



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE
CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON”**

Proyecto de titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero
Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Oñate Zurita Erik Eduardo

Llamba Lema Álvaro Roberto

Tutor:

Ing. Msc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

Latacunga - Ecuador

Febrero 2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“ Yo Oñate Zurita Erik Eduardo y Llamba Lema Alvaro Roberto declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON”**, siendo el **Ing. Quinatoa Caiza Carlos Iván** tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.


.....
Oñate Zurita Erik Eduardo
Número de C.I. 050402067-8


.....
Llamba Lema Alvaro Roberto
Número de C.I. 050356267-0

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

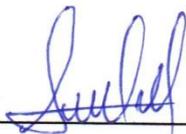
En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON”, de **Oñate Zurita Erik Eduardo y Llamba Lema Alvaro Roberto**, de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de **Ciencias de la Ingeniería y Aplicada** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero 2020

El Tutor

Firma



Nombre: Ing. Quinatoa Caiza Carlos Iván

CC. 0503287864

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la Ingeniería Y Aplicada; por cuanto, los postulantes: Oñate Zurita Erik Eduardo y Llamba Lema Alvaro Roberto con el título de Proyecto de titulación: "DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON", han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 5/02-/2020

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. Wilian Patricio Guamán Cuenca
CC: 060357895-6



Lector 2

Nombre: Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado
CC: 050265642-4



Lector 3

Nombre: Ph.D. Iliana Antonia Gonzalez Palau
CC: 175707065-9

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por cuidarme en cada paso que doy y permitir culminar una etapa más en mi vida.

A mis amigos de la Universidad con los que he compartido alegrías y tristezas, aprendiendo a superarnos día con día. A mi mejor amigo y compañero, que me ha demostrado que la humildad vale más que el oro y que un consejo más que mil palabras.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi que junto con sus maestros han logrado formarme como persona y profesional.

Alvaro Roberto Llamba Lema

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su bondad, amor y fuerza por permitirme cumplir mis metas porque su presencia nunca me dejo solo, a pesar de las adversidades siempre estuvo dándome aliento, “Gracias Señor Jehová, Señor Jesús y Señor Espíritu Santo”.

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas”

Josué 1:9

Agradezco a mi papi Julio Oñate, a mi mami Amparo Zurita, por todas sus enseñanzas de valor, respeto, responsabilidad y fe enseñándome que la palabra de una persona es su firma, por confiar en mí y ser parte de mis existes y fracasos, agradezco por infundiéndome fuerzas nunca perdiendo la fe en Dios y a mi hermanita Nicole por su cariño, dulzura y locuras juntos.

“Hijo mío, obedece el mandamiento de tu padre y no abandones la enseñanza de tu madre.”

Proverbios 6:20

Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas y permitirme cumplir una meta, a mi compañero de tesis porque a pesar de las dificultades Dios nunca nos abandono

Erik Eduardo Oñate Zurita

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi pequeña gran familia.

A mi madre amada Prudencia por guiarme, soportarme y amarme, por mostrarme que la dedicación y el amor que se pone a algo algún día dan frutos.

A mi padre Efraín por enseñarme que la vida no es fácil y que hay que ser un poco duro, terco y constante para poder cumplir los sueños que uno quiere.

A mis dos hermanos Omar y Marlon por darle sentido a mi niñez y juventud, por los recuerdos que valen más que nada y demostrarme que lo imposible cuesta un poco más y que derrotado jamás.

Alvaro Roberto Llamba Lema

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por su amor incondicional y darme fuerzas para seguir en la batalla y encontrar la victoria.

A mis padres y mi hermana por ser amigos, confidentes, por estar junto a mí en las buenas y en las malas por ser parte de mis sueños y planes.

Este trabajo lo dedico a mi novia por su apoyo incondicional, confianza y amor, por su fe en Dios siempre viendo una luz en lo más profundo de un problema.

“El amor es sufrido, es benigno; el amor no tiene envidia, el amor no es jactancioso, no se envanece; no hace nada indebido, no busca lo suyo, no se irrita, no guarda rencor.”

