factor de potencia además de una gestión de carga en la que especifican la tasa de consumo para evitar el excesivo pico de demanda.

d. Alumbrado Público.

Son cargas que tienen consumo nocturno.

e. Cargas Mixtas.

Representan la combinación de diferentes tipos de carga en la misma red de distribución, no es recomendable este tipo de cargas debido a la dificultad que causa la localización de pérdidas.

1.3.1.1.4. *Por su Confiabilidad.*

La confiabilidad es un concepto que se define con la relación entre el número de interrupciones y el tiempo que tardo el sistema en regresar a la normalidad. [13]

a. Primera Categoría

Aquí están incluidas cargas que por ningún motivo pueden sufrir una interrupción, las interrupciones en esta categoría implicaría riesgo de muerte, daños en equipos o maquinarias que impliquen altos costos por ejemplo los hospitales o centros de salud por tal razón se ven en la necesidad de implementar sistemas alternos de alimentación para no quedar sin energía.

b. Segunda Categoría

En esta categoría se encuentran las pequeñas fábricas que pueden soportar una interrupción corta (máximo 5 minutos) sin afectar gravemente al consumidor.

c. Tercera Categoría

Aquí se encuentran los usuarios residenciales de las zonas rurales donde las interrupciones son controladas por las empresas distribuidoras considerando criterios de alivio de carga con la finalidad de mantener el sistema eléctrico estable.

1.3.2. ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los armónicos se originan de las cargas no lineales y son la principal causa de introducir perturbaciones en los sistemas de distribución por lo que afecta la calidad de la energía suministrada además de causar efectos nocivos en los equipos conectados en el sistema eléctrico. Algunas cargas no lineales que utilizan electrónica de potencia son convertidores de potencia, accionamientos de frecuencia variable, controladores de motores de corriente continua, UPS, ascensores, cargadores de baterías, inversores.[7]. Por la cantidad de cargas no lineales instaladas en el sistema eléctrico la onda fundamental de voltaje se va distorsionando conforme el número de perturbaciones aumenta.

Para cuantificar y evaluar la distorsión armónica se utiliza los siguientes indicadores:

a. Factor de Potencia.

Es la relación entre la potencia verdaderamente útil y la potencia total consumida.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

La relación de las potencias fundamentales se denomina coseno phi.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (1.2)$$

Donde:

FP =Factor de Potencia.

S = Potencia Aparente.

P = Potencia Activa.

$P1$ = Potencia Activa Fundamental.

$S1$ = Potencia Aparente Fundamental.

En un sistema eléctrico cuando existe la presencia de armónicos el factor de potencia es diferente al $\cos \varphi$.

b. Factor de Cresta.

Es la relación entre el valor de cresta de voltaje o corriente con su valor eficaz, cuando se maneja ondas sinusoidales el valor del factor cresta es $\sqrt{2}$, cuando se analiza cargas no lineales el valor del factor de cresta es mayor a $\sqrt{2}$, puede alcanzar valores de 1.5 o 2, incluso hasta 5 en los caso críticos.

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \text{ o } k = \frac{V_m}{V_{RMS}} \quad (1.3)$$

Donde:

k = Factor de Cresta.

I_m = Valor Cresta de Corriente.

I_{RMS} = Corriente Eficaz.

Con valores del factor de cresta muy altos pueden ser detectados por los dispositivos de protección y causar que desconexiones.

c. Potencia de Distorsión.

Para el cálculo de la potencia en el sistema se basa en el triángulo de potencia como se muestra en la figura 1.5 en donde se representa la relación de las diversas potencias que aparecen en el sistema. Cada armónico puede contribuir a la potencia promedio tanto positiva como negativamente. [8]

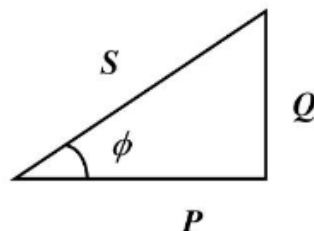


Figura 1.5. Triángulo de Potencia. [27]

Al considerar la potencia activa y reactiva para el cálculo de la potencia aparente se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$

Cuando el sistema eléctrico tiene presencia de armónicos la Ecuación 1.4 no es válida para el cálculo de la potencia real por lo se implementa un nuevo valor denominada la potencia de distorsión D, con este parámetro incluido la representación de las potencias se muestra en la figura 1.6 en donde se añade la potencia de distorsión.

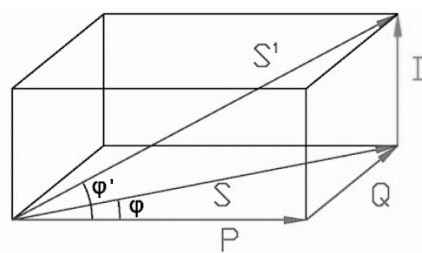


Figura 1.6. Factor de Potencia Verdadero. [27]

Con este nuevo parámetro se puede determinar la verdadera potencia consumida y se la calcula con la Ecuación 1.5.

$$S^! = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.5)$$

Por lo tanto el factor de potencia verdadero se lo calculo utilizando la Ecuación 1.6.

$$FP = \frac{P}{S^!} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.6)$$

Donde:

$S^!$ = Potencia Aparente Verdadera [VA].

P = Potencia Activa [W].

Q = Potencia Reactiva [VAr].

D = Potencia de Distorsión [VArh].

d. Distorsión Armónica Total.

Conocida como THD, es la medida utilizada para definir el contenido armónico de una señal de voltaje o corriente, cuando se analiza voltaje se utiliza la siguiente expresión.

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \times 100\% \quad (1.7)$$

Para el manejo de corriente:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100\% \quad (1.8)$$

Una expresión equivalente se utiliza el valor fundamental y el valor *rms*, como muestra la ecuación 1.9.

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \times 100\% \quad (1.9)$$

La distorsión armónica total es un índice utilizado en el análisis de los sistemas de distribución y transmisión para describir la calidad de la energía eléctrica. [8]

1.3.2.1. Fuentes de Armónicos.

Los armónicos pueden ser generados en la red eléctrica, las diferentes etapas del sistema eléctrico pueden generar perturbaciones, en la generación los armónicos pueden ser producidos por los inversores y baterías, en el sistema de transmisión se debe a los sistemas flexibles de transmisión (FACTS) mientras que en el sistema de distribución se da por el alumbrado público con balastro electrónico [16], anteriormente se consideraba que la distorsión armónica se debía a la saturación de transformadores, hornos de arco industriales o grandes soldadoras, pero a la vez debido a que los sistemas eléctricos se planificaban considerando criterios de mejor dimensionamiento de los equipos los armónicos no representaba problemas al sistema. [8]

Los equipos que generan armónicos son los basados en electrónica de potencia, las cargas no lineales además del aumento de la generación distribuida utilizando generadores no convencionales.

a. Hornos de Arco Eléctrico.

Son utilizados para la fundición de aceros, su funcionamiento se basa en electrodos que al hacer contacto con el acero forman un arco eléctrico de gran magnitud, los armónicos producidos por los hornos de arco eléctrico son de magnitud variable debido al cambio de en los ciclos de trabajo, la corriente del arco eléctrico no es periódica y con ayuda de los analizadores se puede identificar el orden de los armónicos producidos.

b. Hornos de Inducción.

Este tipo de hornos funcionan basados en un rectificador e inversor que ayuda en el control de la frecuencia de alimentación de la bobina, con esto se puede controlar el calentamiento de las piezas metálicas.

c. Motores y Generadores.

Para determinar la corriente de n - ésimo armónico de un motor trifásico de inducción se utiliza la ecuación 1.10.

$$I_n = \frac{V_n}{n \cdot \omega_o \cdot L_{1n}} \quad (1.10)$$

Donde:

I_n = Corriente RMS.

V_n = Voltaje RMS.

ω_o = Frecuencia Fundamental.

L_{1n} = Suma de Inductancias de dispersión del rotor y estator referida al estator.

d. Transformadores.

Son la principal fuente de armónicos en el sistema eléctrico debido a la corriente de magnetización, actualmente si los transformadores se encuentran en estado estable no causan una distorsión significativa en el sistema eléctrico sin embargo en eventos de que involucren las perturbaciones transitorias pueden aumentar la contribución armónica a la red, la corriente de magnetización está asociada a la saturación del núcleo del transformador produciendo los armónicos impares, ignorando la onda fundamental los transformadores puede atrapar los armónicos triples utilizando la conexión delta por lo tanto solo se observan los armónicos 5, 7, 11, 13, 17, 19.

e. Convertidores Estáticos de Potencia.

Constituyen la mayor cantidad de carga no lineal del sistema, la utilización puede ser como reguladores de velocidad o en fuentes de alimentación electromecánica, para cuestiones de operación se puede realizar el cambio de corrientes AC-DC, DC-AC, AC-AC, DC-DC, lo cual permite tener una amplia cobertura para diferentes equipos o maquinaria, según el trabajo realizado se inyecta armónicos a la red.

La frecuencia de las corrientes armónicas producidas por los convertidores estáticos de potencia está relacionados con el número de pulsos generados, se determina con la expresión $pk \pm 1$, la magnitud de cada armónico va disminuyendo proporcionalmente

según el orden del armónico, para el análisis de las amplitudes de los armónicos se los toma en cuenta hasta el 49 ya que posterior a este son muy pequeños por lo que son despreciables.

f. Luminarias.

Las lámparas convencionales a base de balastos producen armónicos de baja frecuencia debido al comportamiento no lineal del inductor y genera principalmente el armónico de orden 3 el cual es de secuencia cero y fluye por los conductores de neutro y tierra, las lámparas fluorescentes de balasto electrónico trabajan con alta frecuencia por lo que los armónicos generados también son de alta frecuencia.

Las lámparas incandescentes no generan armónicos pero si pueden afectar la presencia de los mismos en el sistema eléctrico además de afectar la vida útil de la lámpara, la vida útil se lo determina con la siguiente expresión.

$$L = \left(\frac{1}{V_1^2 \cdot (1 + (VDF)^2)} \right)^2 \quad (1.11)$$

Donde:

L = Vida útil de una lámpara.

V_1 = Voltaje fundamental en por unidad.

VDF = Factor de Distorsión de Voltaje.

g. Electrodomésticos.

Actualmente los electrodomésticos utilizan gran cantidad de dispositivos electrónicos que se caracterizan por manejar cargas no lineales las mismas que son causantes de afectar el sistema debido a que generan armónicos a la red.

1.3.2.2. Efecto de los Armónicos.

La presencia de armónicos sobre la red eléctrica causa varios efectos en los elementos del sistema.

a. Conductores.

Cuando circula corriente directa produce un calentamiento sobre el conductor causando pérdidas por efecto Joule, como se muestra en la ecuación 1.12.

$$E = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.12)$$

Donde:

E =Energía disipada por el conductor cuando circula energía eléctrica.

R = Resistencia a corriente directa.

I = Corriente.

t = Tiempo.

Por lo tanto al aumentar la frecuencia de la corriente que circula por el conductor implica que disminuya su área efectiva, la resistencia a corriente alterna es mayor que cuando es corriente directa y aumenta con la frecuencia, en cambio con corrientes distorsionadas las pérdidas causadas por el efecto Joule son mayores debido a la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente. [14]

b. Transformadores.

Los transformadores son diseñados para operar con corriente alterna, a frecuencia fundamental dependiendo del país (50 o 60 Hz) para trabajar a condiciones normales y a temperatura ambiente lo que implica que cuando suba la temperatura pueda disipar el calor producido por las pérdidas, las pérdidas que tienen los transformadores pueden ser:

- Pérdidas sin carga o núcleo.

Son producidas por el voltaje de excitación del núcleo, la forma de onda del voltaje en el lado primario tiene forma sinusoidal sin depender la corriente de carga, la corriente de magnetización consiste de armónicos pero son pequeños comparados con la corriente de carga por lo tanto los efectos de las pérdidas totales son mínimos.

- Pérdidas $I^2.R$

Las pérdidas por el efecto piel aumentaran si existe armónicos en la corriente de carga.

- Pérdidas por corriente de Eddy.

Estas pérdidas se las representan como el cuadrado de la corriente de carga y el cuadrado de la frecuencia cuando se trabaja con la frecuencia fundamental, puede generar un aumento en la temperatura debido a las pérdidas en los devanados.

- Pérdidas adicionales.

Son causadas por el aumento de la temperatura en la estructura del transformador.

c. Equipos de Protección

Los armónicos son los responsables de problemas en la operación de los sistemas de protección debido a que los equipos de sobre voltajes actúan analizando la forma de onda de voltaje y la presencia de perturbaciones causan la aparición de ondas no sinusoidales, la mala operación de estos equipos pueden causar la sobreprotección o la falla en la misma.

Cuando existe ondas con picos agudos los dispositivos de medición pueden dejar pasar estos cambios, estos valores atípicos pueden ser peligrosos para el sistema y el equipo de protección puede dejar vulnerable a la red como existe el caso que los valores no sean dañinos y causen falsos disparos de las protecciones, tomando en cuenta todos los casos en las que pueden actuar los equipos de protección en la actualidad estas vienen diseñadas con varios parámetros para aumentar su confiabilidad. [6]

d. Barras de Neutro.

Las barras de neutro son los puntos que unen los neutros de las cargas monofásicas, para el caso de cargas balanceadas las corrientes de secuencia positiva y negativa se anulan entre sí, las barras pueden sobrecargarse por el efecto de los armónicos. Para secuencia cero los armónicos triples no son cancelados por lo tanto sobrecargan la barra por el flujo de corriente, aunque las barras de neutro están diseñados para soportar el valor de la corriente de fase estas se sobrecalientan debido al flujo de armónicos de las diferentes secuencias sin importar que las cargas sean balanceadas o desbalanceadas.

e. Banco de Capacitores.

El incremento en el valor rms del voltaje se debe al aumento de la corriente y la temperatura, la combinación de estas variaciones causa que el punto de falla del dieléctrico disminuya considerablemente, la figura 1.7 indica los límites de operación de los bancos de capacitores de acuerdo al estándar IEEE 18-2002.[22]

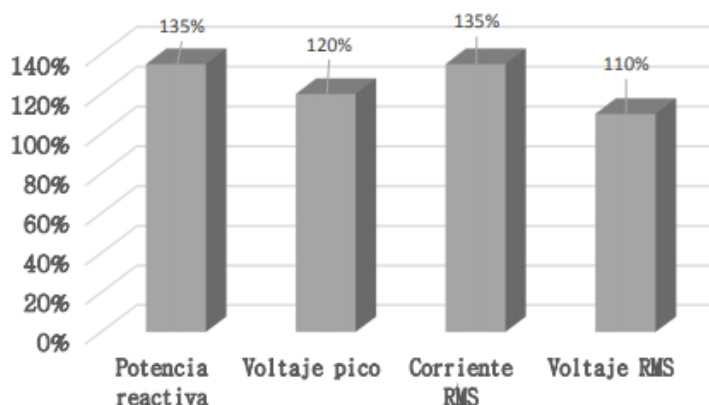


Figura 1.7. Límite de Operación de Banco de Capacitores. [22]

La causa de las variaciones de voltaje puede ser causada por pequeñas cargas

f. Maquinas Rotativas.

La suma de los armónicos de corriente provoca aumento en la temperatura, la suma de los armónicos de secuencia positiva y negativa en la onda nominal afecta a los torques pulsantes de las maquinas rotativas, en ciertas ocasiones generan picos de voltaje y corriente que producen fuerzas magneto motrices que se manifiestan en máquinas de torques como variación de frecuencias y causan vibración al momento de la operación, deterioro de los metales y desgaste en los rodamientos.

Los flujos adicionales inducen pérdidas en los conductores las cuales son mayores a las pérdidas asociadas a la resistencia DC causadas por las corrientes de Eddy y el efecto Piel. En el caso de máquinas con devanado trifásico la fuerza magneto motriz es una onda viajera en dirección positiva por lo tanto los armónicos triples son nulos, el quinto armónico va en dirección negativa, el séptimo armónico va en dirección positiva y así respectivamente con los demás armónicos.

En motores la presencia de armónicos de corriente causan ruidos, los armónicos de orden quinto y séptimo generan oscilaciones mecánicas en sistemas motor-carga o turbina-generador debido a que afectan al giro de la máquina, es necesario utilizar más corriente para que no afecte la operación y la eficiencia se mantenga.

g. Máquinas de Corriente Alterna

Se caracteriza por tener baja impedancia a los armónicos, los efectos que causan a estas máquinas son:

- Aumento de temperatura causado por perdidas en el cobre y el acero.
- Variación de la eficiencia y las oscilaciones debido al cambio en el torque.

Los efectos que producen los armónicos a las máquinas de corriente alterna dependen del diseño eléctrico y la fuente armónica, los armónicos de secuencia positiva causan que el flujo magnético rotacional gire a velocidad $n\omega$ positiva y con magnitud proporcional a la corriente armónica, en el caso de armónicos de secuencia negativa el flujo rotacional gira en dirección opuesta con la misma magnitud finalmente para secuencia cero no produce densidad de flujo magnético neto. [7]

h. Circuitos Comunicación

El principal efecto producido es la interferencia en la comunicación como distorsiones, los armónicos de corriente que existen en el sistema de potencia se adhieren a los sistemas de comunicación por inducción o conducción directa, el ruido generado por los armónicos de voltaje y corriente en la red eléctrica se determina con el Factor de Influencia Telefónica o TIF.

i. Otros Equipos.

Los equipos electrónicos pueden fallar por la presencia de armónicos, estos equipos pueden verse afectados debido a que vienen diseñados para trabajar con la forma de onda sinusoidal por lo tanto identifica los cruces por cero de la onda de voltaje.

Los equipos de medición son afectados por las componentes armónicas principalmente cuando están bajo condiciones de resonancia debido a que generan armónicos de voltajes altos, dependiendo el tipo de medidor las variaciones pueden ser positivas o negativas.
[11]

1.3.3. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En la sociedad actual la energía eléctrica se ha convertido en un recurso indispensable debido a que toda actividad ya sea laboral o recreativa necesita utilizar algún equipo eléctrico, por lo tanto las empresas de distribución ofrecen una buena confiabilidad del servicio a los usuarios que lo necesitan. Con el aumento de cargas no lineales también aumenta la presencia de armónicos, estas perturbaciones causan que la onda fundamental se distorsione lo que provoca que pueda existir fallas o desconexiones en la red, el centro de control debe hacer todo lo posible para evitar las interrupciones en el servicio por lo tanto monitorean constantemente cualquier variación que se produzca además de atender los reclamos de los clientes y si es el caso hacer lo posible para restablecer el servicio en el menor tiempo. [10].

La calidad de la energía eléctrica que ofrecen las empresas distribuidoras está orientado a los siguientes aspectos:

- Calidad del Servicio Técnico, está orientado a la continuidad del servicio, para determinar este parámetro se utiliza la información de la duración de todas las interrupciones del servicio registradas en un periodo de tiempo con esto se determina que tan confiable llega a ser el sistema.

- Calidad del Producto Técnico, también representada como calidad de energía, está orientada al nivel de voltaje del sistema, las perturbaciones del voltaje y el factor de potencia.
- Calidad del Servicio Comercial, enfocado en las capacidades de atención al clientes para solicitudes y reclamos, errores de mediciones y facturación. [18]

El sistema eléctrico se ve afectado por diferentes fenómenos electromagnéticos que causan varias perturbaciones e interrupciones a la red, estas perturbaciones de acuerdo al estándar americano se clasifican en:

1.3.3.1. Estándar IEEE 1159-1995

Este estándar define siete categorías de varios fenómenos electromagnéticos que se originan en las redes eléctricas y afecta la operación de sistema eléctrico.

1.3.3.1.1. Fenómenos Transitivos

Son cambios súbitos de voltaje o corriente cuya duración es la corta aproximadamente menor de medio ciclo.

1.3.3.1.1.1. Transitorios Impulsivos

Es un cambio repentino de voltaje, corriente o ambas de gran de magnitud pero sin cambiar la polaridad en condiciones de estado estable, además de no afectar la frecuencia fundamental, se origina por descargas atmosféricas. [10]

La figura 1.8 muestra un transitorio impulsivo, estos se caracterizan por los siguientes parámetros.

- Tiempo de crecimiento de 12 [*us*], es el tiempo que tarda la onda en ir desde el valor de origen hasta el valor máximo de cresta.
- Tiempo de decaimiento de 50 [*us*], tiempo que tarda la onda en decaer desde el valor máximo hasta el 50% de su valor máximo.
- Valor Cresta, es el valor máximo que alcanza la onda.

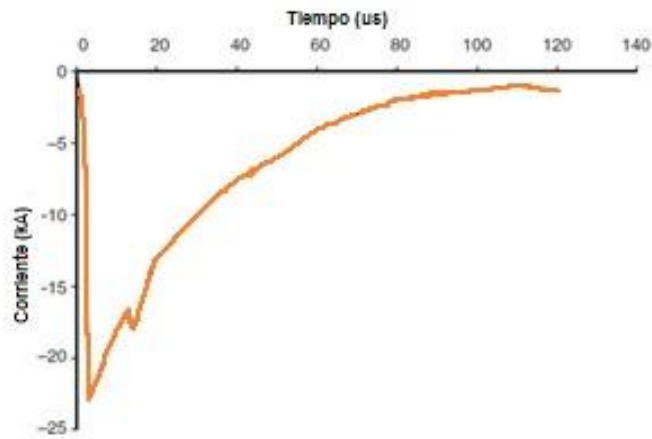


Figura 1.8. Transitorio Impulsivo. [10]

1.3.3.1.1.2. Transitorios Oscilatorios

Son cambios bruscos de voltaje, corriente o ambas con un cambio en la polaridad de la onda, se describe por la duración y la magnitud como se muestra en la figura 1.9 además estos cambios se atenúan rápidamente y vuelve a un punto de estabilidad. [12]

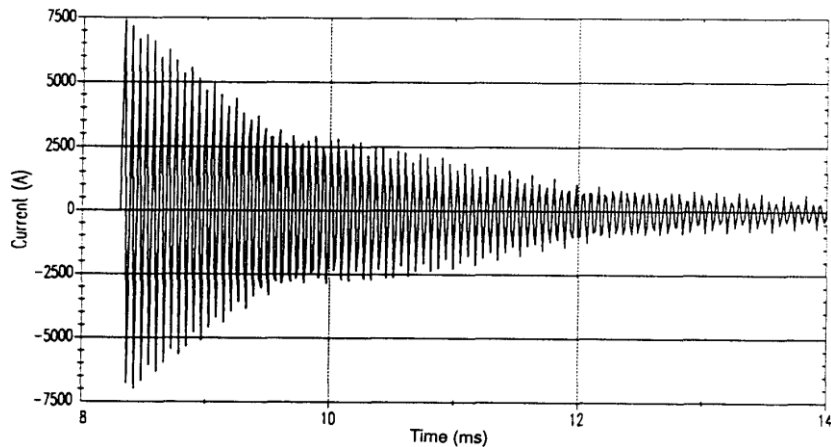


Figura 1.9. Transitorio Oscilatorio. [10]

Se caracterizan por:

- Tiempo de crecimiento (t_r), tiempo que tarda en ir desde el 10% al 90% del valor estacionario.
- Tiempo de retardo (t_d), tiempo que tarda en ir de 0 al 50% de la onda.
- Tiempo de delay (t_s), Tiempo que tarda la onda en establecerse dentro de una banda.