1 Corintios 13:4-5

Erik Eduardo Oñate Zurita

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
4.1. Directos	3
4.2. Indirectos.....	3
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
5.1 Planteamiento del problema	3
5.2 Formulación del Problema	4
6. OBJETIVOS	4
6.1 Objetivo General	4
6.2 Objetivos Específicos	4
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADO	5
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA	6
8.1. Antecedentes	6
8.2. Marco teórico	7
8.2.1. Flujo de carga.....	7
8.2.2. Flujo de carga Armónico	7
8.2.3. Métodos de solución de propagación de armónicos	8
8.2.4. Fuentes de distorsión armónica.....	23
8.2.5. Armónicos.....	29
9. HIPÓTESIS.....	33
10. METODOLOGÍA	33
10.1. Tipo de investigación.....	33
10.1.1. Investigación descriptiva	33

10.1.2. Investigación diagnóstica.....	34
10.1.3. Investigación aplicada	34
10.2. Método de investigación	34
10.2.1. Metodología de la investigación bibliográfica.....	34
10.2.2. Inductivo – deductivo	34
10.2.3. Analítico y sintético.....	35
10.3. Técnicas e instrumentos	35
10.3.1. La observación	35
10.3.2. Simulación	35
10.3.3. Programación	35
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	36
11.1. Estudio de flujos de carga	36
11.2. Problema de flujo de carga en sistemas de distribución	36
11.3. Solución de flujos de carga aplicando el método de Barrido Iterativo	37
11.4. Inicialización del flujo de carga armónico	37
11.5. Descripción del algoritmo para FCA	37
11.6. Modelado armónico de cargas no lineales	38
11.7. Modelado de cargas lineales a frecuencias armónicas.....	39
11.8 Algoritmo de flujo de carga armónica para sistemas radiales de distribución.....	39
11.9. Aplicación del algoritmo para la resolución de flujo de carga armónico en sistemas de distribución radial.....	43
11.9.1. Tres barras.....	43
11.9.2. Cinco barras	46
11.9.3. Ejemplo Ilustrativo	49
12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)	54
13. CONCLUSIONES.....	55
14. RECOMENDACIONES	56

15. BIBLIOGRAFÍA.....	57
16. ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos e incógnitas de la penetración armónica.....	15
Tabla 2: Datos e incógnitas de la penetración armónica iterativa.	17
Tabla 3: Datos del sistema de tres barras.	43
Tabla 4: Resultados del porcentaje de distorsión armónica 3 barras.	44
Tabla 5: Resultados del porcentaje de distorsión armónica en FCA y DIgSILENT.	44
Tabla 6: Error absoluto y relativo de FCA y DIgSILENT.....	44
Tabla 7: Error absoluto y relativo de FCA, EasyPower y SimulAr_SR	45
Tabla 8: Datos del sistema de cinco barras.	46
Tabla 9: Resultados del porcentaje de distorsión armónica 5 barras.	47
Tabla 10: Resultados del porcentaje de distorsión armónica en FCA , DIgSILENT y SimulAr_SR	47
Tabla 11: Error absoluto y relativo de FCA , DIgSILENT y SimulAr_SR	48
Tabla 12: Datos del sistema.....	49
Tabla 13: Datos del sistema completo.	50
Tabla 14: Corrientes obtenido en el Barrido Iterativo	50
Tabla 15: Voltajes obtenidos en el Barrido Iterativo	51
Tabla 16: Corrientes obtenido en el Barrido Iterativo con influencia del armónico 7	51
Tabla 17: Voltajes obtenidos en el Barrido Iterativo con influencia del armónico 7.	52
Tabla 18: Corrientes obtenidos en el Barrido Iterativo fundamental con influencia de la carga.	52
Tabla 19: Corrientes obtenidos en el Barrido Iterativo con influencia de la carga linealizada	53
Tabla 20: Distorsión del armónico 7 y THD.....	53
Tabla 21: Resultados del autor obtenidos con el método de Newton Rapshon – voltajes.....	53
Tabla 22: Resultados del autor obtenidos con el método de Barrido Iterativo – voltajes fundamentales y con linealización.	54
Tabla 23: Resultados del autor obtenidos con el método de Newton Rapshon – corrientes ..	54
Tabla 24: Resultados del autor obtenidos con el método de Barrido Iterativo – corrientes fundamentales y con linealización.	54
Tabla 25: Datos del sistema de 4 barras.....	62
Tabla 26: Datos obtenidos de la resolución del ejemplo propuesto	67
Tabla 27: Datos obtenidos de los niveles de THD del ejemplo propuesto	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Representación de un Flujo de carga.	7
Fig. 2. Flujo de carga armónico.	8
Fig. 3. Estructura del Método de Penetración Armónica.	14
Fig. 4. Estructura del método de penetración armónica iterativa.	16
Fig. 5. Tratamiento del sistema en el AHL.	18
Fig. 6. Corrientes en un sistema de distribución.	21
Fig. 7. Equivalente de red del sistema de distribución.	22
Fig. 8. Modelo de un transformador con taps.	23
Fig. 9. Modelo π de un transformador con taps y cambio de fase.	24
Fig. 10. Modelo de la Línea.	24
Fig. 11. Modelo de cargas.	25
Fig. 12. Modelo simplificado del condensador.	26
Fig. 13. Rectificador trifásico no controlado con filtro capacitivo.	27
Fig. 14. Voltaje y corriente característicos en hornos de arco.	28
Fig. 15. Señal de tensión y corriente medidos en una carga no lineal.	29
Fig. 16. Señal de tensión y corriente medidos en una carga no lineal.	39
Fig. 17. Diagrama de Flujo.	42
Fig. 18. Esquema de 3 barras.	43
Fig. 19. Porcentaje de distorsión armónica Barrido-Newton.	45
Fig. 20. Porcentaje de distorsión armónica en el sistema Barrido-Barrido.	45
Fig. 21. Esquema de 5 barras.	46
Fig. 22. Porcentaje de distorsión armónica en el sistema de 5 barras.	47
Fig. 23. Porcentaje de distorsión armónica en el sistema de 5 barras.	48
Fig. 24. Esquema radia del sistema que se va a utilizar en el análisis.	49
Fig. 25. Sistema de cuatro barras y una carga no lineal.	62

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Ejemplo ilustrativo	62
Anexo II. Tabla de datos propuestos por la IEEE de 35 barras	68
Anexo III. Tabla de corrientes del orden armónico ejemplo IEEE de 35 barras	69
Anexo IV. Histogramas de la corriente con respecto al armónico	70
Anexo V. Tabla de datos de voltajes armónicos del sistema IEEE de 35 barras	73
Anexo VI. Tabla de datos propuestos por la IEEE de 136 barras	74
Anexo VII. Tabla de corrientes armónicas del sistema IEEE de 136 barras	77
Anexo VIII. Hojas de vida de los autores	80
Anexo IX. Sistema de tres barras modelado en DIgSILENT.	83
Anexo X. Sistema de tres barras modelado en SimulAr_SR.	84
Anexo XI. Sistema de cinco barras modelado en SimulAr_SR.	85
Anexo XII. Sistema de cinco barras modelado en SimulAr_SR.	86
Anexo XIII. Sistema de cinco y tres barras modelado en EasyPower.	87
Anexo XIV. Guía Práctica	88

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TEMA: “DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON”.

Autores:

Erik Eduardo Oñate Zurita

Alvaro Roberto Llamba Lema

RESUMEN

En esta investigación se realizó un algoritmo para el estudio de flujo de carga armónica en sistemas radiales de distribución haciendo uso del lenguaje de programación Python, esto permitió realizar un análisis de la penetración de las cargas no lineales ubicadas en distintos nodos de un sistema, con el objetivo de obtener el THDi respectivamente. Para mejorar el aprendizaje y entendimiento del tema, se realizó un estado de arte donde se analizaron los métodos que utilizan en la literatura científica encontrando así Newton Rapson y Gauss Seidel que son aplicados en redes malladas y en programas como; Digsilent, Etap y Cymdis. Aprovechando la topología la red de distribución que casi siempre es radial se hace el uso del método del barrido iterativo, que aplica la primera y segunda ley de Kirchhoff conjuntamente con la matriz primitiva de admitancias para el cálculo de flujo de carga, lo cual permitió obtener corrientes y voltajes que fueron usados para el análisis de la distorsión armónica nodal. Los resultados de las pruebas se compararon con los softwares DIgSILENT, SimulAr_SR y EasyPower demostrando que el método de barrido iterativo aguas arriba y aguas abajo es eficiente y adecuado para el análisis de armónicos en sistemas de distribución radial.