- Sobre paso máximo (S_p), es el valor máximo que llega la onda comparado con el valor máximo en estado estable.

Los efectos de estos transitorios son sobrecorrientes, perforación en el aislamiento, daños en los equipos electrónicos, conductores y bobinas, dependiendo la frecuencia en la que aparezcan se pueden dividir en:

- Baja Frecuencia, está en frecuencias menores a 5000 [Hz], son causados por energización de transformadores o capacitores, cuando existe ferro resonancia.
- Media Frecuencia, está en frecuencias de entre 5 [kHz] hasta 500 [kHz] y son causados por conexiones back to back de los capacitores.
- Alta Frecuencia, esta entre frecuencias entre 500 [kHz] hasta 5 [MHz], son causadas por maniobras en el sistema.

Los transitorios se pueden medir incluyendo o no la onda de la frecuencia fundamental.

1.3.3.1.2. *Variación de Voltaje de Corta Duración*

Se caracterizan por estar entre medio ciclo y un minuto, son causados por estar en condiciones de falla las cuales pueden estar cerca o alejadas del nodo de interés, la desconexión de grandes cargas, conexión de un banco de capacitores y cambios positivos de ULT. [10]

Los efectos que tiene son:

- Daño a sistemas microprocesados.
- Variación del torque y la velocidad en máquinas rotativas.

Las variaciones de corta duración se clasifican en:

- Instantáneas van desde medio ciclo hasta los 30 ciclos.
- Momentáneas están entre los 30 ciclos hasta los 3 segundos.
- Temporales están entre 3 segundos hasta 1 minuto.

1.3.3.1.2.1. *SAG*

Es una disminución en la amplitud o el valor rms del voltaje para posteriormente regresar a su valor inicial, el voltaje tiene una disminución entre el 10 y 90 %, no existe cambio ni de

la frecuencia ni la forma de onda, son causadas por la conexión de cargas pesadas o arranque de grandes motores, dependiendo de la duración de la misma puede dividirse en instantánea, momentánea y temporales.

1.3.3.1.2.2. *SWEEL*

Es el aumento de la amplitud rms del voltaje o corriente entre el 10 al 80 % en periodos desde 0.5 ciclos a 1 minuto, no afecta la frecuencia ni la forma de onda y posteriormente regresa al voltaje nominal, al igual que los SAGs estos fenómenos son causados por falla en el sistema, se debe a la falla de línea a tierra, se caracterizan por la magnitud y duración.

1.3.3.1.2.3. *Interrupción Breve*

Se considera interrupción cuando la amplitud rms de voltaje o de corriente desaparece en más del 90 % de la onda durante un tiempo menor a 1 minuto, son resultado de fallas en los equipos o en el control, se miden por la duración y la magnitud, no existe cambio en la frecuencia y posteriormente regresa a su valor nominal.

Cuando las fallas se producen en el sistema de generación pueden causar caídas de voltaje, se produce cuando actúa el sistema de protección, la duración de estas interrupciones dependen de la capacidad de reconexión del sistema, el tiempo de reconexión superior a 30 ciclos puede ocasionar interrupciones momentánea o temporales.
[10]

La figura 1.10 muestra las variaciones de voltaje de corta duración en una onda sinusoidal de pico igual a 100 V.

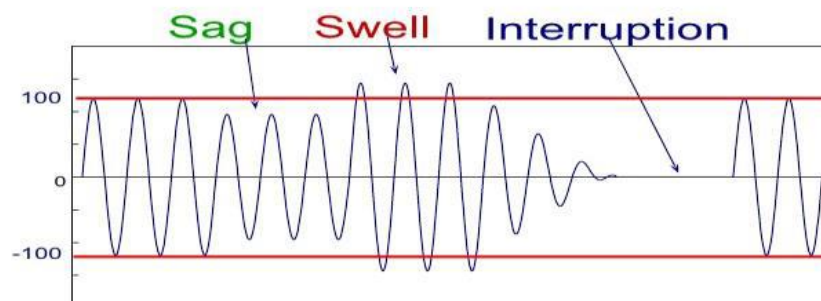


Figura 1.10. Variación de Voltaje de Corta Duración [23]

1.3.3.1.3. Variación de Voltaje de Larga Duración.

Se caracterizan por tener una duración mayor a 1 minuto, son causados por la desconexión de grandes cargas, conexión de banco de capacitores, ubicar en cero los taps de transformadores hacia una posición superior.

Los efectos que causan en los equipos son:

- Cambio de velocidad y torque de máquinas rotativas.
- Daño en el equipo electrónico.

Los efectos que causa en el sistema eléctrico son:

- Apagado de Cargas
- Apagado de equipos electrónicos.
- Desconexión del sistema.

Dependiendo la causa de las variaciones de larga duración, las variaciones pueden ser tanto sobre voltajes como bajos voltajes. [10]

1.3.3.1.3.1. Bajo Voltaje

Es la disminución de la amplitud del valor rms del voltaje entre el 10 o 20 %, no cambia ni la frecuencia ni la forma de onda para posteriormente recuperar el valor nominal, son causadas por la conexión de grandes cargas, el pagado del banco de capacitores, circuitos sobrecargados. [10]

1.3.3.1.3.2. Sobre voltaje

Es un aumento del valor *rms* del voltaje entre el 10 % y el 20 %, no afecta la forma de onda ni la frecuencia, se debe a la mala configuración de las tomas de un transformador, encendido de un banco de capacitores, desconexión de una carga grande.

1.3.3.1.3.3. Interrupción Sostenida

Son las desapariciones del voltaje en un tiempo mayor a 1 minuto, por lo regular son de naturaleza permanente por lo que es necesario la intervención del factor humano para realizar una reconexión, se caracteriza por la variación del voltaje y tiempo. [10]

1.3.3.1.4. Desbalance de Voltaje

Es aplicado a sistemas trifásicos, las 3 fases tienen las mismas magnitudes pero el ángulo tiene un desfase de 120 grados, se caracteriza por la variación de voltaje y tiempo, es la relación entre la secuencia negativa o cero y la componente positiva.

$$\Delta V = \frac{V^{(-)}}{V^{(+)}} \cdot 100\% = \frac{V^{(0)}}{V^{(+)}} \cdot 100\% \quad (1.14)$$

El desbalance se estima como la desviación promedio máxima del voltaje o corriente, para determinar el desbalance de voltaje se utiliza la siguiente ecuación.

$$\Delta V = \frac{\text{Maxima desviacion de cualquier fase / Voltaje promedio}}{\text{Voltaje promedio de 3 fases}} \quad (1.15)$$

El voltaje de desbalance de acuerdo a normas es 2 % para el estándar Europeo y 3 % para el americano, si son desbalances críticos causan el efecto de fase única, son causados por la mala distribución de las cargas entre las fases del alimentador o la mala transposición de líneas aéreas de alto voltaje.

Para observar el desbalance de voltaje que existe se toma dos formas de onda y se las compara, en la figura 1.11 se observa este desbalance considerando la señal de voltaje V1 como referencia.

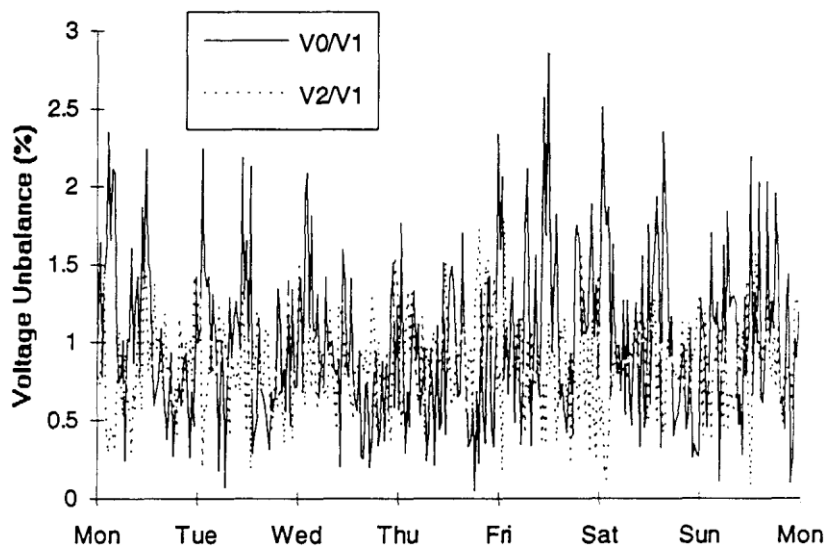


Figura 1.11. Medición de Voltaje Desbalanceado [10].

Los efectos que causa son:

- Sobrecalentamiento de motores.
- Sobrecalentamiento de generadores.

- En rectificadores de potencia puede causar rizado en el lado de continua, produce armónicos triple en el lado de alto.
- Anomalías en los bancos de capacitores.

1.3.3.1.5. *Deformación de la onda*

Es una desviación de la forma de onda de estado estable

1.3.3.1.5.1. *Armónicos*

Los armónicos son formas de ondas sinusoidales de voltaje y de corriente de frecuencias de múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema ya sea 50 o 60 [Hz], las formas de onda distorsionadas son resultado de la suma de la onda fundamental y los armónicos existentes [10], la frecuencia armónica se calcula con la ecuación 1.16, a los armónicos se los caracteriza por la amplitud de la señal y el orden que es la referencia con la frecuencia fundamental. [7]

$$f_h = h \cdot f \quad (1.16)$$

Donde:

f_h = Frecuencia Armónica.

h = Grado del Armónico.

f = Frecuencia del Sistema.

Los efectos que causan los armónicos son:

- Pérdidas innecesarias en el sistema eléctrico.
- Aumento de temperatura en bobinados
- Equipos con estructura de cruce por cero.
- Fallo en protecciones.
- Sobrecarga en el neutro.

1.3.3.1.5.2. *Interarmónico*

Son señales de voltaje y corriente de frecuencia múltiplos no entero de la fundamental que suman a la onda principal de voltaje y corriente, la distorsión causa trabajo no útil y pérdidas de potencia y energía.

Las fuentes de inter armónicos son cargas como hornos de arco, convertidores de potencia y el arranque de motores, los efectos son:

- Calentamiento y pérdidas en transformadores y bobinados.
- Causa fluctuaciones de voltaje.

Los efectos tanto de los armónicos y de los inter armónicos.

- De corto plazo:
 - Apagado de equipos.
 - Mal funcionamiento.
- De Largo Plazo:
 - Pérdidas de vida útil.

1.3.3.1.5.3. *Supra armónicos*

Son señales de voltaje o corrientes de frecuencia muy alta, en el orden de los [kHz], estos armónicos afectan a sistemas de control y telecomunicaciones.

1.3.3.1.5.4. *Subarmónico*

Son ondas de voltaje o corriente que es sub múltiplo de la fundamental.

1.3.3.1.5.5. *Componente DC*

Es un desplazamiento en el eje de las ordenadas de la sinusoidal que se presenta en señales de cortocircuito, son causadas fallas o la energización de capacitores o transformadores, los efectos que causan son:

- Desconexión de equipos.
- Actuación de protecciones.
- Sobre voltaje.

La figura 1.12 muestra la señal continua a la par de la señal en alterna, con esto afecta a los equipos que funcionan con cruce por cero ya que se ve desplazado.

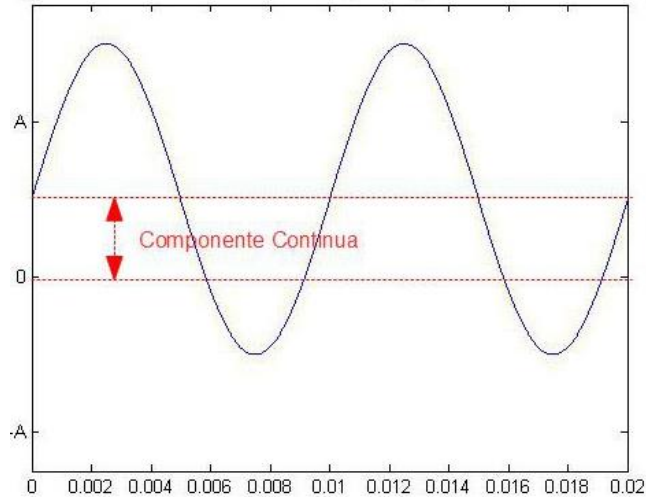


Figura 1.12. Componente DC. [27]

La presencia de corrientes continuas en líneas de corriente alterna puede afectar en la saturación de un transformador, sobre esfuerzo a los aislamientos.

1.3.3.1.5.6. *Ruido*

Es una señal eléctrica de muy alta de frecuencia y de una amplitud muy pequeña aproximadamente al 1 % que se ubica sobre la onda fundamental y la distorsiona, se caracteriza por la frecuencia y magnitud, son causados por dispositivos basados en electrónica de potencia, inter armónicos, horno arco y fluctuaciones voltaje. [10]

Los efectos del ruido son:

- Interferencia en los equipos de telecomunicaciones y de control.
- Problema en los equipos eléctricos.

1.3.3.1.5.7. *Notches de Voltaje*

Es una protuberancia de pequeña magnitud ya sea dentro o fuera de la forma de onda cuya duración es menor a medio ciclo. [15]. La figura 1.13 representa los notches que aparecen en una señal de voltaje.

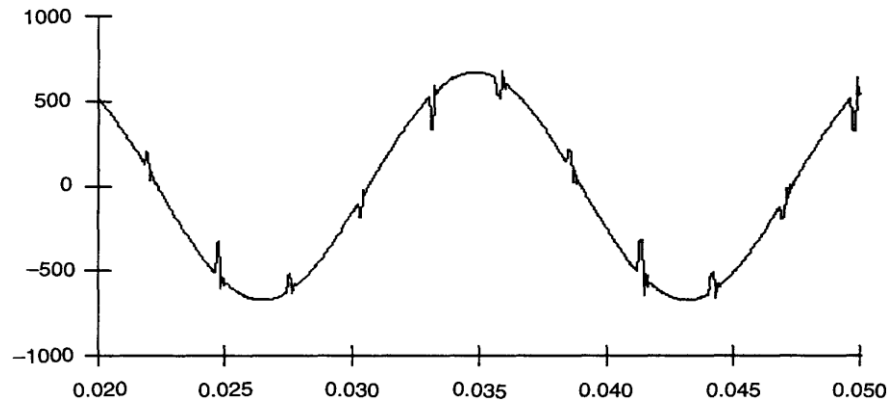


Figura 1.13. Notches de Voltaje. [10]

Se producen en estado estable, se caracteriza a través del espectro armónico del voltaje afectado, son causados por micro cortocircuitos durante la conmutación y afecta a los sistemas microprocesados. [10]

1.3.3.1.6. Fluctuación de Voltaje

Son cambios en la amplitud de voltaje entre más o menos el 10 % como se muestra en la figura 1.14, es un fenómeno de larga duración que se origina por hornos de arco, solda de arco, forjadoras, causa flicker en lámparas incandescentes, ruido audible en máquinas rotativas, pueden generar inter armónicos.

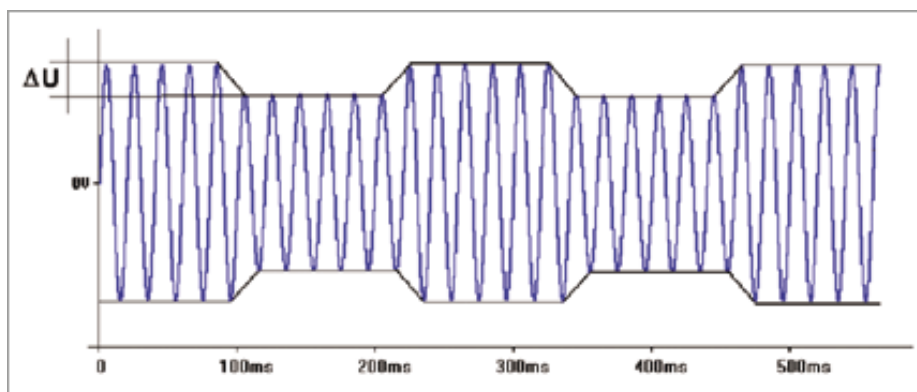


Figura 1.14. Fluctuación de Voltaje [24]

1.3.3.1.7. Variación de Frecuencia.

Es un cambio en la frecuencia fuera de su valor nominal provocado por los desbalances momentáneos o instantáneos entre eléctrica y mecánica, son causados por el disparo o salida de generadores donde la potencia mecánica es menor a la eléctrica, la pérdida de carga donde la potencia eléctrica es menor a la mecánica, para solucionar esto se utilizan sistemas de alivio de carga, los efectos son:

- Desconexión de carga.
- Afecta a las máquinas electrónicas.
- Amortiguamiento de carga.

La frecuencia está relacionada con la velocidad de rotación de los generadores conectados al sistema.

El nivel de perturbaciones que tenga la señal está relacionada con el número de frecuencias armónicas que las conforma, mientras mayor sea el número la onda va perdiendo su forma sinusoidal, como lo muestra la figura 1.15 la forma de onda con armónicos se va convirtiendo en una señal cuadrada.

Este tipo de forma resultante se debe a la gran presencia de armónicos en la señal original causando problemas a los equipos eléctricos.

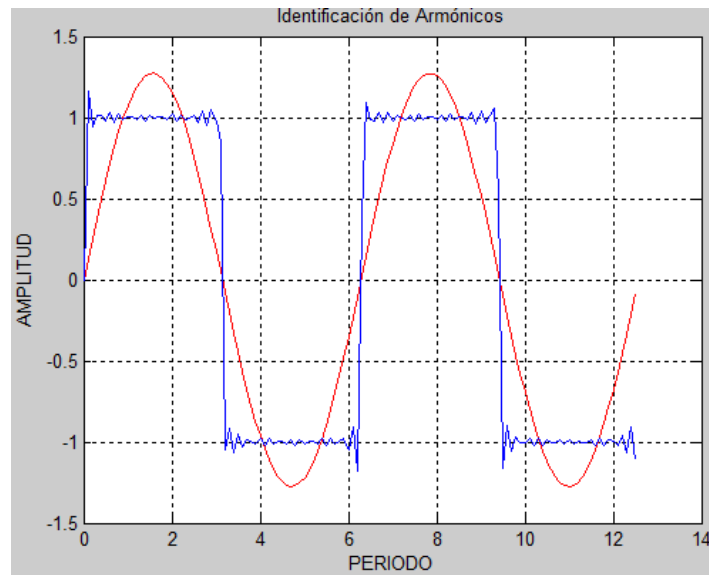


Figura 1.15. Distorsión de onda de voltaje [27]

En las figuras 1.16 y 1.17 se observa las ondas sinusoidales puras, adicionalmente la señal armónico y finalmente la señal de voltaje resultante, se observa como resulta la onda con la influencia del armónico de tercer y quinto orden.

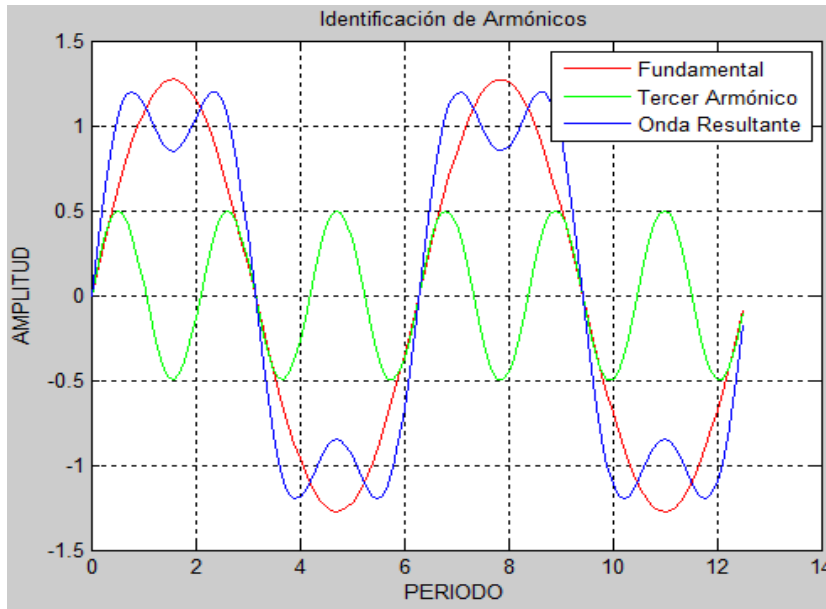


Figura 1.16. Análisis del armónico de orden 3 [27]

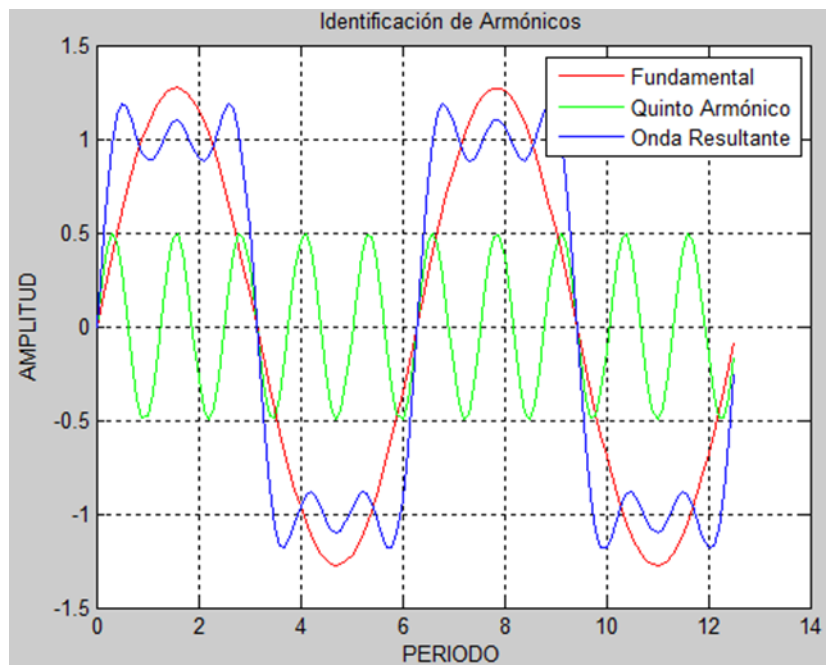


Figura 1.17. Análisis del armónico de orden 5 [27]

1.3.4. MÉTODOS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

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

- Preventiva, evita la generación de armónicos.

- Curativa, filtrar los armónicos existentes.
- Paliativos, Sobredimensionamiento de equipos que soporten mejor los armónicos.

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

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

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

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

1.3.4.1. Transformadores en Delta.

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

La conexión delta de los transformadores proporciona un camino para atraer al armónico tercero y sus múltiplos para encerrarlos en el bobinado y evitar que los armónicos fluyan a la fase y así no interfiera con la forma de onda sinusoidal de voltaje para proteger al

transformador de sobreesfuerzos a plena carga, la principal desventaja de este método es que no protege a ningún equipo como transformadores, carga, líneas o acometidas.

1.3.4.2. Transformadores con Diferentes Tipos de Conexión.

Se utiliza en presencia de cargas idénticas en diferentes transformadores, se aplica en industrias con grandes cargas como fundidoras u hornos de arco.

Este método consiste en utilizar un transformador para abastecer a cargas idénticas con grupo de conexión de que anulan geoméricamente las corrientes de armónicos más altos, una limitación de este método es que proteger únicamente a una fase.

1.3.4.3. Transformadores derivadores o en Zigzag.

Este método deriva las corrientes de secuencia cero, el transformador en zigzag no aumenta ni disminuye el voltaje solo funciona como trampa de armónicos, se conecta en un tablero, los armónicos se encuentran en un camino de baja impedancia donde se quedan encerrados los armónicos incluyendo el neutro evitando que la red se contamine, protege al transformador y a la acometida, estos transformadores utilizan protección a puesta a tierra, son tres relés de sobrecorriente que se conectan a los transformadores de corriente ubicados en la fase primaria. [8]

1.3.4.4. Inductancias de Choque o de Aislamiento.

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

- Inductancia de Línea.

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

- Inductancia de Carga.

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

1.3.4.5. Aumento del número de pulsos de convertidores.

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

1.3.4.6. Aumento del Calibre del Neutro.

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

1.3.4.7. Desclasificación de Transformadores.

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

1.3.4.8. Uso de Transformadores con Factor K.

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

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

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

El factor k es un parámetro que indica la capacidad de un transformador para soportar cargas no lineales y evitar el sobrecalentamiento del equipo, el factor k es un valor definido por el tipo de carga que está conectada, la tabla 1.1 resume el factor k para transformadores de distribución.

Tabla 1.1. Factor k para transformadores de distribución.

Tipo de Carga	Factor K
Lámparas incandescentes, transformadores de control, motores, dispositivos electromagnéticos de control.	1
Lámparas de descarga, equipos de calentamiento de inducción, máquinas de suelda, PLC, controladores de estado sólido.	4
Equipos de Telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	13

Unidades de estado sólido para motores, circuitos de alimentación, variadores de frecuencia.	20
Conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, médicos, circuitos industriales y laboratorios institucionales.	30
Cargas identificadas como productoras de gran cantidad de armónicos.	40

Según el tipo de consumidores se instala diferentes equipos eléctricos por lo tanto cada uno de ellos genera un tipo de armónico a la red, por lo tanto para evitar los efectos causados por los armónicos se utilizan los transformadores con factor k, para la implementación de estos transformadores se considera si comienza a aparecer los efectos sobre el sistema además considerar si se tienen cargas como las que indica la tabla 1.1.

Los transformadores con factor k permiten controlar las cargas excedentes causadas por los armónicos de corriente, la tabla 1.2 indica el porcentaje de carga tolerada cuando se utiliza transformadores con factor k.

Tabla 1.2. Cargas con factor k

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

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

$$Factor\ k = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2 \quad (1.17)$$

Donde:

I_h = Corriente armónica de orden h en por unidad

h = Orden de la componente armónica.

1.3.4.9. Filtros

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

1.3.4.9.1. Activos

Son fuentes de voltaje o corriente compuestos por elementos activos como puente de rectificadores con semiconductores conectados en serie para fuentes de voltaje o en paralelo para fuentes de corriente, el ancho de banda varía dependiendo el resultado del monitoreo en tiempo real, se utilizan en amplificadores operacionales debido a que eliminan las inductancias y reducen el tamaño del circuito al igual que la inversión.

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

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

Desventajas:

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

1.3.4.9.2. Pasivos

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

frecuencia a la cual la resonancia sea la frecuencia a la cual se espera el cortocircuito, son más utilizados a nivel industrial

Las ventajas de estos filtros son:

- Filtros económicos
- Soportan altas corrientes y potencias

Desventajas:

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

1.3.4.9.3. Pasa Banda

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

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

1.3.4.9.4. Sintonizados

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

Características.

- Eliminación de armónicos definidos.
- El filtro se sintoniza a la frecuencia que se desea eliminar.
- La impedancia del filtro es mínima.
- Son utilizados en rectificadores, inversores PWM y en casos específicos para fuentes de armónicos como hornos de arco.

Ventajas

- Ofrece una mayor atenuación a los armónicos individuales.

- Bajas pérdidas respecto a la resistencia del inductor.
- Cuando se opera a la frecuencia individual puede proporcionar potencia reactiva al sistema.

Desventajas

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

1.3.4.9.5. Amortiguadores.

Este tipo de filtros tienen las siguientes ventajas:

- Poco sensible a los cambios de temperatura, desviación de la frecuencia y tolerancia de los componentes que tiene el filtro.
- Baja impedancia para el espectro de frecuencia.
- Mejor que los filtros sintonizantes en condiciones de resonancia paralelo a bajas frecuencias.

Desventajas:

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

1.3.4.9.6. Potencia

Son diseñados para reducir los armónicos en redes eléctricas de distribución, debido al aumento de cargas no lineales en redes de alimentación estos filtros son los adecuados para reducir la distorsión de las señales de corriente en las redes de baja tensión. En la figura 1.18 se observa un esquema de la instalación de un filtro activo de potencia en una red trifásica.

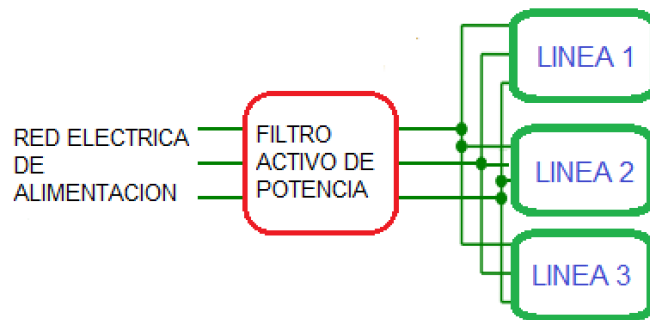


Figura 1.18. Filtro Activo de Potencia. [27]

Las funciones que realizan los filtros activos de potencias son:

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

1.3.5. MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Es un algoritmo inspirado en inteligencia artificial que analiza el comportamiento social de los seres vivos y su evolución en el comportamiento colectivo de grupo de animales como manadas, cardúmenes, etc. [3] Son algoritmos meta heurísticos que tiene como finalidad localizar valores máximos y mínimos globales debido a que para resolver un problema lo hacen con analogías de otros procesos garantizando un resultado aceptable, este tipo de algoritmos no son deterministas es decir que los resultados obtenidos no serán iguales aun si se aplica la misma función. Este tipo de algoritmos genéricos ofrecen un resultado aproximado del 99% sin embargo el algoritmo de enjambre de partículas es más eficiente debido a que no requiere de muchos recursos. [4]

1.3.5.1. Estructura.

Los componentes que utiliza el algoritmo PSO son:

- e. Componente Cognitiva

Constituye que la partícula tenga memoria de una posición anterior y una nueva que sea optimizada es decir mejor, es la responsable que la partícula tienda a moverse a la posición

en la que este los mejores resultados, este coeficiente C_1 está en el rango [0,2], el coeficiente r_1 tiene valores aleatorios entre 0 y 1. [9]

b. Componente Social

Es el encargado de que la partícula tienda a moverse hasta la mejor posición encontrada por el algoritmo, el valor del coeficiente C_2 puede estar entre 0 y 2 siendo 2 el más recomendado, r_2 es un vector que esta entre 0 y 1 que aporta un comportamiento estocástico a las partículas.

La magnitud relativa entre la cognitiva y social regula la localización de resultados del algoritmo así:

- Si $C_1 > C_2$ implica mayor exploración del algoritmo y más lentitud en la convergencia.
- Si $C_1 < C_2$ implica que se reduce el tiempo de convergencia.

Los coeficientes r_1 y r_2 son valores aleatorios que se multiplican en la ecuación, esto puede causar variaciones en el algoritmo pero en ciertas ocasiones ayudan en la convergencia.

c. Inercia

Es un factor que ayuda a mejorar la estabilidad de la ecuación y permite que la partícula mantenga su trayectoria, es el responsable que la partícula este en movimiento, el valor recomendado para el coeficiente de inercia esta entre 0.8 y 1.2, si es mayor a 1 implica que la partícula va aumentando su velocidad conforme las iteraciones van aumentando, en caso que la inercia sea menor a 1 la partícula va desacelerando. [9]

La inercia modulada actúa de forma similar al factor de constricción, comienza con una inercia alta para continuar disminuyendo dependiendo el paso del tiempo, este factor genera mejores resultados que estar con inercia constante. [20]

Para calcular la nueva velocidad se utiliza la ecuación 1.18:

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + C_1 r_1 [\hat{x}_i(t) - x_i(t)] + C_2 r_2 [g(t) - x_i(t)] \quad (1.18)$$

Donde:

$v_i(t)$ =Velocidad de la partícula i en el tiempo t es decir velocidad actual.

$v_i(t + 1)$ =Velocidad de la partícula i, velocidad nueva.

i = Índice de la partícula.

C_1 = Coeficiente Cognitiva.

C_2 = Coeficiente Social.

$\hat{x}_i(t)$ = Mejor Posición de la Partícula.

$x_i(t)$ = Posición de la Partícula.

$g(t)$ = Posición de todo el enjambre.

w = Inercia.

d. Factor de Constricción

Es un valor variable que permite un equilibrio entre las búsquedas locales y globales, si este valor es menor a 4 implicaría que la convergencia sea lenta y si es mayor la convergencia será rápida.

1.3.5.2. Algoritmo

Los métodos heurísticos pueden estructurarse de diferentes formas, el algoritmo enjambre de partículas tiene cumple los siguientes pasos [9]:

1. Crear el enjambre base con un número n de partículas aleatorias, cada partícula debe considerar una posición determinada por valores de una variable, una velocidad que indica hacia donde se desplaza, la posición en la que se encuentra la partícula y el registro de la mejor posición en la que se encuentra la partícula.
2. Evaluación de las partículas.
3. Actualización de posición y velocidad de las partículas.
4. Repetir desde el paso 2 si no se cumple las condiciones.

Etapas del algoritmo:

a. Crear Partícula

Establecer la posición, velocidad y valor inicial que se van a definir a las partículas además de almacenar nuevos valores de posición, los valores iniciales de posición y velocidad son generalmente cero, las demás variables van tomando valores según la evolución de la partícula.

b. Evaluar Partícula

Consiste en calcular el valor de la función con el fin de ir optimizando resultados, cada partícula debe almacenar el mejor valor que ha encontrado debido a que es capaz de

identificar si una nueva posición es mejor que la anterior dependiendo si la función desea identificar valores máximos o mínimos.

c. Mover Partícula.

Para que las partículas se muevan es necesario que su velocidad y posición se actualice.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (1.18)$$

Un problema que puede tener el algoritmo de enjambre de partículas es que adquiera velocidades muy altas lo que causa que no converja y la búsqueda se sale de los límites, para solucionar esto se puede:

- Limitar la velocidad máxima se consigue aplicando la ecuación 1.20 que puede alcanzar la partícula, estableciéndolos límites de búsqueda de la partícula $[[x_{min}, x_{max}]$ el valor k se establece entre 0 y 1.[9]

$$v_{max} = \frac{k(x_{max} - x_{min})}{2} \quad (1.20)$$

- Reiniciar el valor de la velocidad si se exceden los límites.
- Reducir el valor de la inercia a medida que aumenta las iteraciones.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla la investigación del modelo de optimización por enjambre de partículas y su aplicación al sistema eléctrico de distribución, además de la recopilación de información obtenida de las mediciones en los alimentados urbanos y rurales que realiza periódicamente la Empresa Eléctrica Ambato con el fin de analizar la información de los armónicos de voltaje que han sido identificados en los años 2018 y 2019, estos valores son los utilizados para el análisis de los alimentadores y la localización de valores armónicos de voltaje que superen el límite de pérdidas permitidas para el sistema de distribución, estos límites fueron establecidos por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ex ARCONEL)

Según los niveles de perturbaciones que registran los diferentes alimentadores facilita la identificación de valores críticos en el sistema eléctrico de distribución que causan inestabilidad a la red por lo que se busca proponer alternativas que no perjudiquen la calidad del producto.

La elaboración de este proyecto está dividido en diferentes fases en las que se detalla el progreso del análisis de datos y la obtención de resultados para culminar con la recopilación

de información en la escritura del documento en la que se detalla toda la información recopilada además de los resultados obtenidos:

a. Obtención de Información

Solicitar la información de las mediciones realizadas de armónicos de voltaje en los alimentadores de la zona de cobertura, las cuales tienen especificados valores útiles para la elaboración de índices de calidad del producto.

La base de datos incluye varios parámetros útiles para detallar el servicio que ofrece la empresa de distribución en los que resaltamos los siguientes (V_{rms} , V_{thd} , I_{rms} , PF , V_h) todos estos parámetros son tomados en cada alimentador en las fases 1 y 2.

b. Manejo de Datos

La base de datos disponible cuenta con las mediciones realizadas en intervalos de 10 minutos durante 7 días seguidos, las mediciones de armónicos de voltaje son realizadas en las fases 1 y 2 de cada alimentador, el análisis se realiza en mediciones bifásicas debido a que las mediciones trifásicas no se realizaron en todos los alimentadores, las mediciones detallan el orden del armónico desde el 2do hasta el número 50. En el software Python se filtran el orden de la frecuencia que tenga el valor de las mediciones diferentes de cero con la finalidad de utilizar únicamente los valores útiles para el proceso sin desperdiciar recursos del análisis.

El formato .csv conocido como valores separados por comas permite el registro, almacenamiento y análisis de grandes cantidades de datos, los datos serán almacenados en la base de datos del programa. La tabla 2.1 muestra el formato en el que se realiza las mediciones en los alimentadores, cada instrumento de medio obtiene sus propias bases de datos.

Tabla 2.1. Datos de las mediciones

Fecha de la M	Hora de la M	Vrms Linea1	Vrms Linea2	Vthd Linea1	Vthd Linea2	Pst Linea1	Pst Linea2	Arms Linea1	Arms Linea2	W Linea1	W Linea2
20/04/2018	14:50:00	118,2	118,7	1,4	1,4	0,52	0,53	45	12,8	4607,38	434,83
20/04/2018	15:00:00	118,4	118,9	1,4	1,4	0,39	0,4	39,3	12,5	4050,6	701,77
20/04/2018	15:10:00	118,4	119,1	1,4	1,4	0,3	0,3	42,9	12,2	4375,23	746,13
20/04/2018	15:20:00	118,1	118,8	1,4	1,4	0,5	0,5	48,6	11,5	4780,91	347,4
20/04/2018	15:30:00	118,2	118,7	1,4	1,4	0,48	0,5	43,6	11,6	4317,19	215,11
20/04/2018	15:40:00	118	118,9	1,3	1,4	0,59	0,6	68,6	11,9	7770,69	210,26
20/04/2018	15:50:00	118,4	119	1,3	1,4	0,55	0,56	42,5	11	4187,23	234,65
20/04/2018	16:00:00	118,5	118,9	1,3	1,4	0,39	0,41	38,1	12,6	3769,35	430,98

c. Investigación del modelo

Investigar en publicaciones o libros acerca del algoritmo de optimización por enjambre de partículas además de consultar en manuales las herramientas y componentes de Python.

El modelo será implementado en Python por lo tanto se debe instalar todas las librerías y componentes dependiendo la versión en la que se vaya a trabajar para el manejo de datos, realizar gráficas y para la implementación de una interfaz.

Manejar la base de datos con las herramientas de Python permite vincular la información de las mediciones al algoritmo de optimización a una programación que permita localizar los valores máximos de armónicos de voltaje de cada alimentador.

d. Implementación y Prueba

La programación en Python debe identificar el alimentador seleccionado por el usuario y cargar la información del voltaje V_{rms} y los armónicos de voltaje de las fases 1 y 2 para el análisis del armónico mayor y de los límites establecidos por la regulación.

El usuario debe establecer los parámetros iniciales del algoritmo PSO para interactuar con el tiempo que tarda en localizar los valores máximos además de poder visualizar los resultados obtenidos.

Comparar las diferentes graficas obtenidas para identificar valores que puedan ser incongruente y solucionarlos, con el procedimiento de prueba y error se puede mejorar los resultados finales.

e. Validación de Resultados.

Los resultados obtenidos de los análisis de alimentadores indican la presencia de armónicos de voltaje en cada fase, con esto se busca identificar cuales alimentadores deben ser considerados para aplicar alternativas que permitan reducir los efectos causados por las perturbaciones.

2.1. MANEJO DE INFORMACIÓN

La empresa Eléctrica Ambato realiza periódicamente mediciones de diferentes parámetros, todas estas mediciones son registradas en distintas bases de datos, esta información se la utiliza para tener en constancia la energía distribuida, comercializada y las interrupciones del sistema eléctrico. La información que involucra interrupciones o pérdidas en el sistema eléctrico de distribución son las utilizadas para la elaboración de índices de calidad del servicio de acuerdo a las regulaciones.

La base de datos tomada de las mediciones realizadas durante dos años a alimentadores a lo largo de la zona de cobertura en las que destaca los armónicos de voltaje son utilizadas para realizar los índices de calidad de producto, esta información es la que se necesita para el análisis en este proyecto por lo que es necesario solicitar la estos datos al departamento encargado de realizar los informes de calidad, Python maneja para la elaboración del proyecto en donde permite analizar la base de datos, Python permite trabajar con cadenas de texto, números, variables, estructuras de control, sentencias condicionales o iteraciones.

El manejo de la base de datos se realiza con la ayuda de programas como Excel que permiten trabajar los datos en formato .csv, el proceso de análisis comienza desde la lectura de los archivos de mediciones de armónicos de voltaje hasta mostrar los resultados de los alimentadores, mediante la programación se realiza la importación de la base de datos y el manejo de esta información tanto para filtrar los datos más relevantes para facilitar el análisis de datos, en la figura 2.1 está el diagrama de flujo que indica todo el proceso que se va a realizar.

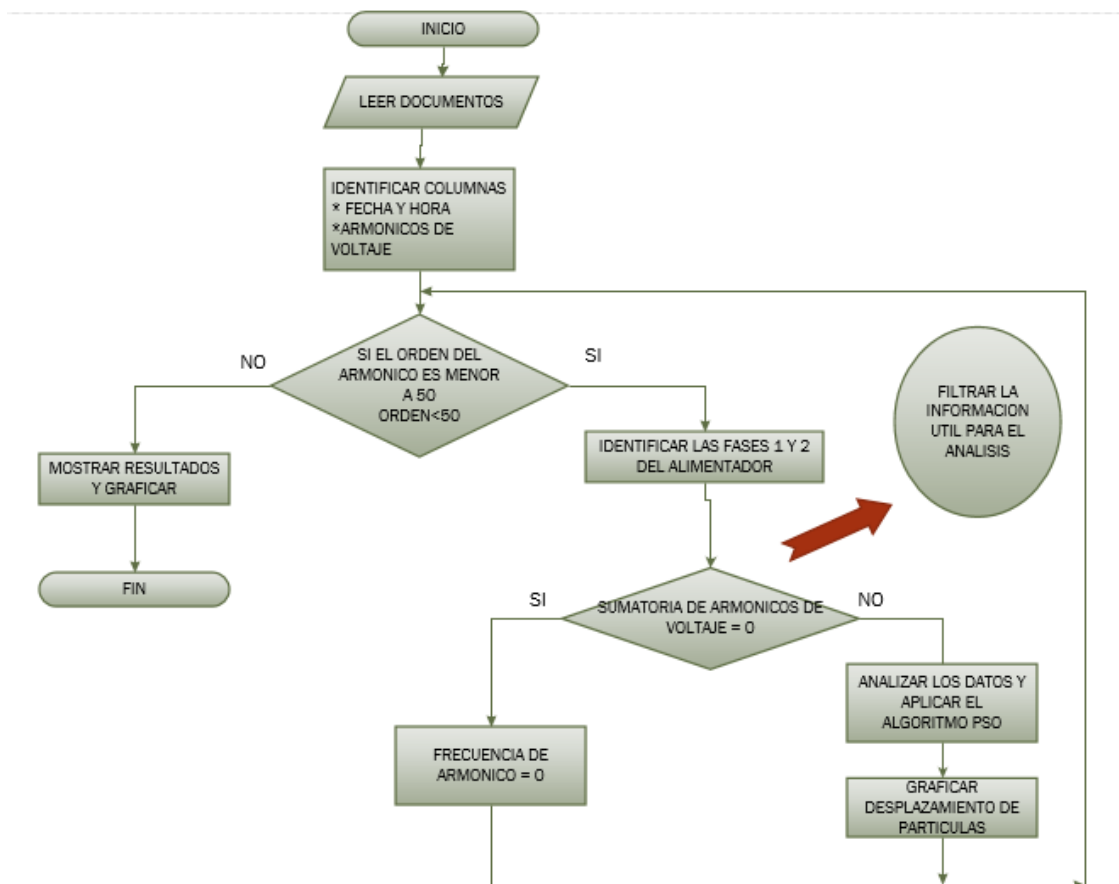


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de análisis. [27]

Los medidores especiales utilizados por la empresa Eléctrica para la recopilación de información de los alimentadores disponen de diferentes tipos de datos, la información en *p. u.* de los alimentadores no se utiliza en este proyecto ya que el tipo de datos en necesario una conversión previa para adecuar al análisis y al no ser valores constantes requiere un estudio innecesario debido a que otro medidor directamente obtiene los datos a utilizar.

En el proceso de filtración de información útil se revisa previamente la base de datos disponible para verificar que datos tiene recopilado, las mediciones tomadas a los alimentadores son realizadas en dos fases además que las frecuencias armónicas de orden par son cero por lo tanto se desprecian para no desperdiciar recurso en el análisis de datos nulos.