Palabras clave: Flujo Armónico, Radial, Distribución.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF APPLIED AND ENGINEERING SCIENCE

TITLE: “DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE STUDY OF HARMONIC LOAD FLOW FOR RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE”.

Authors:

Erik Eduardo Oñate Zurita

Alvaro Roberto Llamba Lema

ABSTRACT

In this investigation an algorithm was made for the study of harmonic load flow in radial distribution systems using the Python programming language. This allowed an analysis of the penetration of non-linear loads located in different nodes of a system, with the objective of obtaining the THDi percentage respectively. In order to improve the learning and understanding of the subject, a state of the art study was carried out where the methods used in the scientific literature were analyzed, finding Newton Rapson and Gauss Seidel that are applied in meshed networks and in programs such as; Digsilent, Etap and Cymdis. Taking advantage of the topology of the distribution network, which is almost always radial, the iterative scanning method is used, which applies the first and second Kirchhoff's law together with the primitive admittance matrix for the calculation of the load flow, which allowed to obtain currents and voltages that were used for the analysis of the nodal harmonic distortion. The test results were compared with DIGSILENT, SimulAr_SR and EasyPower software demonstrating that the upstream and downstream iterative sweep method is efficient and suitable for harmonic analysis in radial distribution systems.

Keywords: Harmonic Flow, Radial, Distribution.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés de la Carrera de Pedagogía de los Idiomas Nacionales y Extranjeros de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS, OÑATE ZURITA ERIK EDUARDO Y LLAMBA LEMA ÁLVARO ROBERTO**, cuyo título versa “**DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICA PARA SISTEMAS RADIALES DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, febrero del 2020

Atentamente,



Msc. JOSÉ IGNACIO ANDRADE
DOCENTE UTC
C.C. 050310104-0

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:

Desarrollo de un algoritmo para el estudio de flujo de carga armónica para sistemas radiales de distribución mediante el lenguaje de programación Python.

Fecha de inicio:

Octubre _ 2019

Fecha de finalización:

Febrero _ 2020

Lugar de ejecución:

Universidad Técnica de Cotopaxi - Barrio Eloy Alfaro – Latacunga - Cotopaxi, Ecuador

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Proyecto de investigación vinculado: Estudio de armónicos en sistemas eléctricos de distribución radial.

Equipo de trabajo:

Ver hojas de vida **Anexo. 8.**

Área de conocimiento:

Ingeniería, Industria y Construcción Eléctricas.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Los sistemas de distribución presentan alto contenido armónico debido a la presencia de cargas no lineales tales como equipos electrónicos y elementos ferromagnéticos en saturación, la reducción de la distorsión de la forma de onda de voltaje y corriente a niveles aceptables ha sido un problema en el diseño del sistema de energía desde los primeros días de la corriente alterna. El análisis de este tipo de sistemas es el objetivo del flujo armónico de carga. En el presente proyecto de investigación se realiza el desarrollo de un algoritmo específico para sistemas radiales de distribución, mediante el uso del lenguaje de programación Python, el cual utiliza un método rápido para la resolución de flujos de carga armónica radial. El algoritmo computacional está diseñado para el análisis armónico de diferentes estructuras radiales con una cantidad considerable de barras. Donde se aplica la formulación de corrientes con la primera ley de Kirchhoff y voltajes usando la segunda ley de Kirchhoff, las corrientes y voltajes armónicos se formulan en el mismo sistema utilizando el método de penetración armónica en dependencia de las frecuencias..

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los sistemas eléctricos de distribución lidian con una gran variedad de elementos, lineales y no lineales, dentro de los elementos no lineales se destacan los componentes electrónicos, fuentes de alimentación, sistemas de alimentación ininterrumpida, variadores de velocidad, luminarias fluorescentes, etc., que ocupan gran parte del sistema eléctrico de distribución, Por tanto, la presencia de los índices armónicos afecta en el diseño de las redes eléctricas.