Las herramientas de programación que son utilizadas para la lectura de datos, el desarrollo del análisis de la base de datos, mostrar los resultados obtenidos además de la elaboración de la interfaz que permita al usuario manejar el programa con mayor facilidad, las librerías básicas utilizadas son:

- a. Para Visualización
 - i. Matplotlib

Es una librería que genera graficas de gran calidad a partir de datos ubicados en matrices, vectores y listas, la figura 2.2 es el logo de esta librería.



Figura 2.2. Logo librería Matplotlib. [25]

Se instala utilizando el comando `import matplotlib.pyplot as plt`, se grafica utilizando la siguiente codificación:

1. `Figure (num, figsize, dpl, facecolor, edgecolor, frameon)`
 - *num*, especifica la numeración de cada figura, si no se detalla la numeración es automática.
 - *figsize*, especifica el tamaño que tiene la gráfica.
 - *dpl*, resolución de la gráfica en puntos por pulgada.
 - *facecolor*, color del fondo del rectángulo de la figura.

- *edgecolor*, color del primero de la gráfica.
- *Frameon*, marco que tiene la gráfica, si el comando es False se elimina.

2. Subplot (*numRows, numCols, plotNum*)

- *numRows*, número de filas.
- *numCols*, número de columnas.
- *plotNum*, número de la figura.

3. Plot (*x, y, linestyle, linewidth, marker*)

- *x*, eje de las abscisas
- *y*, ejes de las ordenadas, estas 2 variables puede ser matrices o listas.
- *linestyle*, color y tipo de elemento para graficar.
- *linewidth*, grosor de la línea.
- *marker*, marcador.

ii. Seaborn

Es una librería desarrollada sobre matplotlib que ofrece graficas de alto nivel a base de estructura de datos de pandas lo que permite el manejo de DataFrame, esta librería tiene como objetivo la exploración y comprensión de datos, en logo de esta librería muestra la figura 2.3.



Figura 2.3. Logo librería Seaborn [25]

Esta librería se importa con el comando *import seaborn as sns*.

Con esta librería se puede realizar:

- Gráficas de dispersión (*from seaborn import implot*)
- Diagramas de densidad (*from seaborn import kdeplot*),
- Histogramas (*from seaborn import distplot*),

- Boxplot (*from seaborn import boxplot*)
- Gráficas tipo violín (*from seaborn import violinplot*).

iii. Bokeh

Es una librería que proporciona de forma elegante y concisa gráficos interactivos de alto rendimiento con datos grandes o de transición, la figura 2.4 indica su logotipo.



Figura 2.4. Logo librería Bokeh [25]

Se importa esta librería utilizando el siguiente código
import bokeh.plotting
import figure

b. Para cálculo numérico y análisis de datos.

i. NumPy

Es un paquete de Python que significa “*Numerical Python*”, se utiliza para la información científica, la figura 2.5 indica su logo, tiene estructuras de datos, implementación de matrices y matrices multidimensionales.



Figura 2.5. Logo librería NumPy [25]

El manejo de matrices de NumPy o conocido como *numpy array* maneja un potente arreglo de matrices de N-dimensiones en los que se almacena varios elementos en espacios de memoria, se importa con *import numpy as np*.

ii. SciPy

Esta librería significa “*Scientific Python*”, está construida a base de numpy, tiene diferente módulos de ciencia e ingeniería por lo que incorpora transformada discreta de Fourier, matrices de optimización y algebra lineal, se importa con *import scipy*, en la figura 2.6 esta su logo.



Figura 2.6. Logo librería SciPy [25]

iii. Pandas

Esta librería es la más utilizada debido al manejo de datos, se identifica con el logo de la figura 2.7



Figura 2.7. Logo librería Pandas [25]

Este paquete de Python es utilizado para manipulación de datos estructurales para realizar operaciones, pandas maneja las siguientes estructuras de datos:

- Series, son arrays unidimensionales con índice o etiquetas que pueden generarse a partir de listas.
- DataFrame son estructuras relacionales con datos SQL similares a tablas.
- Panel, Panel4D y PanelND, son estructuras que trabajan en más de dos dimensiones.

2.2. ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Este algoritmo es un método heurístico de optimización que permite localizar los valores máximos y mínimos globales basándose en función $f(x)$ de una o más variables para optimizar, la función objetivo permite optimizar una variable alpha la cual debe ser mayor a los demás datos, el algoritmo está dividido en diferentes estructuras, en el diagrama de flujo de la figura 2.8 muestra la secuencia de pasos para el correcto funcionamiento del algoritmo por enjambre de partículas.

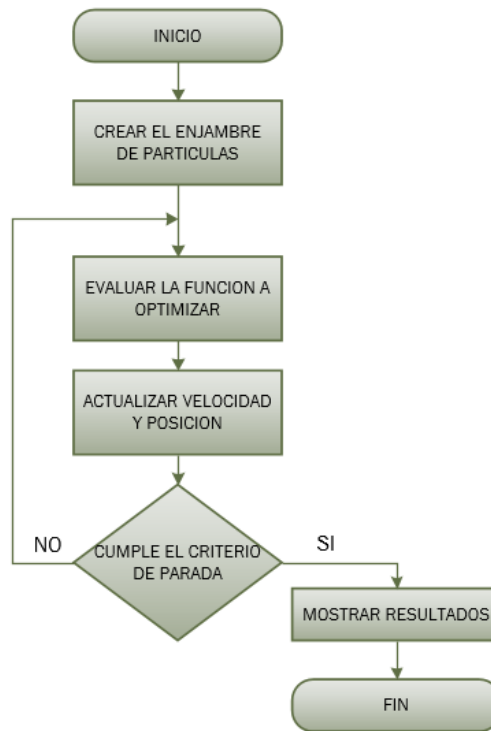


Figura 2.8. Diagrama Algoritmo PSO [27]

a. Crear un enjambre de Partículas

Para la creación del enjambre se establece el número de partículas que incluyen, se define los parámetros de posición y velocidad iniciales de cada partícula normalmente son cero, estos valores van cambiando a medida que se mueven las partículas y localizan la mejor posición, algunos de los parámetros definidos se muestran en la figura 2.9.

```

enjambre = Enjambre(
    n_particulas = 50,
    n_variables = 1,
    limites_inf = [0],
    limites_sup = [1007],
    verbose = False
)
  
```

Figura 2.9. Parámetros para crear partículas [27]

Se establece *n_particulas* al número de partículas que va a conformar el enjambre, *n_variables* a la cantidad de variables que tiene la función que se optimizara para este caso por ser la variable alpha el número de variables es uno, *limites_inf* y *limites_sup* al rango de datos que desea analizar, las mediciones son cada 10 minutos durante 7 días dan un total de 1008 datos.

b. Evaluar Enjambre

Consiste en ir actualizando el valor de *mejor_posición* y *mejor_valor* a medida que las partículas se van moviendo con el aumento del número de iteraciones, en el parámetro optimización se especifica en los códigos si la función va a maximizar o minimizar la búsqueda del mejor valor como muestra la figura 2.10.

```
enjambre.optimizar(  
    funcion_objetivo = armonico,  
    optimizacion     = "maximizar",  
    n_iteraciones    = 50,  
    inercia          = 0.8,  
    peso_cognitivo   = 1,  
    peso_social      = 2,  
    parada_temprana  = True,  
    rondas_parada    = 50,  
    tolerancia_parada = 10**-3,  
    verbose          = False  
)
```

Figura 2.10. Parámetros del algoritmo [27]

En esta etapa se establecen los parámetros que componen el algoritmo, los cuales influyen en la eficiencia del modelo ya que la relación entre el número de iteraciones y el número de partículas es proporcional con el tiempo de análisis del proceso. Al establecer una mayor cantidad de partículas implica que el gasto de mayores recursos, en cambio al considerar menor cantidad de partículas puede aumentar el tiempo de análisis hasta localizar el valor óptimo, el algoritmo además puede tardar mayor tiempo si el usuario establece un número alto de iteraciones por lo que es necesario establecer un parámetro de parada como *tolerancia_parada* que considera si el mejor valor no ha sufrido un cambio considerado de por terminado al proceso.

Los detalles del movimiento de las partículas se indican en la figura 2.11, para el movimiento se considera diferentes factores como la posición y la velocidad actual, los factores de velocidad para la mejora local y global.

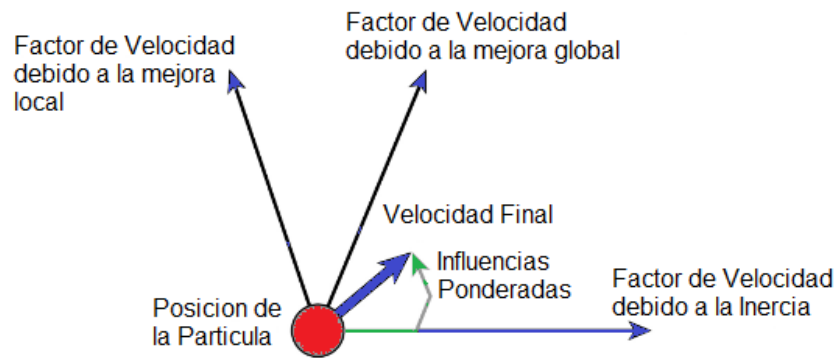


Figura 2.11. Principio algoritmo PSO. [3]

c. Mover el Enjambre

En esta etapa las partículas están en movimiento por lo tanto los valores de posición y velocidad de las partículas se van actualizando, alguno parámetro definido para el funcionamiento del algoritmo se muestran en la figura 2.12.

```
enjambre.mover_enjambre(
    inercia          = 0.8,
    peso_cognitivo   = 2,
    peso_social      = 2,
    verbose          = True
)
```

Figura 2.12. Parámetros mover partículas [27]

Componentes del modelo PSO:

- a. La Inercia es la responsable de mantener el movimiento de las partículas en la dirección que lo han estado haciendo, se lo representa con el signo w y su valor está definido entre 0.8 y 1.2, siendo así:
 - Si $w > 1$ la partícula acelera lo que implica que la zona de exploración es mayor y la convergencia del modelo puede demorar más.
 - Si $w < 1$ la partícula desacelera a medida que las iteraciones aumentan, la zona de exploración es menor y la convergencia es más óptima.
- b. La Componente cognitiva causa que la partícula se mueve a los puntos donde están los mejores resultados en ese momento, se representa con la expresión $C_1 r_1 [\hat{x}_i(t) - x_i(t)]$, el coeficiente cognitivo C_1 se recomienda utilizar el valor 2 y el coeficiente r_1 un valor entre 1 y 0 mejorando la capacidad de evitar los mínimos locales.

- c. La componente social es la responsable de mover a la partícula hasta la mejor posición que se encuentre el enjambre, se lo interpreta como el conocimiento colectivo el coeficiente social C_2 se recomienda el valor 2 y el coeficiente r_2 un vector 0 y 1.

La relación entre las componentes cognitiva y social permite controlar el comportamiento exploratorio de algoritmo PSO lo que implica que si el coeficiente cognitivo es mucho mayor respecto al coeficiente social, el algoritmo necesita mayor tiempo para localizar el valor óptimo.

La programación de algoritmo por enjambre de partículas está diseñado para la optimización en la búsqueda de valores máximos que registre algún alimentador, la función a optimizar, para definir este valor se utiliza la función a optimizar llamada “armónico” como se puede apreciar en la figura 2.13, esta función consiste en comparar la variable alpha con cada valor medido considerando cada valor como una restricción de la variable.

```
def armonico(datos):  
    alpha = 0  
    for i in datos:  
        if i >= alpha:  
            alpha = i  
    return alpha
```

Figura 2.13. Función a optimizar [27]

El movimiento de las partículas está determinado por varios parámetros como la velocidad, posición, aceleración y a medida que se realice el proceso se van actualizando, en la tabla 2.2 muestra el registro de la posición en la que esta las partículas según el número de iteraciones.

Tabla 2.2. Valores de Posición de las Partículas

	iteracion	posicion	x
0	0	[7.966500294796966]	7.966500
1	0	[11.55297063877255]	11.552971
2	0	[1.2022182718181775]	1.202218
3	0	[0.7878554682382501]	0.787855
0	1	[7.966500294796966]	7.966500
1	1	[8.593893757589719]	8.593894
2	1	[4.403941639717239]	4.403942
3	1	[3.050114229960842]	3.050114
0	2	[8.89584562994109]	8.895846
1	2	[6.078678408584311]	6.078678
2	2	[10.533367559387901]	10.533368
3	2	[11.45415625664971]	11.454156
0	3	[9.63932189805639]	9.639322
1	3	[6.518292426845922]	6.518292
2	3	[12.69813004463602]	12.698130

La mejor posición en la que se encuentra la partícula también se considera como el valor máximo del armónico de voltaje, en la figura 2.14 indica el desplazamiento del valor óptimo mientras las partículas están en movimiento, cuando la partícula muestra una variación muy pequeña se utiliza criterios de parada y provoca la detención del análisis.

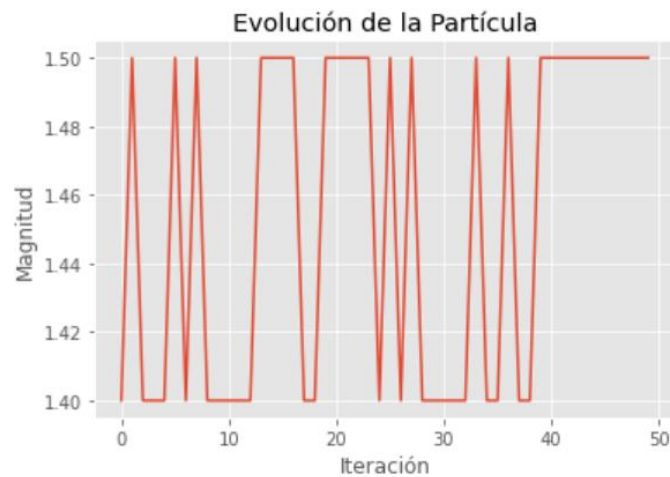


Figura 2.14. Desplazamiento de la Partícula [27]

Los resultados por parte del algoritmo PSO están configurados para mostrar la fecha, el tiempo en el que la función fue analizada, las iteraciones realizadas, la posición óptima de la partícula y el valor del armónico máximo, como se muestra en la figura 2.15.

```

print("-----")
print("Optimización Finalizada " \
      + datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
print("-----")
print("Duración PSO: " + str(end - start))
print(f"Iteraciones Definidas: {n_iteraciones}")
print("Iteraciones Realizadas: " + str(self.iter_optimizacion))
print("Posición óptima: " + str(self.posicion_optima))
print("Armónico Maximo: " + str(self.valor_optimo))
print("")

```

Figura 2.15. Resultado Algoritmo PSO

Los parámetros utilizados como condiciones de estudio se muestran en la tabla 2.3, el algoritmo PSO varía su tiempo de ejecución dependiendo la relación de estos parámetros, mientras aumenta el número de partículas se necesita un menor número de iteración para cumplir la función a optimizar, si el número de iteraciones aumenta implica que los recursos tecnológicos requeridos aumentaría.

Tabla 2.3. Parámetros de Prueba para algoritmo PSO.

Parámetro	Valor (Caso Ejemplo)
Número de Partículas	50
Número de Iteraciones	50
Tolerancia	10^{-3}
Inercia	0.8
Constante Social	2
Constante Cognitiva	1

2.3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Son perturbaciones causadas por las características no lineales de las cargas o equipos que afectan a la frecuencia de la red, los armónicos están formados por frecuencias enteras de múltiplos de la frecuencia del sistema. Las formas de onda de alimentación pueden ser descompuestas en señales de frecuencia fundamental y otras de sus armónicos.

En la tabla 2.4 se indica el formato en el que se realizan las mediciones de voltajes de armónicos, como las perturbaciones en la red son funciones sinusoidales los armónicos de frecuencias de múltiplos pares son idealmente cero por lo que en las mediciones las considera despreciables.

Tabla 2.4. Mediciones de Armónicos

Fecha de la M	Hora de la M	Vh2 Linea1	Vh2 Linea2	Vh3 Linea1	Vh3 Linea2	Vh4 Linea1	Vh4 Linea2	Vh5 Linea1	Vh5 Linea2
20/04/2018	14:50:00	0	0	0.4	0.5	0	0	1	1
20/04/2018	15:00:00	0	0	0.4	0.5	0	0	1	1
20/04/2018	15:10:00	0	0	0.5	0.5	0	0	1	1.1
20/04/2018	15:20:00	0	0	0.5	0.5	0	0	1	1.1
20/04/2018	15:30:00	0	0	0.4	0.5	0	0	1	1.1
20/04/2018	15:40:00	0	0	0.4	0.5	0	0	1	1
20/04/2018	15:50:00	0	0	0.5	0.5	0	0	0.9	1
20/04/2018	16:00:00	0	0	0.4	0.5	0	0	0.9	1
20/04/2018	16:10:00	0	0	0.4	0.5	0	0	1	1
20/04/2018	16:20:00	0	0	0.5	0.5	0	0	1	1
20/04/2018	16:30:00	0	0	0.5	0.5	0	0	0.9	1

El análisis que realiza la programación en Python escoge las mediciones de armónicos de voltaje de frecuencias múltiplos impares, permite identificar si el global de las mediciones de cada frecuencia es diferente de cero para descargar armónicos nulos, para esta parte utilizamos la programación a base de bucles o lazos.

Los datos de cada alimentador detallan la fecha y hora en la que se realizó las mediciones, esta información es útil para los resultados debido a que se debe identificar cuando se produjeron la mayor medición de armónicos de voltaje.

La Regulación del ARCONEL N 005/18 establece los indicadores o límites de calidad del servicio que deben tener las empresas de distribución y comercialización de energía eléctrica para mantener un buen nivel de calidad de producto, esta regulación establece los valores máximos de armónicos permitidos en la red, la figura 2.5 muestra el resumen de los límites de pérdidas por efecto de las perturbaciones en el sistema eléctrico.

Tabla 2.5. Límites máximos de armónicos.

Nivel de Voltaje	Armónico Individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

Los aspectos que debe controla las empresas de distribución de acuerdo a la norma son el nivel de voltaje, perturbaciones en la red y el factor de potencia.

Las mediciones de voltajes rms de las fases 1 y 2 facilitan el estudio de los límites de armónicos que tiene el alimentador, de acuerdo a la regulación del ARCONEL los armónicos permitidos deben ser máximo hasta el 5 % del valor del voltaje nominal como se muestra en la ecuación 2.1.

$$V_h \geq (0.05) \cdot V_n \quad (2.1)$$

Cada frecuencia de armónico inyecta más perturbaciones al sistema eléctrico hasta que la señal fundamental se encuentra muy distorsionada que puede causar el mal funcionamiento de los equipos eléctricos. El script en Python está diseñado para graficar los armónicos máximos de cada fase de los alimentadores seleccionados, un ejemplo de este primer análisis se muestra en la figura 2.16 donde se muestra los primeros resultados del análisis donde se grafica los armónicos de voltaje máximos de cada frecuencia armónica, además de señalar en el plano la magnitud y el orden del armónico mayor encontrado en cada fase.

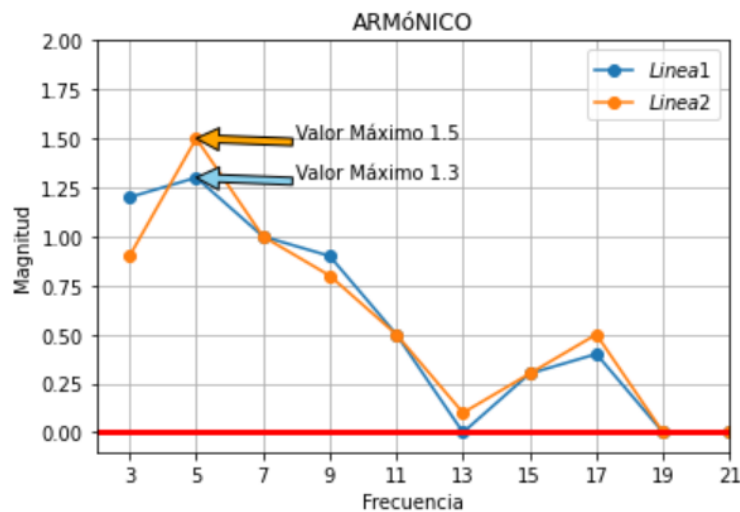


Figura 2.16. Armónicos de Voltaje máximos [27]

Al final del análisis se detalla los resultados más relevantes del análisis de cada fase del alimentador en el que se muestran el armónico de voltaje mayor, la frecuencia armónica en la que se midió y hasta cual se realizó el análisis, los armónicos de voltaje críticos los cuales superan el límite establecido por la regulación 18/005 del ARCONEL y por último el valor del armónico de voltaje sumado de todas las frecuencias analizadas.

La figura 2.17 indica en resumen de resultado emergente luego de realizar el análisis de algún alimentador.

```

-----
ANALISIS COMPLETO
-----
LINEA 1
-----
Analizado hasta el Armónico: 13
El Armónico Mayor es: 6.6
Frecuencia del Armónico Mayor: 3
Máximo Armónicos de Voltaje Línea 1: 13.8
Armónicos Críticos: 86
Aparición de los Armónicos Máximos

Fecha      Hora
05/05/2018 20:00:00

-----
LINEA 2
-----
Analizado hasta el Armónico: 13
El Armónico Mayor es: 6.7
Frecuencia del Armónico Mayor: 3
Máximo Armónicos de Voltaje Línea 2: 14.2
Armónicos Críticos: 94
Aparición de los Armónicos Máximos

Fecha      Hora
05/05/2018 20:00:00

```

Figura 2.17. Resumen de Resultados. [27]

Los resultados parten del algoritmo PSO debido a que el valor del armónico de voltaje mayor se identifica la frecuencia armónica mayor, adicionalmente las herramientas de manejo de datos permite establecer las condiciones de límites permitidos de armónicos en redes de distribución para localizar los armónicos críticos de la red.

2.4. INTERFAZ GRÁFICA.

Incorporar una interfaz HMI (Human Machine Interface), facilita al operador manejar un sistema de control ya que permite manipular cada configuración relevante del proceso y poder obtener resultados que pueden visualizarse de manera más detallada, la figura 2.18 representa el esquema de interacción de los diferentes proceso,

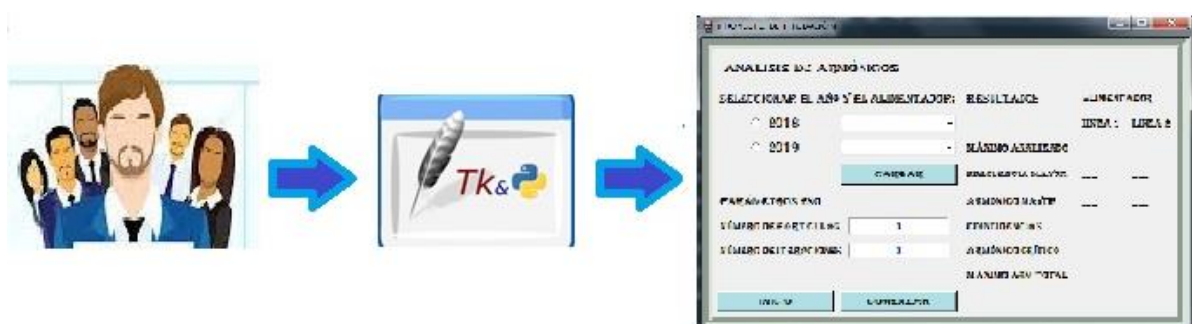


Figura 2.18. Interacción Operación Interfaz [27]

El complemento Tkinter de Python incluye varios widget que permiten implementar pantallas de interacción, los utilizados para la programación son:

- Button, permite crear botones a los cuales se le asigna comando a ejecutar.
- Checkbutton, crear casillas de verificación.
- Entry, crea un cuadro de texto
- ComboBox, crea una lista desplegable de opciones a escoger.
- RadioButton, crea recuadros que permiten seleccionar diferentes opciones.
- MessageBox, invoca diferentes tipos de mensajes de alerta.

Todas las funciones y procesos que realiza la interfaz se muestra en el diagrama de flujo de figura 2.19.

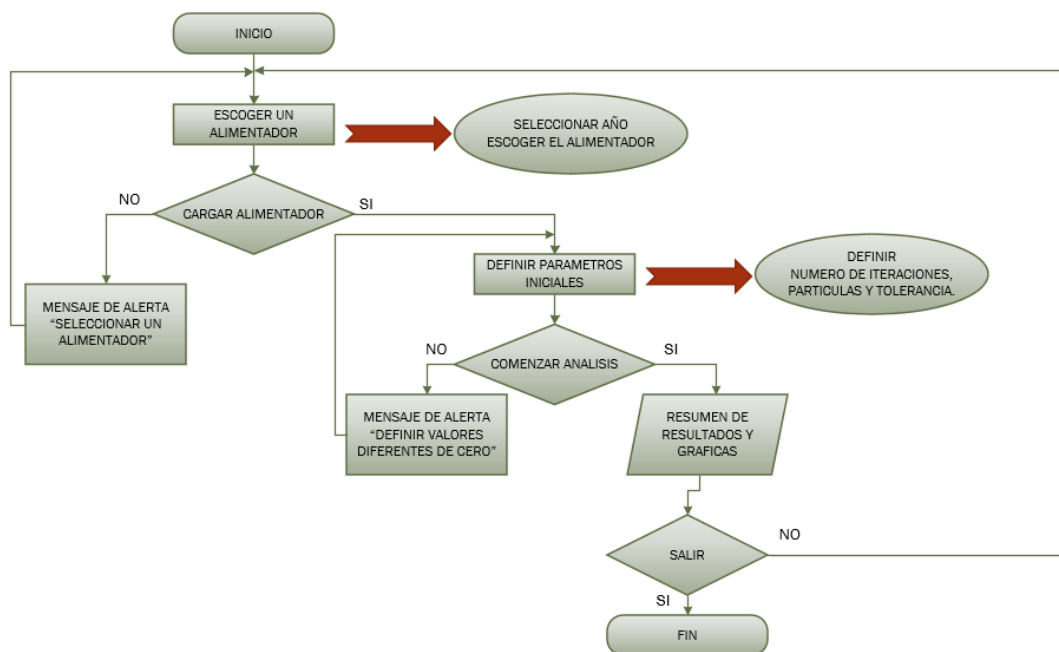


Figura 2.19. Diagrama del proceso HMI [27]

Para el desarrollo de la interfaz se interactúa el script de todo el análisis ya realizado, en el HMI está desarrollado de acuerdo al diagrama anterior, para cada proceso se utiliza condiciones ya que se implementa valores que deben ser definidos por el usuario.

Los parámetros ingresados por el usuario son para el algoritmo PSO donde ingresa el número de iteraciones y partículas, además de seleccionar el año que se desea analizar

para poder seleccionar el alimentador que se debe analizar, todos los alimentadores que pueden ser analizados están ingresados en la base de datos del programa.

Cuando se desea analizar los alimentadores de la base de datos, la figura 2.20 indica la pantalla de la interfaz en donde se relaciona los valores a analizar y los resultados obtenidos.



Figura 2.20. Interfaz de Diseñada [27]

Además en la interfaz se indica el espacio donde se resumirá los resultados encontrados. En el Anexo se detalla el manual de funcionamiento de la interfaz detallando cada resultado obtenido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo detalla los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas realizadas basado en el algoritmo por enjambre de partículas, los valores máximos de armónicos de voltaje de los alimentadores analizados y los resultados más relevantes para el estudio de alternativas a favor de la calidad del producto, también de las representaciones graficas obtenidas con la ayuda de la interfaz implementada con las herramientas de Python en el módulo de Tkinter.

Este análisis se lo realiza a las mediciones realizadas a los siguientes alimentadores que son mostrados en la tabla 3.1, donde detalla cuando se realizaron las mediciones y a que zona corresponde.

Tabla 3.1. Alimentadores seleccionados para el estudio.

2018			2019		
ALIMENTADOR	MES	ZONA	ALIMENTADOR	MES	ZONA
La Victoria	Enero	Urbana	Martínez	Enero	Rural
P.I.A. 2	Enero	Rural	Rio Verde	Enero	Rural
Picaihua	Febrero	Rural	España	Febrero	Urbana
Quero	Febrero	Rural	Quisapincha	Febrero	Rural
Camino Real	Marzo	Rural	Atahualpa	Marzo	Rural
Pasa	Marzo	Rural	Baños	Marzo	Rural
Bellavista	Abril	Urbana	Manuelita Sáenz	Abril	Urbana
Pilishurco	Abril	Rural	Montalvo	Abril	Rural
San Andrés	Mayo	Rural	La Joya	Mayo	Rural
San Miguelito	Mayo	Rural	Letamendi	Mayo	Urbana
Ficoa	Junio	Urbana	Ingahurco	Junio	Urbana
Norte	Junio	Rural	San Andrés	Junio	Rural
Cunchibamba	Julio	Rural	Miñarica	Julio	Urbana
P.I.A. 1	Julio	Rural	Palahua	Julio	Rural
Benítez	Agosto	Rural	Bolivariana	Agosto	Urbana
Huambaló	Agosto	Rural	Salasaca	Agosto	Rural
Paso Lateral	Septiembre	Rural	Cunchibamba	Septiembre	Rural
Tambo	Septiembre	Rural	Totoras	Septiembre	Rural
			Vicentina	Septiembre	Urbana
Cashapamba	Octubre	Rural	Catiglata	Octubre	Rural
Mocha	Octubre	Rural	Península	Octubre	Urbana
			Ulba	Octubre	Rural
Patate	Noviembre	Rural	Olímpica	Noviembre	Urbana
Universidad	Noviembre	Urbana	Santa Rosa	Noviembre	Rural
Izamba	Diciembre	Urbana	Industrial	Diciembre	Rural
Pititín	Diciembre	Rural	Pelileo	Diciembre	Rural
			P.I.A. 2	Diciembre	Rural

A estos alimentadores se busca identificar el nivel de armónicos que han registrado durante sus mediciones, el proyecto permite identificar cuáles son los alimentadores que pueden necesitar intervención para precautelar los equipos conectados en la red.

3.1. VALORES ÓPTIMOS PARA EL ALGORITMO PSO

Para determinar la eficiencia de la simulación establecida cuando se utiliza algoritmos heurísticos es necesario buscar resultados óptimos sin la necesidad de gastar demasiados recursos, la figura 3.1 la relación entre estos parámetros cuando se presenta diferentes tipos de casos de simulación

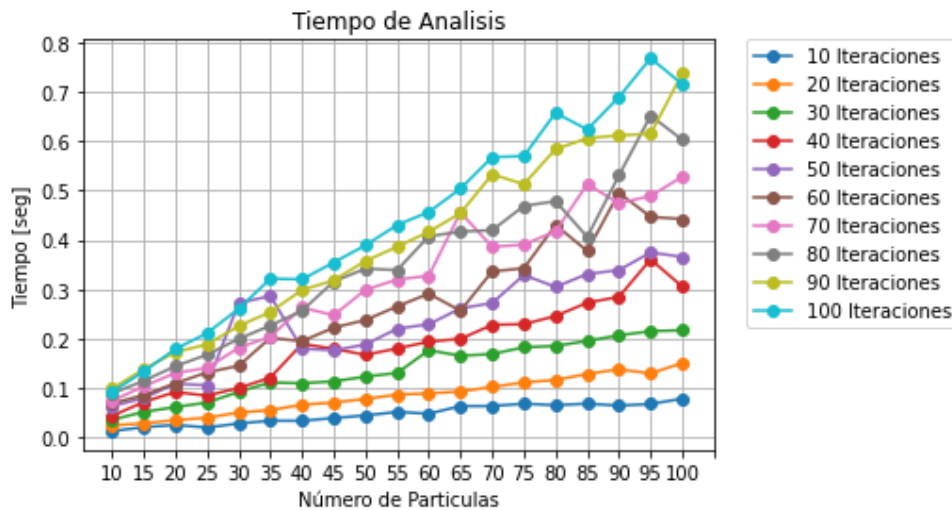


Figura 3.1. Relación Número de Partículas e Iteraciones [27]

Mientras más aumentan el número de iteración y partículas mayor es el tiempo invertido que se necesita para resolver la optimización y los recursos que gastan los equipos para el funcionamiento del algoritmo, el tiempo invertido en la optimización es proporcional al número de iteraciones y de partículas definidas pero en ciertos casos cuando estos parámetros logran localizar los valores óptimos y el tiempo se reduce debido a que se utilizan condiciones de parada que detienen el análisis.

Cuando se analiza una gran cantidad de información en diferentes base de datos se establece rangos a los parámetros que utiliza el enjambre de partículas además a los datos que se van a analizar considerando que los recursos utilizados no sean desperdiciados, los parámetros del algoritmo PSO que son utilizados para el análisis de armónicos de voltaje se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros Algoritmo PSO

Parámetro	Valor
Número de Partículas	50
Número de Iteraciones	100
Tolerancia de Parada	10^{-3}
Inercia	0.8
Inercia Máxima	0.9

Inercia Mínima	0.4
Constante Cognitiva	1
Constante Social	2
Rondas de Parada	5

La condición de parada depende si la variación de resultados del enjambre de partículas no muestran variación representativa a los largo de las iteraciones, para evitar que siga analizando y gastando recursos se fuerza la detención, esto ayuda a obtener resultados en menor tiempo, la figura 3.2 muestra los resultados del análisis a un alimentador con la ayuda del algoritmo PSO.

```

-----
Optimización Finalizada 2020-10-10 03:10:26
-----
Duración PSO: 1.9971237182617188
Iteraciones Definidas: 100
Iteraciones Realizadas: 51
Posición óptima: [461.662846850089]
Armónico Maximo: 1.5

```

Figura 3.2. Aviso de fin de proceso por condiciones de parada. [27]

3.2. ALIMENTADORES ANALIZADOS

La base de datos de cada alimentador consta con las mediciones realizadas para mantener el reporte del comportamiento del sistema eléctrico de distribución tanto para los ubicados en la zona urbana como en la zona rural, el proceso de análisis se encarga de identificar cada parámetro eléctrico para ser analizado por el algoritmo de enjambre de partículas, las mediciones de armónicos de voltaje son tomadas durante una semana y muestra los valores de diferentes frecuencias. Las mediciones se realizan periódicamente en alimentadores al azar con el fin de analizar zona que pueden ser despreciables por la distancia.

Actualmente se utiliza más equipos basados en electrónica de potencia lo que conlleva al aumento de las cargas no lineales y para no afectar a los todos usuarios se ve en la necesidad de implementar medidas de control de perturbaciones cuando existe valores atípicos en las mediciones,

El análisis completo a las mediciones del año 2018 indica que el armónico de voltaje con mayor presencia es el de orden 3, este armónico de voltaje aparece en 14 mediciones a alimentadores rurales y en 3 alimentadores urbanos, mientras que para el armónico de

orden 5 aparecen en 4 alimentadores rurales y 3 urbanos, la figura 3.3 detalla los resultados descritos anteriormente.

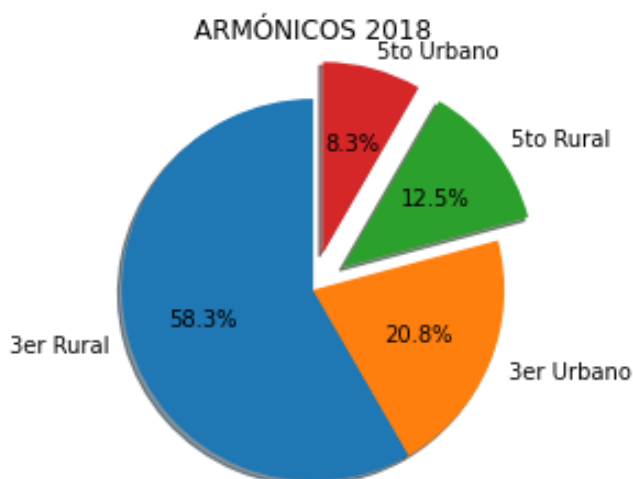


Figura 3.3. Alimentadores analizados en el 2018 [27]

Los resultados detallados del año 2018 se muestran en la tabla 3.3 donde se indican el armónico de voltaje mayor considerando todas las frecuencias armónicas analizadas, el orden en el cual está el mayor armónico de voltaje y el parámetro de coincidencia el cual muestra las veces que aparece el armónico de voltaje mayor, este parámetro puede ayudar a identificar que tan vulnerable es el alimentador cuando aparezcan valores atípicos, todos estos resultados encontrados son tanto para las fases 1 y 2 de cada alimentador.

Tabla 3.3. Resultados Análisis 2018

Alimentador Secundario De 120[V]	Mes	Zona	Armónico Mayor		Orden del Armónico		Coincidencia	
			Fase1 [V]	Fase2 [V]	Fase1	Fase2	Fase1	Fase2
La Victoria	Enero	Urbana	5,1	5,2	3	3	11	5
P.I.A. 2	Enero	Rural	3,3	3,3	5	5	3	1
Picaihua	Febrero	Rural	2,8	2,8	3	3	14	8
Quero	Febrero	Rural	3,2	3,3	3	3	16	1
Camino Real	Marzo	Rural	1,8	1,8	5	5	12	7
Pasa	Marzo	Rural	10,4	10,5	3	3	1	1
Bellavista	Abril	Urbana	1,4	1,6	5	5	18	1
Pilishurco	Abril	Urbana	2,7	2,7	5	5	14	7
San Andrés	Mayo	Rural	6,7	6,3	3	3	1	1
San Miguelito	Mayo	Rural	4,7	4,7	5	5	10	6
Ficoa	Junio	Urbana	2,5	2,6	3	3	5	5
Norte	Junio	Rural	3,7	3,5	3	3	2	3
Cunchibamba	Julio	Rural	5,2	5,2	3	3	9	1
P.I.A. 1	Julio	Rural	5,3	5,1	3	3	3	1

Benítez	Agosto	Rural	5,8	6,4	3	3	1	3
Huambaló	Agosto	Rural	3,7	3,7	3	3	5	2
Paso Lateral	Septiembre	Rural	3,5	3,2	3	3	10	15
Tambo	Septiembre	Rural	7,5	7,5	3	3	1	1
Cashapamba	Octubre	Rural	1,8	1,9	5	5	11	2
Mocha	Octubre	Rural	4,9	4,9	3	3	4	2
Patate	Noviembre	Rural	7,5	8,3	3	3	3	2
Universidad	Noviembre	Urbana	1,2	1,2	5	5	16	15
Izamba	Diciembre	Urbana	1,7	2	3	3	5	11
Pititic	Diciembre	Rural	3	2,7	3	3	4	25

El parámetro de coincidencia muestra la fecha y hora en la que se registraron mediciones del armónico de voltaje máximo como indica en la figura 3.4, detallando la hora en la que surgió los mayores valores de perturbaciones se puede analizar varias cosas como relación de consumo en horas picos, días de la semana o feriados para determinar cuando el alimentador está en condiciones fuera de lo común.

Aparición de los Armónicos Máximos	
Fecha	Hora
21/04/2018	20:20:00
21/04/2018	21:20:00
22/04/2018	19:10:00
22/04/2018	19:20:00
22/04/2018	19:30:00
22/04/2018	20:00:00
22/04/2018	20:10:00
23/04/2018	20:00:00

Figura 3.4. Resultados índice de coincidencia

Los valores atípicos del año 2018 indican los siguientes alimentadores que muestran mediciones de armónicos de voltaje altos, estos serían causantes de desestabilidad en la red eléctrica, estos alimentadores son los que se muestran en la tabla 3.4 detallando el armónico mayor y la coincidencia en las mediciones.

Tabla 3.4. Valores atípicos Análisis 2018

Alimentador	Mes	Zona	Armónico de Voltaje Máximo [V]		Coincidencia del Armónico Crítico	
			Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
Pasa	Marzo	Rural	10,4	10,5	440	477
San Andrés	Mayo	Rural	6,7	6,3	86	94

Los valores de la tabla anterior muestran valores tomados en diferentes alimentadores donde el armónico de voltaje medido en esa frecuencia supera los límites impuestos por las entidades reguladoras, de acuerdo al valor establecido por la regulación del ex ARCONEL número 005/18 los armónicos de voltaje para el sistema de distribución no debe superar el 5 % del voltaje nominal del alimentador.

El parámetro de coincidencia indica las veces en la que las mediciones de armónicos de voltajes fueron mayores al 5 % referente al valor nominal del voltaje suministrado medido en cada fase del alimentador, los datos de esta tabla indican que estos valores no están presentes solo en zonas rurales además de que cada fase tiene diferentes cargas e influye el tipo de cliente en las pérdidas que puedan aparecer.

La figura 3.5 muestra una medición atípica en un alimentador en zona rural en la que el armónico de voltaje máximo es sumamente elevado, esto puede causar perturbaciones en el sistema eléctrico al punto de averiar equipos eléctricos, basado en la tabla 3.5 el número de veces en la que supero el límite permitido por la regulación es aproximadamente la mitad lo que indica que debe implementar medidas de control urgentes para mantener la calidad del servicio.

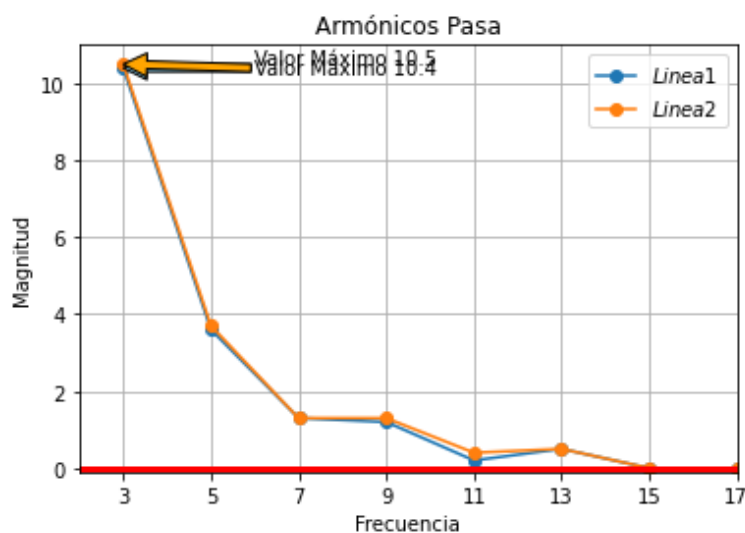


Figura 3.5. Medición en alimentador rural de 2018

Los alimentadores rurales son a los que más mediciones se los ha realizado y son las que se puede apreciar armónicos de voltaje más altos, además de las pérdidas causadas por la presencia de cargas no lineales se suman las pérdidas consideradas por la geografía ya que los centros de carga se encuentran separados, además que en el sector rural existe mayor posibilidad del robo de energía.

Un alimentador ubicado en el perímetro urbano es más controlado debido a que los clientes tienen mayor facilidad de realizar reclamos ante cualquier problema y como la densidad poblacional aumenta en mayor relación a la zona rural se ven en la necesidad de realizar oportunamente acciones de mantenimiento lo que lleva a evitar que el sistema presente perturbaciones en la red eléctrica, como se muestra en la figura 3.6 los valores medidos son bajos.

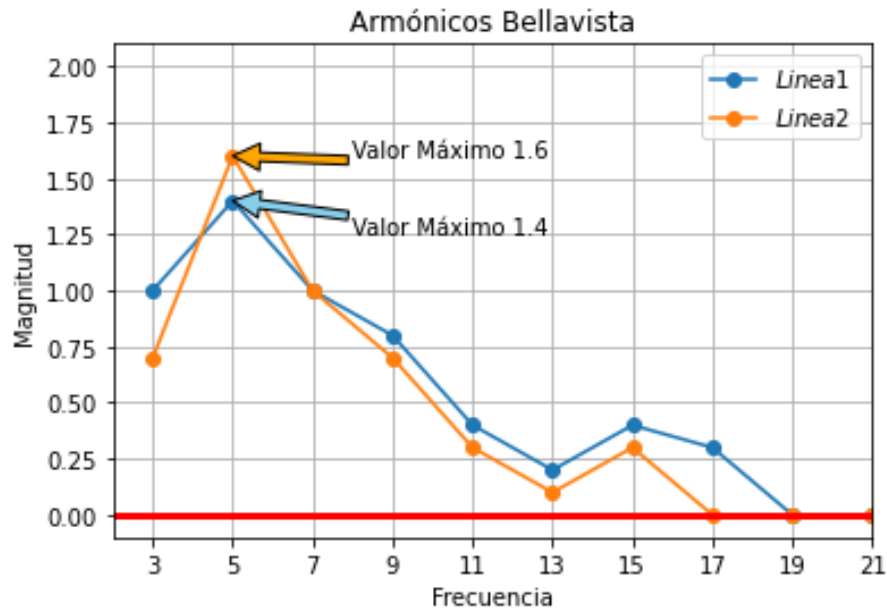


Figura 3.6. Medición en alimentador urbano de 2018 [27]

De acuerdo al detalle obtenido por el parámetro de coincidencia se puede graficar la referencia en la que se midió el armónico de voltaje, esto determina si existe relación con las horas pico además de indicar cuales días de la semana influyen con los valores obtenidos, la figura 3.7 indica el resumen de los resultados en la fase 1 durante el año 2018, relacionando la hora y el factor de coincidencia se obtiene los siguiente resultados.

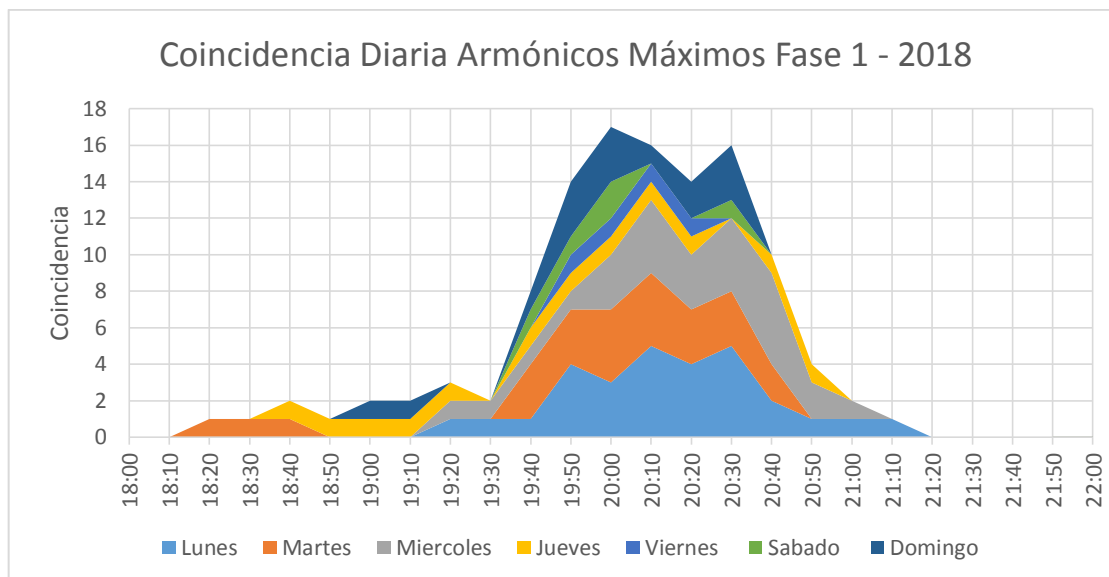


Figura 3.7. Tendencia Diaria Armónicos de voltaje Fase 1 de 2018 [27]

Realizando el análisis considerando las horas pico de la noche, de 18h a 22h, se obtiene el número de coincidencias de los armónicos medidos en la semana dando a conocer las mediciones realizadas y dando a conocer que entre semana es donde existe la mayor cantidad de armónicos de voltaje. Este detalle contempla el año de mediciones por lo que se identifica que los usuarios realizan un consumo enfocado al sector laboral.

El grado de recurrencia en la que aparecen los armónicos de voltaje en el año 2018 se representa en la figura 3.8, indica que Febrero es el mes con la mayor cantidad de armónicos de voltaje medidos en las horas pico.

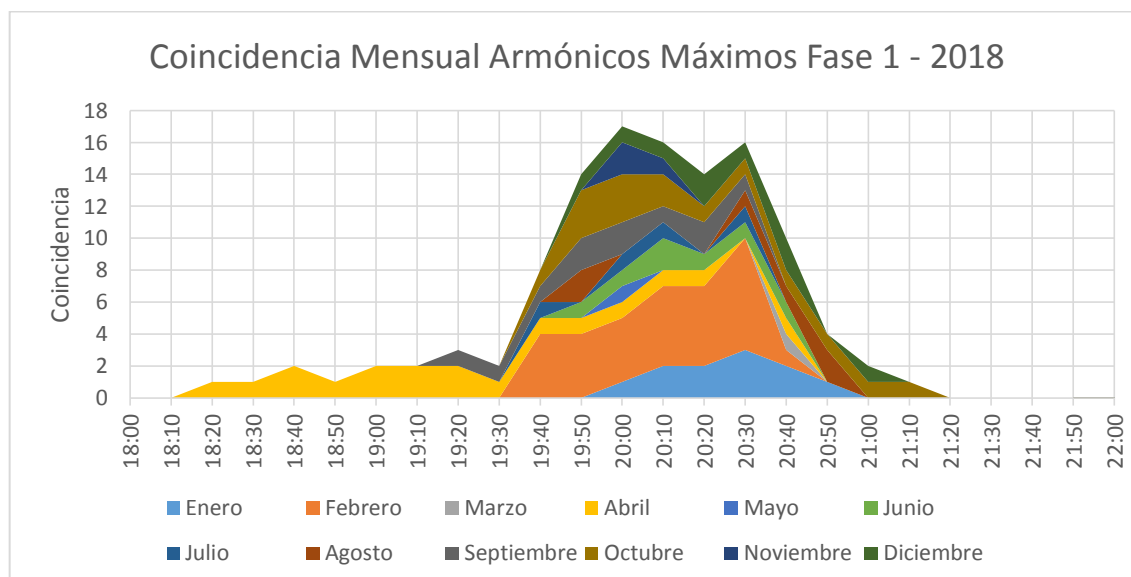


Figura 3.8. Tendencia mensual armónicos de voltaje Fase 1 de 2018 [27]

La figura 3.9 indica el análisis diario en año 2019 de la fase 2, muestra un pico más relevante en las mediciones, esto indica que existe una hora en específico en la que los armónicos de voltaje aparecen regularmente, al estar concentradas en un mismo periodo da a entender durante ese periodo de tiempo el sistema es más vulnerable a fallas por efectos de armónicos en la red.



Figura 3.9. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 2 de 2018 [27]

Al analizar conjuntamente los resultados de ambas fases del alimentador, indica que los primeros días de la semana son los que están las máximas mediciones de armónicos de voltaje, las mediciones de las horas pico son las utilizadas para el análisis debido a que a lo largo del día también existe presencia de armónicos de voltaje pero no en la misma magnitud.

Las mediciones realizadas en la fase 2 indican que la mayor cantidad de armónicos de voltaje son tomadas en el mes de diciembre como lo indica la figura 3.10, lo que justificaría el periodo de tiempo donde está la mayor cantidad de festividades al contrario que la fase 1 donde se registró el mes de febrero como el de mayor consumo y por tal razón no hay relación de consumo entre las 2 fases.

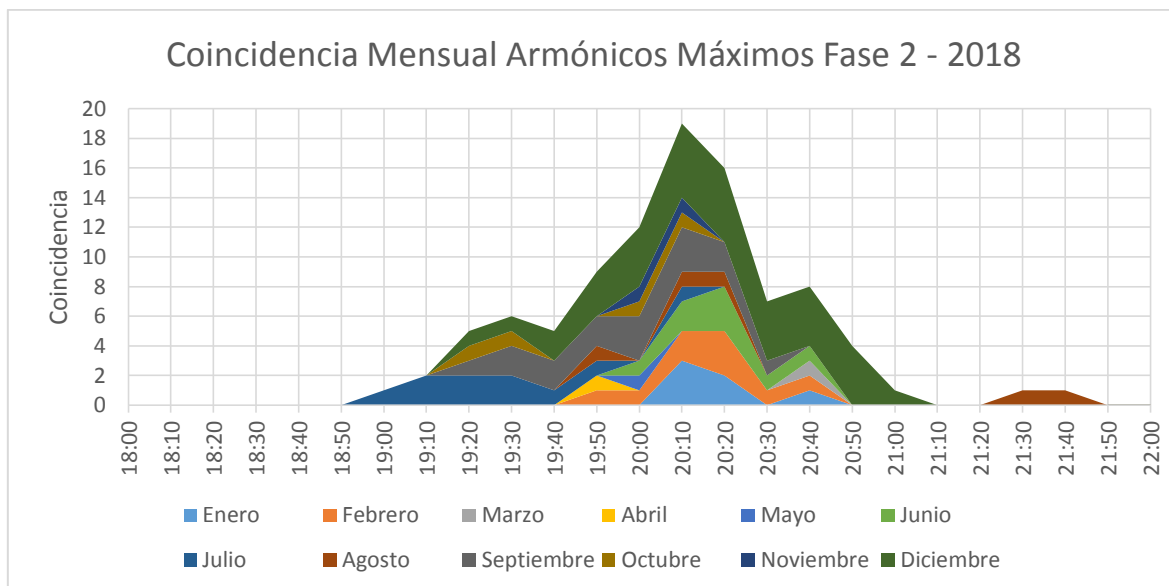


Figura 3.10. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 2 de 2018 [27]

El valor del armónico de voltaje máximo que medido en cada fase de los alimentadores da un valor referencial del armónicos que puede estar presente en esa fase, con estos valores se pueden tomar acciones para realizar una adecuada planificación del sistema de protección y así evitar los efectos que pueden aparecer en la red eléctrica o en los equipos por el aumento de perturbaciones.

Los valores máximos de armónicos de voltaje de los alimentadores se detallan en la tabla 3.5, pueden indicar la magnitud de armónicos de voltaje cuyo valor es mayor a 5[V] es valor es referencial y puede indicar que esos alimentadores tienen una alta presencia de armónicos.

Tabla 3.5. Armónicos de voltaje altos en Alimentadores 2018

Alimentador Secundario de 120[V]	Mes	Zona	Armónico Total	
			Fase1 [V]	Fase2 [V]
La Victoria	Enero	Urbana	9.1	9.3
P.I.A. 2	Enero	Rural	5.4	7.2
Pasa	Marzo	Rural	17.2	17.7
San Andrés	Mayo	Rural	13.8	14.2
San Miguelito	Mayo	Rural	12.3	12.1
Ficoa	Junio	Urbana	6.2	6.3
Norte	Junio	Rural	7.3	6.5
Cunchibamba	Julio	Rural	9.1	9.2
P.I.A. 1	Julio	Rural	11.7	10.9
Benítez	Agosto	Rural	10.3	10.9
Huambaló	Agosto	Rural	7.2	7.4

Paso Lateral	Septiembre	Rural	7.0	6.3
Tambo	Septiembre	Rural	13.5	14.2
Mocha	Octubre	Rural	7.9	7.8
Patate	Noviembre	Rural	21.4	24.7
Izamba	Diciembre	Urbana	7.1	8.7

Para el año 2019 se realizó 27 mediciones donde en ciertos meses se realizó 3 mediciones ya sea por garantizar la confiabilidad de los datos o para realizar índices de calidad más precisos, las mediciones se dividen en 8 alimentadores urbanos y 19 alimentadores rurales como se detalla en la figura 3.11.

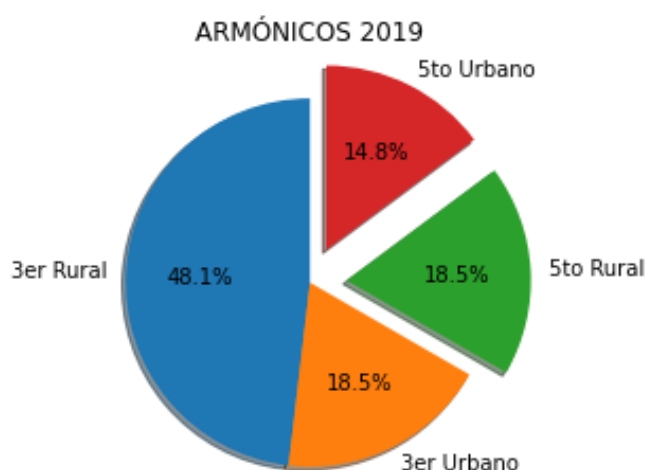


Figura 3.11. Análisis Alimentadores 2019 [27]

Los resultados de las fases 1 y 2 analizadas en los alimentadores en este año se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados Análisis Alimentadores 2019

Alimentador Secundario de 120[V]	Mes	Zona	Armónico Máximo		Orden del Armónico		Coincidencia	
			Fase1 [V]	Fase2 [V]	Fase1	Fase2	Fase1	Fase2
Martínez	Enero	Rural	2,5	2,8	3	3	10	5
Rio Verde	Enero	Rural	3,2	3,3	3	3	2	1
España	Febrero	Urbana	8,7	8,6	3	3	1	1
Quisapincha	Febrero	Rural	3,3	2,8	3	3	3	14
Atahualpa	Marzo	Rural	3,2	3,6	3	3	1	4
Baños	Marzo	Rural	2,2	2,2	3	3	9	4
Manuelita Sáenz	Abril	Urbana	2	2	3	3	2	2
Montalvo	Abril	Rural	2,3	4	3	3	13	1

La Joya	Mayo	Rural	1,6	1,5	3	3	35	8
Letamendi	Mayo	Urbana	1,9	1,7	3	3	8	3
Ingahurco	Junio	Urbana	1,4	1,4	5	5	26	13
San Andrés	Junio	Rural	8,6	8,4	3	3	2	2
Miñarica	Julio	Urbana	2,1	2,2	3	3	1	24
Palahua	Julio	Rural	1,9	2	3	3	2	3
Bolivariana	Agosto	Urbana	1,1	1,3	5	3	4	4
Salasaca	Agosto	Rural	2	2	5	5	2	5
Cunchibamba	Septiembre	Rural	3,9	3,9	5	5	2	1
Totoras	Septiembre	Rural	1,9	1,9	3	3	2	2
Vicentina	Septiembre	Urbana	1,7	1,6	5	5	1	28
Catiglata	Octubre	Rural	1,7	1,7	5	5	11	12
Península	Octubre	Urbana	1,8	1,7	5	5	3	3
Ulba	Octubre	Rural	1,2	1,6	3	3	13	5
Olímpica	Noviembre	Urbana	1,2	1,6	3	3	13	5
Santa Rosa	Noviembre	Rural	3,6	3,6	3	3	3	5
Industrial	Diciembre	Rural	2,4	2,5	3	3	9	9
Pelileo	Diciembre	Rural	3,1	3	3	3	2	18
P.I.A. 2	Diciembre	Rural	2,4	2,4	5	5	2	1

El voltaje que es suministrado a los usuarios por parte de las empresas distribuidoras es de 120 [V] pero debido a la incorporación de cargas no lineales al sistema eléctrico existe pérdidas de voltaje causadas principalmente por las perturbaciones conocidas como armónicos, estos voltajes indican cual confiable es el sistema ya que los armónicos muy grandes pueden afectar a los equipos eléctricos.

De los alimentadores analizados este año se encontró valores atípicos, de los valores atípicos encontrados los alimentadores que presentan valores anormales se encuentran en la zona urbana y rural, se detalla en la tabla 3.7

Tabla 3.7. Valores atípicos Análisis 2019

Alimentador Secundario de 120[V]	Mes	Zona	Armónico de Voltaje Máximo		Coincidencia	
			Fase 1 [V]	Fase 2 [V]	Fase 1	Fase 2
España	Febrero	Urbana	8,7	8,6	5	5
Montalvo	Abril	Rural	2,3	4	1	804
San Andrés	Junio	Rural	8,6	8,4	142	146

Los valores del alimentador urbano y rural son para considerar que pueden causar problemas a la red, una red que no se encuentra bien planificada puede presentar

resultados desnivelados como el caso del alimentador Montalvo en el que los armónicos de voltaje críticos solo se encuentran en la fase 2 y con la ayuda del parámetro de coincidencia se determina que más de la mitad de mediciones muestran valores por encima de los límites establecidos.

El alimentador de la figura 3.12 indica como el armónico de voltaje de orden 3 generado en la fase 2 es prácticamente el doble del medido en la fase 1, debido a esto en caso de producirse alguna falla en la red eléctrica el sistema de protección pueden desconectarlos, si los sistema de protección no son mono polares puede desconectar el sistema completo aun cuando una fase no presenta falla.

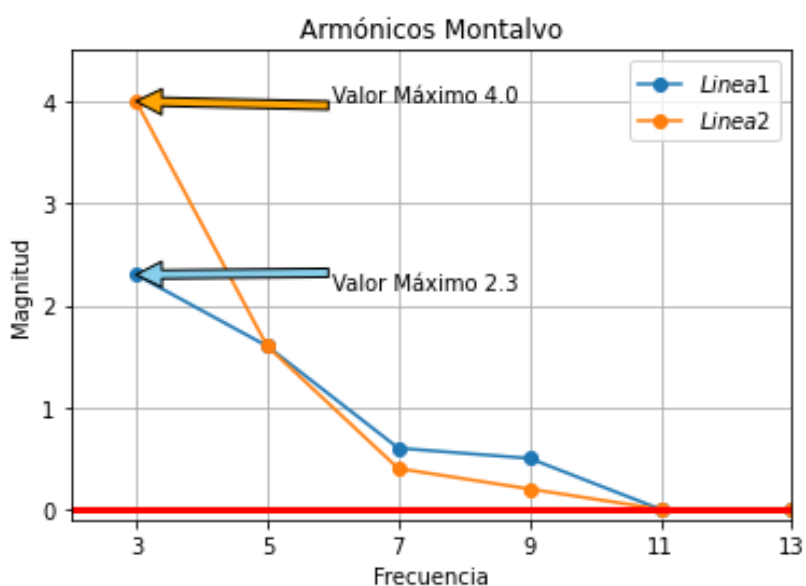


Figura 3.12. Medición en alimentador rural de 2019 [27]

La figura 3.13 muestra que los valores atípicos no están presentes únicamente en los alimentadores rurales, este tipo de valor puede ser considerado como error de medición ya que en la zona urbana donde existe una mayor cantidad de equipos electrónicos puede generar grandes problemas a los usuarios, el sistema eléctrico perdería la confiabilidad del servicio además de verse afectado en los índices de calidad del producto.

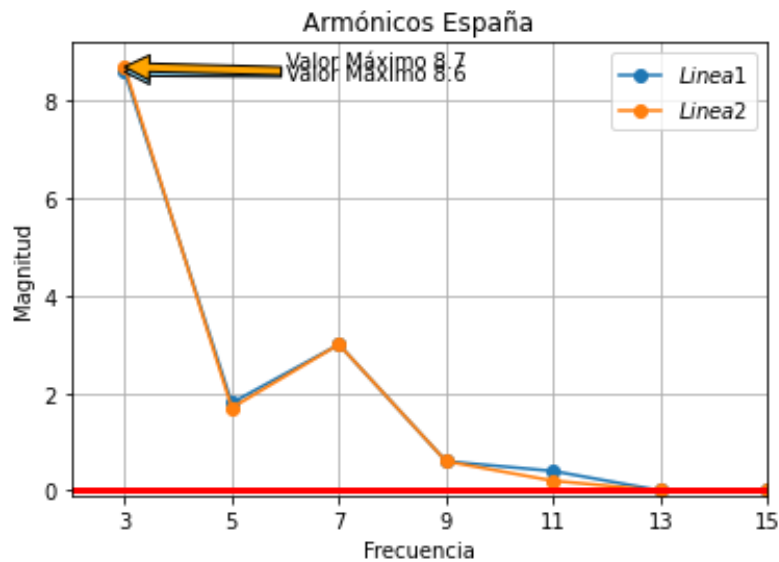


Figura 3.13. Medición en alimentador urbana de 2019 [27]

La figura 3.14 y 3.15 indican los resultados de la fase 1 en el año 2019, la tendencia de resultados encontrados en el siguiente año de análisis muestra una similitud de armónicos de voltaje encontrados en horas picos esta similitud con alimentadores diferentes analizados en días diferentes solo pude orientar a que los usuarios son los que tienen las mismas tendencias consumistas.

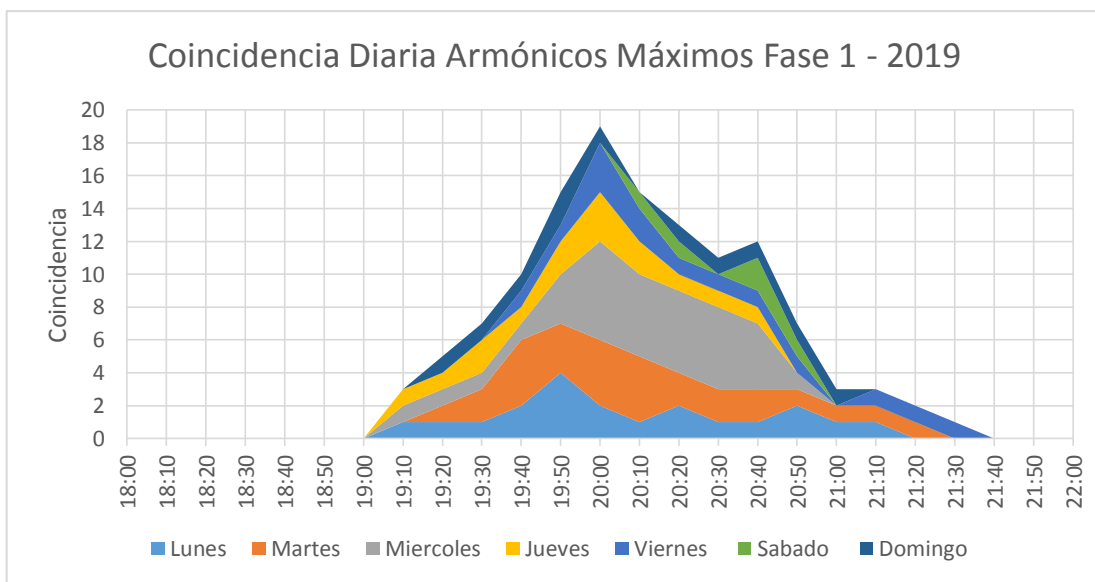


Figura 3.14. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 1 de 2019 [27]

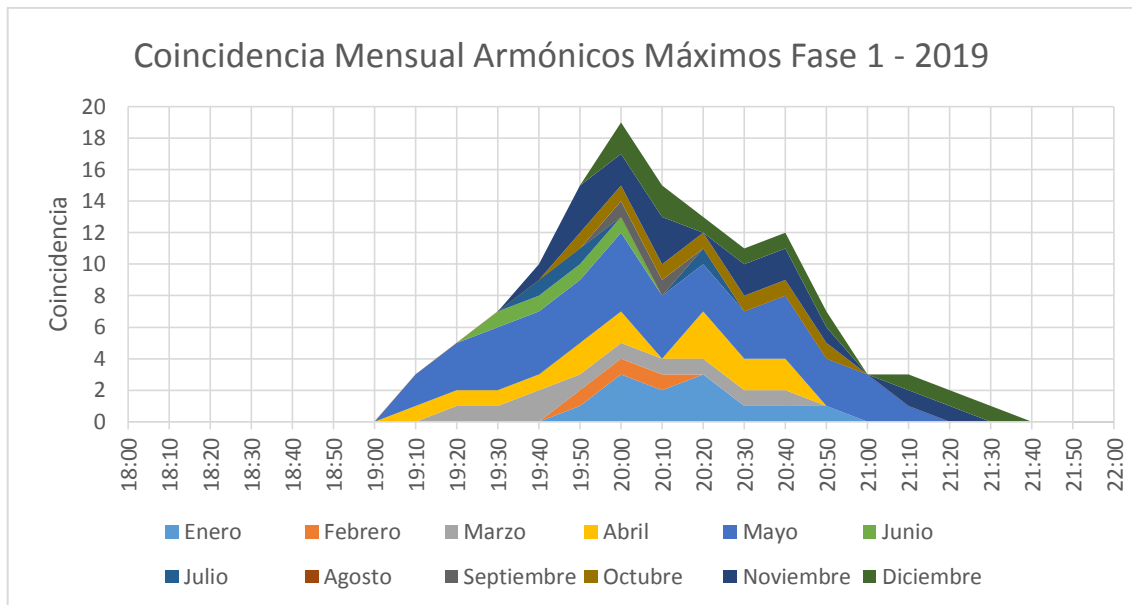


Figura 3.15. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 1 de 2019 [27]

De acuerdo a los resultados mostrados por las gráficas anteriores, indica las mediciones más relevantes comprendidas en las horas de la noche para ser más específicos entre las 19h hasta las 21h40, las demás horas del día no muestran valores considerables debido a que son por cortos periodos de tiempo, esto se puede comprobar en el Anexo A.

La figura 3.16 muestra los resultados de la fase 2 en donde se observa que las mediciones máximas ya no son iguales a los tomados de la fase 1, aunque lo que da a entender es que se distribuye durante el día las mediciones.

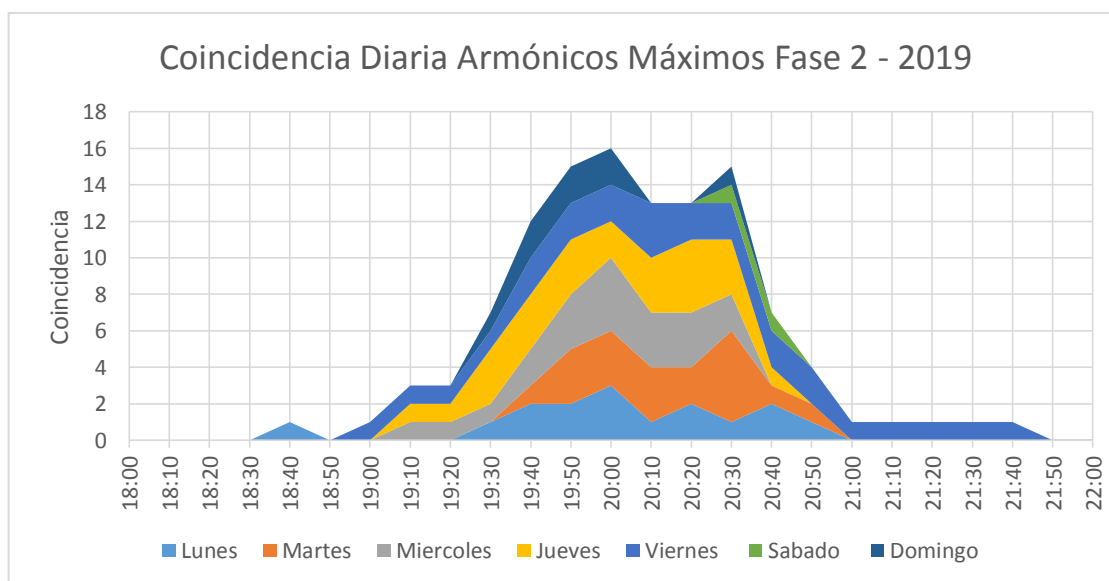


Figura 3.16. Tendencia Diaria armónicos de voltaje Fase 2 de 2019 [27]

El análisis mensual de los alimentadores indica un cierto balance en los consumos por lo que en la fase 2 como se muestra en la figura 3.17, indica que no existe un mes en especial en el que la cantidad de armónicos de voltaje sea mayor, mientras que en la fase 1 el mes con mayor consumo es enero, esto da a comprender que el sistema eléctrico de distribución está en constante variación por lo que los resultado pueden no ser los esperados.

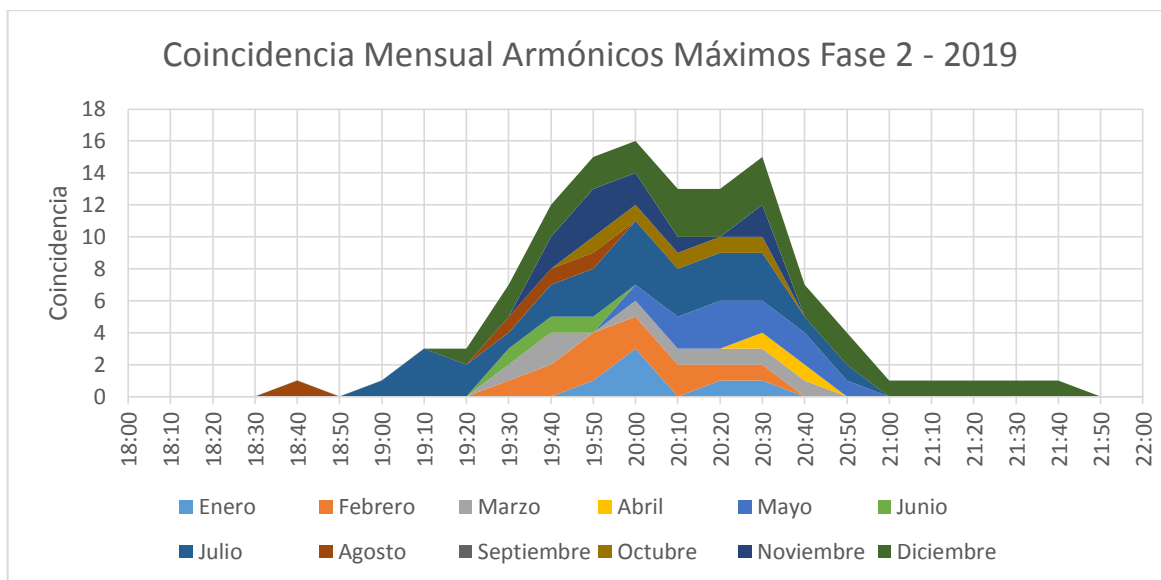


Figura 3.17. Tendencia Mensual armónicos de voltaje Fase 2 del 2019 [27]

Los valores de pérdidas en las fases de distribución causa daño a los equipos que se encuentran conectados en la red, las cargas conectados a los alimentadores no son puramente residencial, comercial o industrial por lo que a estar la red con perturbaciones causa averías a las maquinas o equipos eléctricos.

La perturbaciones que afectan al sistema eléctrico no solo se limitan a la magnitud del armónico de voltaje que se mide, además cuando existe mediciones de armónicos con frecuencias diferentes, figura 3.18, la distorsión de la onda de voltaje fundamental es proporcional al número de frecuencias armónicas medidas en la señal, el valor del armónico de voltaje en cada frecuencia es sumado para determinar el valor real del armónico medido.

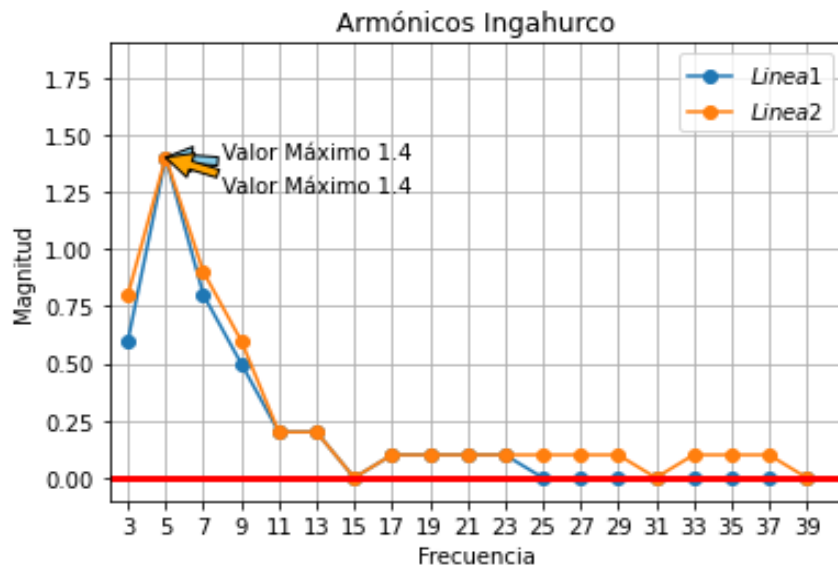


Figura 3.18. Medición de diferentes frecuencias armónicas. [27]

Los alimentadores que deben ser observados de manera más detallada por los valores muy altos de armónicos de voltaje que se registraron este año, esto se detalla en la tabla 3.8

Tabla 3.8. Armónicos de voltaje altos en Alimentadores 2019

Alimentador Secundario de 120[V]	Mes	Zona	Armónico Total	
			Fase 1 [V]	Fase 2 [V]
Martínez	Enero	Rural	6.1	6.2
Rio Verde	Enero	Rural	7.3	7.5
España	Febrero	Urbana	14.4	14.2
Quisapincha	Febrero	Rural	8.2	8.7
Atahualpa	Marzo	Rural	8.5	9.7
Montalvo	Abril	Rural	5.0	6.2
Letamendí	Mayo	Urbana	8.5	6.6
San Andrés	Junio	Rural	18.0	18.3
Miñarica	Julio	Urbana	6.6	7.4
Cunchibamba	Septiembre	Rural	6.0	6.2
Santa Rosa	Noviembre	Rural	7.7	7.3
Industrial	Diciembre	Rural	6.8	7.5

3.3. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.

Los efectos de los armónicos a los sistemas eléctricos de distribución van enfocados en el desempeño en la operación causado por las pérdidas, los armónicos pueden ser de voltajes y corrientes pero sus efectos son diferentes, los armónicos de voltaje causa la

reducción de la vida útil de los equipos debido al deterioro en los asilamientos mientras que los armónicos de corriente afectan el funcionamiento de los equipos.

El análisis completo de las mediciones de los alimentadores en los años 2018 y 2019 determinaron que la frecuencia de armónicos de voltaje máximo que predominan en los resultados son el de orden tercero y quinto como se muestra en la figura 3.19, las demás frecuencias si tienen valores diferentes de cero aunque no en la misma magnitud.

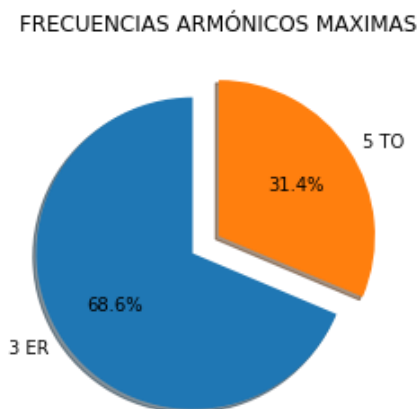


Figura 3.19. Frecuencias Armónicas Máximas [27]

Los mayores armónicos del voltaje analizados despreciando los alimentadores con valores críticos muestran una mayor presencia de 3er armónico, secuencia 0, que los armónicos de orden 5, secuencia negativa, el sistema analizado tiene que ser capaz de soportar estos armónicos.

Debido a las mediciones aleatorias tomadas en los años 2018 y 2019 en cada uno de los meses además los días en los que se realizó por lo que no se puede elaborar un análisis de la progresión de la presencia de armónicos de voltaje en cada fase, los alimentadores que coincidieron con mediciones en esos 2 años son el San Andrés, P.I.A. 2 y Cunchibamba, por lo tanto el análisis predictivo de alimentadores con alta presencia de armónicos quedo limitado a insuficiencia de datos.

El alimentador San Andrés coincide en las mediciones del año 2018 y 2019, pero al ser tomada las mediciones al hacer no coinciden en el mismo periodo de tiempo al año en las mediciones por tal razón no se puede establecer criterios de proyección o de verificación, pero al ser tomado como valores críticos en las 2 mediciones se puede determinar que es un alimentador en riesgo por los danos que puede ocasionar.

Las perturbaciones en redes eléctricas van en aumento periódicamente conforme avanza el tiempo ya sea por el aumento de las cargas de los consumidores o el crecimiento de los

usuarios, de acuerdo al resumen de los resultados existe varios alimentadores donde su valor total de armónicos de voltaje encontrados superan los límites considerados para la elaboración de índices de calidad del producto.

De acuerdo a los resultados de la tabla 3.9 la medición del alimentadores P.I.A. 2 los armónicos de voltaje indican una reducción en sus valores de las mediciones lo que indica que en el siguiente año de análisis los valores encontrados no superan las pérdidas permitidas en el sistema de distribución, en cambio el alimentador Cunchibamba muestra reducción en las mediciones realizadas pero continúan señalando valores de pérdidas superiores al 5% del voltaje nominal. Mientras que el alimentador San Andrés aumenta los armónicos de voltaje de un año al otro, este resultado implica que ese alimentador continúa mostrando un crecimiento de armónicos de voltaje por lo que se debe tomar medidas oportunas y así evitar problemas con los usuarios.

Tabla 3.9. Relación Alimentadores durante 2 años

Alimentador Secundario de 120 [V]	Mes	Año	Armónico de Voltaje Máximo		Armónico de Voltaje Total		Mayor al Limite	
			Fase 1 [V]	Fase 2 [V]	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
P.I.A. 2	Enero	2018	3,3	3,3	5.4	7.2	SI	SI
P.I.A. 2	Diciembre	2019	2,4	2,4	4.5	4.7	NO	NO
San Andrés	Mayo	2018	6,7	6,3	13.8	14.2	SI	SI
San Andrés	Junio	2019	8,6	8,4	18.0	18.3	SI	SI
Cunchibamba	Julio	2018	5,2	5,2	9.1	9.2	SI	SI
Cunchibamba	Septiembre	2019	3,9	3,9	6.0	6.2	SI	SI

3.4. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

Los armónicos pueden causar daños a los equipos electrónicos y a los equipos de potencia, por tal razón cuando existe un valor alto de armónicos en la red es necesario buscar formas de mantener la menor cantidad de perturbaciones en el sistema.

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

- Entre las soluciones paliativas está el sobredimensionamiento de los equipos o conductores, esta solución no eliminan los armónicos solo evita los efectos en el sistema.
- Dimensionar el neutro del mismo calibre que alguna fase.

- Implementación de transformadores de aislamiento de estrella – triángulo.
- Transformadores con doble secundario o conocido como los de conexión en zigzag.
- Filtros que ayuden a la contención de las frecuencias armónicas los más utilizados son en conexión en shunt resonantes.

Los métodos de mitigación propuestos para los resultados obtenidos son:

- a. Mejor dimensionamiento de Transformadores.

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

- Calentamiento en los Bobinados.
- Resonancia en los Bobinados.
- Aumento en las pérdidas del cobre y del núcleo.
- Pérdidas de corriente por efecto $I^2.R$
- Pérdidas por corriente de Eddy.

Mejorar el dimensionamiento de los equipos eléctricos implica que sus capacidades estructurales están diseñadas para soportar valores mayores a los instalados, los transformadores son construidos de acuerdo a normas de calidad y son comercializado en catálogos donde tienen diferentes parámetros adaptados para la zona donde serán ubicados, algunos parámetro se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Especificaciones Transformadores de Distribución

Potencia	Tipo Radial				Tipo Malla			
	Dimensiones			Peso	Dimensiones			Peso
P [kVA]	H [mm]	L [mm]	P [mm]	W [Kg]	H [mm]	L [mm]	P [mm]	W [Kg]
10	650	750	750	305	650	750	720	320
15	670	750	800	310	700	750	800	335
25	700	750	850	380	750	800	850	400
37.5	700	750	900	380	750	800	900	400
50	750	750	900	435	800	800	900	450

75	800	800	1050	510	830	900	1050	530
100	800	800	1070	580	850	900	1070	600

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

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

El sistema eléctrico de distribución está en crecimiento por lo que los transformadores de menor capacidad retirados para sobredimensionar el alimentador son utilizados en los nuevos circuitos, se realiza un mantenimiento preventivo a los equipos para determinar si son viables para otro sistema lo que ayuda reducir la inversión.

b. Transformadores con Factor K

Debido al aumento de cargas no lineales instaladas en los sistemas de distribución, los transformadores están sometidos a otros tipos por lo que sufren nuevas condiciones de operación, la circulación de corrientes armónicas causa calentamiento en los equipos lo que implica reducción de su vida útil. Estos transformadores son diseñados para soportar la carga adicional causada por los niveles de distorsión armónica, su estructura está compuesta por aislamiento de galvánico.

Para implementar este tipo de transformadores es necesario realizar un análisis previo considerando la presencia de armónicos en la red además de revisar el tipo de carga que tiene y así comprobar el valor del factor k de acuerdo a la tabla.1.1, los valores de factor k estandarizados son 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50; los valores que generalmente son utilizados son 4 y 9, el valor 50 se utiliza con cargas súper distorsionadas.

Dependiendo el contenido de armónicos THDi en las redes eléctricas de distribución se busca implementar soluciones, este tipo de transformadores sería útil instalarlos en zonas urbanas debido a que son las que más le afectan las cargas no lineales debido a que los consumidores son más concéntricos y pueden existir diferentes tipos de cargas.

Para las zonas urbanas las cargas armónicas que pueden existir son las causadas por el sistema de iluminación debido a que aún existen zonas donde las lámparas de iluminación

pueden ser fluorescentes las estas inyectan armónicos a la red, por lo que es ideal los planes de mejoramiento de la iluminación instalando lámparas más eficientes.

c. Filtros Armónicos

Cuando se tienen sistemas eléctricos cuyo crecimiento no es muy considerable debido a que suministran cargas industriales o comerciales, este tipo de consumidores tienen demandas casi constantes por lo que se puede identificar los armónicos que generan, con esto se diseñan filtros ideales para esos consumidores, esta solución es recomendada para este tipo de usuarios debido a que sobredimensionar los equipos es una inversión considerable debido a que el número de usuarios beneficiados no es al mismo nivel que con cargas residenciales.

Los filtros son diseñados a partir de elementos como capacitores, inductores y resistencias, se considera el tipo de frecuencia armónica que se desea suprimir, dependiendo el nivel de armónicos presentes en el alimentador se puede realizar un análisis e implementación de filtros en cada fase para reducir las perturbaciones, los filtros que son incluidos en los sistemas eléctricos son los activos de potencia, para el diseño de estos filtros se implementa elementos electrónicos.

Cuando se presentan casos de resonancia se pueden utilizar filtros sintonizantes que se utilizan para evitar la absorción de frecuencias de señalización las que influyen en el flujo de grandes corrientes que afectan a los capacitores que se encargan de sintonizar a los filtros.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se detalla las conclusiones a las que se llegó en el desarrollo de este proyecto además de recomendaciones encontradas que pueden ser de utilidad para posteriores estudios.

4.1. CONCLUSIONES

1. Aplicar algoritmos metaheurísticos a una base de datos basada en mediciones permite un análisis de mayor profundidad y mediante el uso de herramientas tecnológicas se puede identificar algún problema con anticipación.
2. El aumento de cargas no lineales conectadas en las redes eléctricas implica el aumento de perturbaciones que distorsionan la forma de onda del voltaje causando problemas en la operación o daños en los equipos además afectan la calidad del servicio eléctrico.

3. Las mediciones realizadas en los alimentadores para la elaboración de índices de calidad del servicio pero al analizar con mayor profundidad los datos permitiría al sistema anticiparse a alguna falla que puede aparecer causada por la presencia de perturbaciones en el sistema eléctrico de distribución.
4. Identificar oportunamente las zonas en las que existe grandes perturbaciones en la red facilita la pronta implementación de alternativas que mantengan óptimo el sistema eléctrico de distribución.
5. Los entes reguladores son los encargados de establecer los valores adecuados de pérdidas toleradas en el sistema eléctrico para cada una de las etapas, con esto las empresas de distribución eléctrica buscar mejorar el servicio de ofrecen a todos sus clientes.
6. El sistema eléctrico de distribución debe estar en contante monitoreo para identificar los efectos de las perturbaciones en los equipos además de registrar los armónicos presentes para precautelar el correcto funcionamiento del sistema.
7. Los nuevos circuitos eléctricos deben ser diseñados con criterios que permitan reducir los efectos de los armónicos de orden 3er y 5to debido a que son los más comunes en este tipo de usuarios.
8. Para determinar la factibilidad de los resultados encontrados se compara con otros alimentadores buscando coincidencias en los datos resultantes para establecer criterios de horas pico o días de la semana donde se encuentren los mayores casos de armónicos máximos.
9. Existen varios métodos que permiten reducir la presencia de armónicos por lo que se necesita planificar considerando la cantidad de armónicos en el sistema además de considerar el aspecto económico para evitar el exceso de inversión.
10. La alternativa del mejor dimensionamiento de equipos ayuda en la reducción de efectos de los armónicos además de evitar el sobrecalentamiento de los equipos, esta solución es útil ya que se dispone de un sistema eléctrico de distribución que aún está en constante crecimiento.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Las mediciones tomadas en los alimentadores se los realizan utilizando diferentes equipos por lo que se debe realizar el analizar con los datos del mismo tipo y así

evitar errores de apreciación además de realizar un análisis más simplificado de todos los datos.

2. Revisar la base de datos de las mediciones realizadas para determinar los parámetros correctos ya que para el análisis con herramientas computacionales se especifican los caracteres que se van a utilizar evitando los errores por datos analizados.
3. Realizar una revisión constante a los equipos de medición para evitar errores en las mediciones, los valores mal tomados pueden causar errores en los índices de calidad de la energía eléctrica.
4. Limitar el orden de las frecuencias armónicas que registren mediciones nulas para no desperdiciar recursos y tiempo, así se logra llegar a los resultados esperados en un menor tiempo de análisis.
5. De acuerdo al tipo de cargas presentes y los datos de las mediciones realizadas en el sistema de distribución analizado se debe determinar cuál es el método de mitigación apropiado.
6. El tipo de datos tomados del sistema eléctrico puede implicar el uso de algoritmo de optimización, si los datos son aleatorios en diversos parámetros los métodos pueden ser inútiles para un análisis global.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Ramirez Castano, “Redes de Distribución de Energía”, Universidad Nacional de Colombia, Tercera Edición, Manizales, pp 6-12.
- [2] O. R. Jimenez Meza, V. Cantu Gutierrez, A. Conte Enriquez, “Líneas de Transmisión y Distribución Eléctrica”, Universidad Autonoma de Nuevo León, Primera Edición, Abril 2016, pp 37-38.
- [3] G. Venter “Particle Swarm Optimization”, Colorado Springs, Colorado 80906, 2003, Vol 41, pp 1-3.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [5] M. A. Laughton, D. F. Warne, “Electrical Transmission and Distribution, Electrical Engineer’s Reference Book”, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh Pennsylvania, Sixteen Edition, Capitulo 20, 666-675.
- [6] T. A. Short, “Electric Power Distribution Equipment And System”, EPRI Solutions, Inc, : CRC/Taylor & Francis, 2006, pp. 9-12
- [7] F. De La Rosa, “Harmonics and power systems”. Boca Raton, Flor.: CRC/Taylor & Francis, 2006, pp. 2-8.
- [8] Leonard L. Grigsby, “Electric Power Generation, Transmission and Distribution”, Second Edition, Taylor & Francis, 2006, pp. 6-8
- [9] J. Amat Rodrigo, “Optimización por Enjambre de Partículas (Particle Swarm Optimization)”, Abril 2019, [Online] Available https://www.cienciadedatos.net/documentos/py02_optimizacion_pso.
- [10] IEEE Recommended Practice Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159-1995
- [11] J. C. Das, “Power System Analysis Short- Circuit Load Flow and Harmonics”, Headquarters Marcel Dekker Inc., Capitulo 17.
- [12] IEEE Standard Definitions for Power Switchgear, IEEE Std 100-1992

- [13] H. Lee Willis, "Power Distribution Planning", Second Edition, New York, Marcel Dekker Inc, 2004, pp 3-6, 103
- [14] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson, A. R. Wood, "Power System Harmonic Analysis", Chrischurch, New Zealand, John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 1997, pp-1-5, 100-103.
- [15] D. A. Paice, "Power Electronic Converter Harmonics", IEEE PRESS 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, 1995, pp 2-7.
- [16] J. Arrillaga, N. R. Watson, "Power System Harmonics", Second Edition 2003, John Wiley & Sons Ltd, pp 62, 74.
- [17] M. Mikati, M. Santos, C. Armenta, "Modelo y Simulación de una Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica", ELSEVIER, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 9 (2012), pp 267-281.
- [18] Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución, Regulacion No. CONELEC 004/01.
- [19] J. Chavarria M, J. J. Fallas M, "El Algoritmo PSO aplicado al problema de particionamiento de datos cuantitativos", Revista digital Matemática, Educación e Internet, Vol 19, No 1. Agosto – Marzo, 2019, ISSN 1659 -0643, pp 2-5
- [20] R. Eberhart, J. Kennedy, "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory", Sexto Simposio Internacional sobre Micro Máquinas y Ciencias Humanas, Nagoya, Japon, 1995, pp 39-43.
- [21] A. J. Pansini, "Electrical Distribution Engineering", CRC/Taylor & Francis, Fairmont Press, Thirt Edition, 2007, pp 37-46.
- [22] IEEE Standart for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18-2002.
- [23] I. Jadhav, A. Thorat, A. Kamble, A. Agane, "Automatic Sag and Swell Detection and Changeover for Clean Power", International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, Volume 4, ISSN: 2454-132X.
- [24] Calidad del Suministro de la Energía Eléctrica, Revista Electro Industria Soluciones Tecnológicas para la Minería, Energía e Industria, [Online] Available, <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1765&ni=calidad-del-suministro-de-la-energia-electrica-40parte-i41>

[25] Manual y Documentación Python 3, [Online] Available, <https://docs.python.org/es/3/tutorial/index.html>

[26] J. M. Ruiz Torres, "Manual Básico Instalación Python 3", [Online] Available, <http://index-of.co.uk/Programming/Manual%20b%E1sico,%20iniciaci%F3n%20a%20Python%203.pdf>

[27] Imagen Propia.

6. ANEXOS

ANEXO A

Tendencia Completas De Los Alimentadores Analizados En Los Años 2018 – 2019, considerando los límites de tiempo de 24 horas.

Fase 1, año 2018

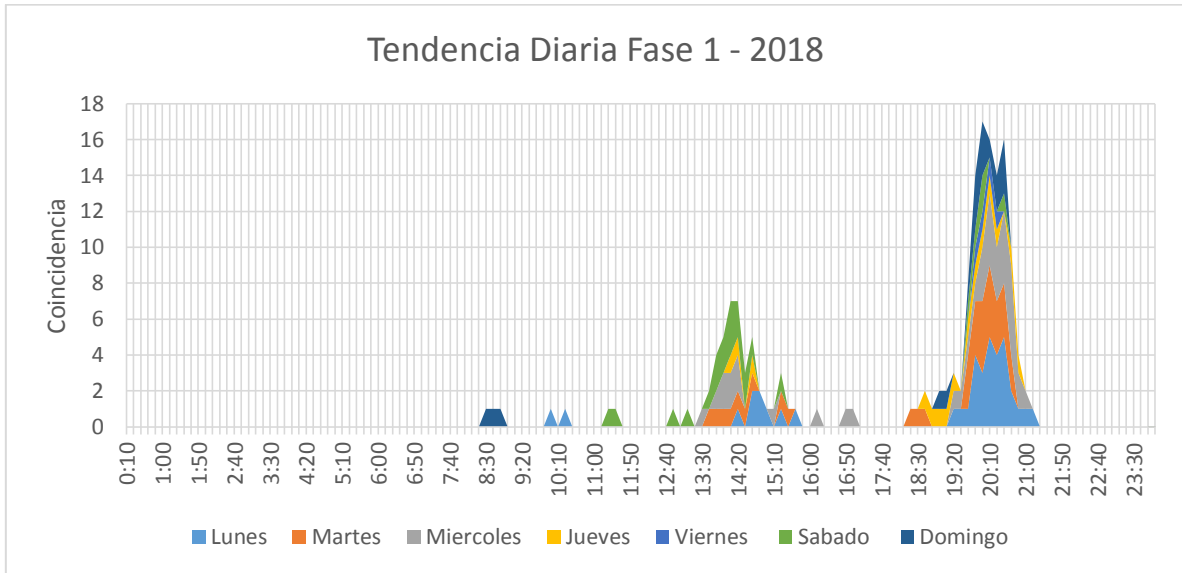


Figura A.1. Tendencia Diaria Fase 1 – 2018 [27]

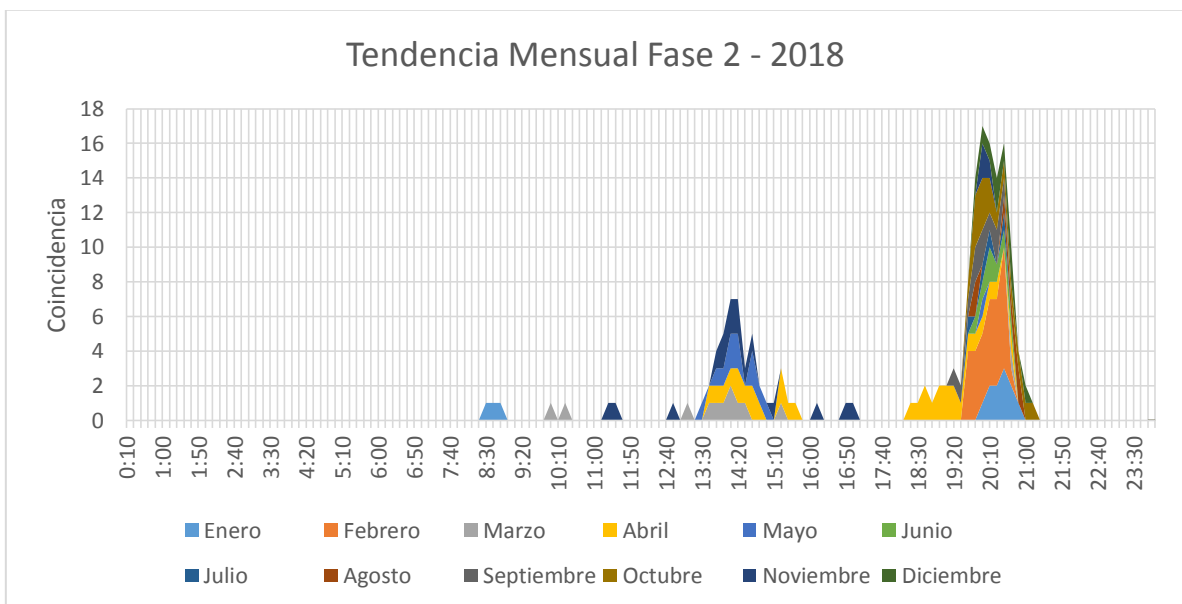


Figura A.2. Tendencia Mensual Fase 1 – 2018 [27]

Fase 2, año 2018



Figura A.3. Tendencia Diaria Fase 2 – 2018 [27]

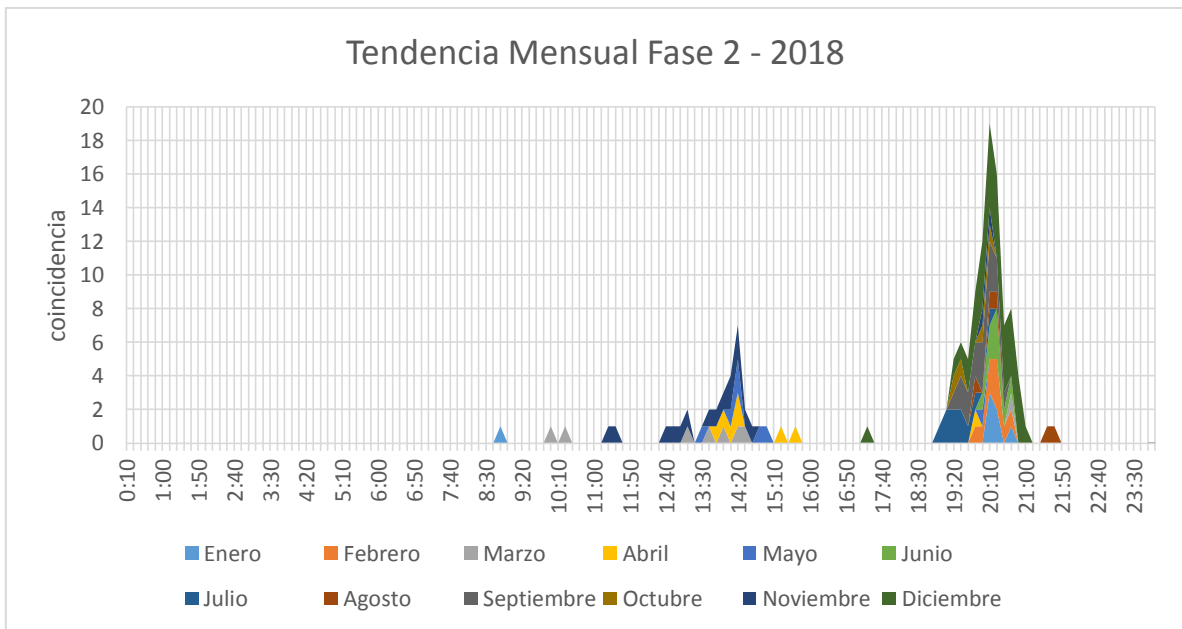


Figura A.4. Tendencia Mensual Fase 2 – 2018 [27]

Fase 1, año 2019.

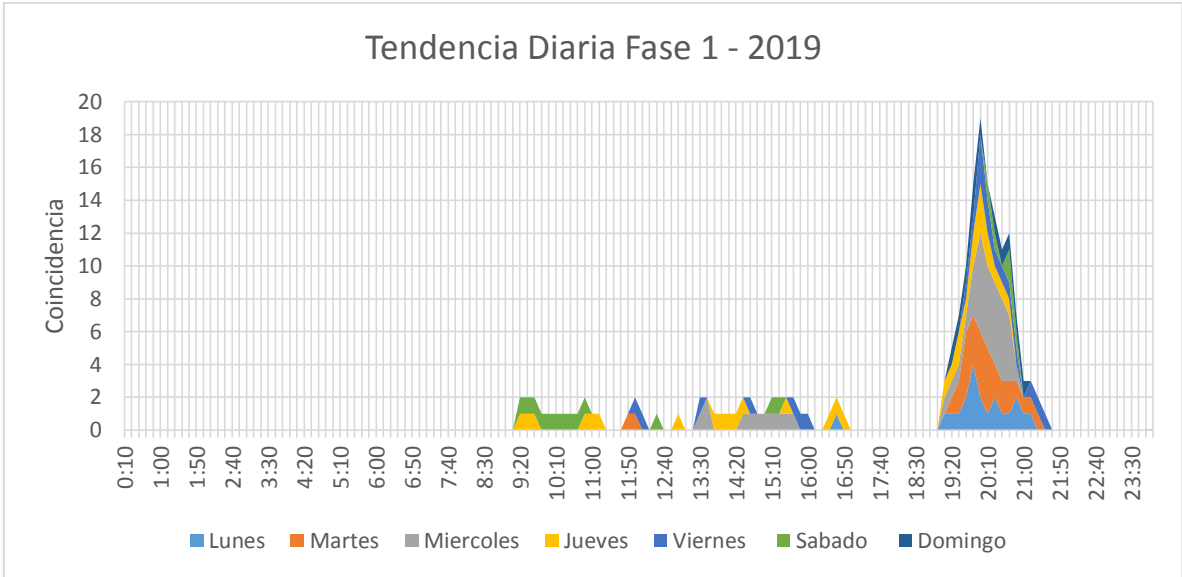


Figura A.5. Tendencia Diaria Fase 1 – 2019. [27]

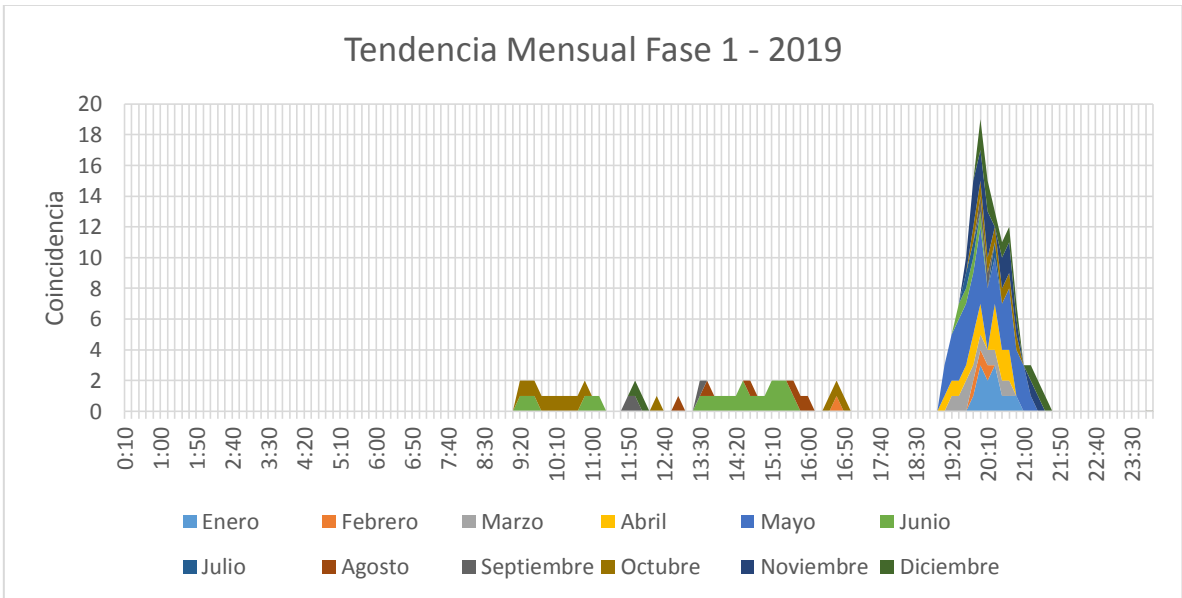


Figura A.6. Tendencia Mensual Fase 1 – 2019 [27]

Fase 2, año 2019

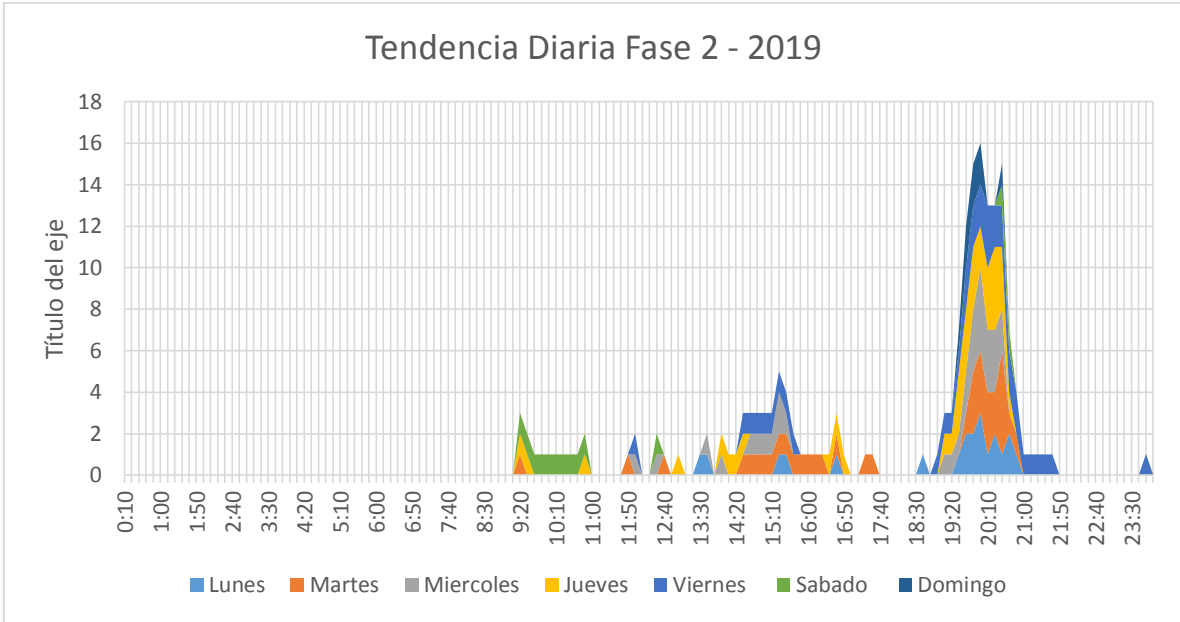


Figura A.7. Tendencia Diaria Fase 2 – 2019 [27]

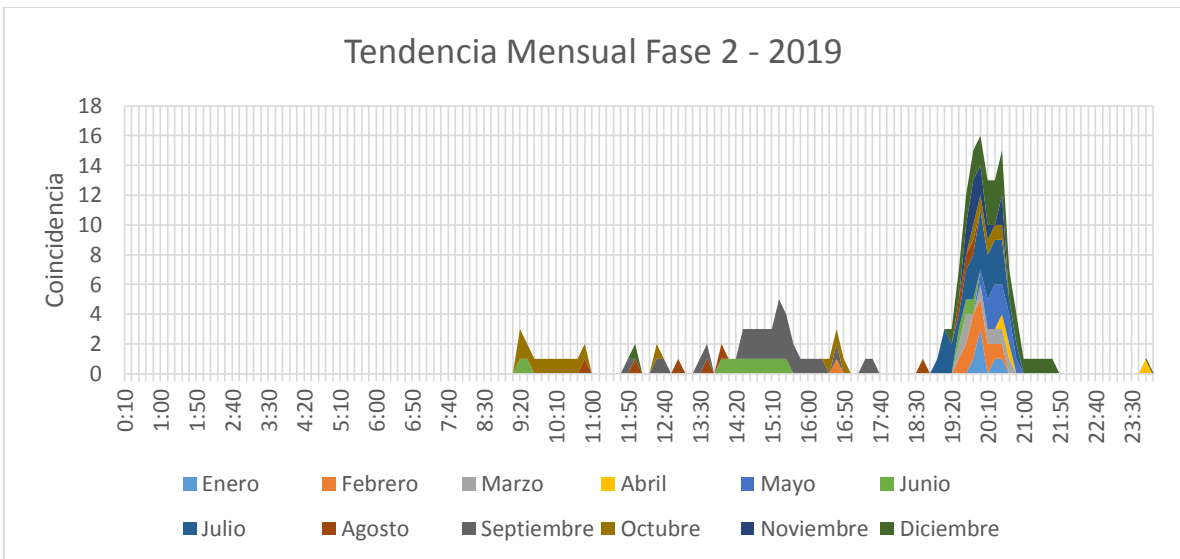


Figura A.8. Tendencia Mensual Fase 2 – 2019 [27]

ANEXO B

Manual De Operación Interfaz Gráfica.

La programación se realizó en el software Spyder en la versión 4.1.4, el lenguaje de programación que utiliza es la versión Python 3.8, la interfaz gráfica esta implementada en el módulo Tkinter, con esto se puede manipular los archivos que se quieren analizar además de establecer los parámetros PSO.



Figura B.1. Ventana Inicial [27]

La figura B.1 indica el formado de la presentación de la interfaz en la que indica los datos más importantes como la institución, el título del proyecto y los datos del desarrollador además del botón comenzar que cambia de pantalla de la ventana de presentación hacia la ventana del proceso en donde se especifica los parámetros del análisis.



Figura B.2. Ventana Asignada para el proceso de análisis. [27]

La figura B.1 muestra el diseño final de la interfaz para el análisis de los alimentadores, esta ventalla se estructura de la siguiente manera.

Parámetros:

1. Este widget permite seleccionar el año en el cual se desea realizar el análisis, se permite seleccionar solo uno a la vez.
2. De acuerdo al año seleccionado se puede escoger al alimentador almacenado en la base de datos que se desea analizar.
3. Como opción interactiva se puede establecer el valor del número de iteraciones y de partículas, datos necesarios para el funcionamiento del algoritmo por enjambre de partículas.
4. En esta sección de la pantalla aparecen los resultados una vez acabado el análisis del alimentador.
5. En este recuadro aparece el nombre del alimentador que está asignado para el análisis.

Botón:

- A. Al presionar este botón se cierra la ventana del proceso y aparece nuevamente la ventana de presentación
- B. Comprueba si está seleccionado un año y algún alimentador correspondiente a ese año para cargarlo al programa previo al análisis, si se ha seleccionado correctamente los datos requeridos aparece el nombre del alimentador seleccionado en el parámetro 5.
- C. Cuando todos los parámetros requeridos están completados, el alimentador está correctamente cargado y los valores necesarios para el algoritmo PSO se especificaron arranca el análisis del alimentador.

El programa está diseñado de tal manera que si algún dato necesario no es completado salta mensajes de alerta detallado el parámetro sin detallar. En valor de máximo armónico total puede salir de color azul o rojo dependiendo si el valor es superior a los límites establecidos por los estándares de calidad de energía.

Realizado el análisis se despliega una ventana emergente con la gráfica en la que detalla los armónicos máximos de cada frecuencia armónica diferentes de cero.

ORDEN DE EMPASTADO