En la actualidad, las empresas distribuidoras se encargan de estudiar este fenómeno siendo de gran importancia para los sistemas existentes como para el diseño de nuevos sistemas garantizando un estado de operación adecuado. Dentro de dicho estudio se analiza el comportamiento de los sistemas de distribución frente a cargas no lineales, en este análisis los aspectos más importantes son identificar las deformaciones de la onda de voltaje y corriente de la red, pérdidas de potencia activa y reactiva en los nodos del sistema donde se conectan dichas cargas.

En análisis de este tipo de flujos permiten prevenir eventos no deseados o a conocer lo que puede suceder si se conectan ciertos tipos de carga, y como se vería afectado la vida útil del sistema de distribución, dichos análisis se los realiza mediante el uso de métodos de solución convencionales (Newton Raphson y Gauss Seidel) que utilizan metodología extensas llevando a la resolución compleja de un sistema, otro aspecto es la utilización de algoritmos, softwares

y equipos, los cuales a su vez tienden a tener un precio poco accesible por lo cual deja fuera de incorporarlos en sistemas de estudios técnicos y académicos. Debido a estas razones se hace necesario el estudio del flujo de carga armónico con un método numérico eficaz y rápido, así como la utilización de una herramienta de programación accesible, obligado a desarrollar un algoritmo, para la resolución de flujos de carga armónico en sistemas de distribución con topología radial mediante el uso del lenguaje de programación Python, y utilizando la metodología numérica del barrido iterativo, dicho algoritmo facilitara el análisis del porcentaje de distorsión armónica en las barras el cual nos proporcionara un acercamiento al sistema real.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

4.1. Directos

Los beneficiarios directos de este proyecto de investigación son los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi debido a que ayudará a comprender los efectos producidos por las cargas no lineales presentes en los sistemas de distribución radiales.

4.2. Indirectos

Los beneficiarios indirectos son todos aquellos estudiantes que se inmiscuyan en el estudio de algoritmos para la resolución de flujos de carga en sistemas distribución.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

5.1 Planteamiento del problema

La reciente preocupación resulta del creciente uso de dispositivos electrónicos de potencia y de equipos de carga sensibles a la forma de onda, en el área de distribución la utilización de la energía depende más del suministro con frecuencias y voltajes controlables, mientras que su generación y transmisión se realizan a niveles nominalmente constantes.

Debido la gran cantidad de industrias, el incremento de armónicos se ha convertido en un problema creciente los sistemas de distribución, la mayoría de las cargas industriales conectadas a la red tienen carácter inductivo, es decir equipos de carga no lineal, que generan armónicos de voltaje y corriente y a su vez incrementa las pérdidas de potencia y contaminan las líneas del suministro eléctrico, ocasionando daños y pérdidas económicas para los clientes.

La problemática que implica la existencia de armónicos en la red de distribución ha derivado, por una parte, en el estudio de la calidad en el suministro eléctrico, este proyecto implementa un algoritmo que ayuda a simplificar un flujo de carga complejo y así comprobar qué tan exacto, rápido y económico puede llegar a ser para el sistema eléctrico.

5.2 Formulación del Problema

¿Es importante el estudio de flujo de carga en sistemas radiales de distribución para identificar los porcentajes de distorsión armónica en la red?

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Desarrollar un algoritmo que permita el estudio de flujo de carga armónica para sistemas radiales de distribución mediante el uso de lenguaje de programación Python.

6.2 Objetivos Específicos

- Definir el estado del arte de las principales cargas no lineales y los métodos utilizados para el flujo armónico presentados en la literatura científica.
- Desarrollar un algoritmo de flujo de carga armónico mediante el método de barrido iterativo para identificar los porcentajes de distorsión producidos por la intervención cargas no lineales en los sistemas de distribución radial.
- Modelar los componentes de un sistema eléctrico de distribución y las cargas lineal y no lineal considerando; impedancia constante, corriente constante y potencia constante (ZIP).
- Comparar resultados mediante la utilización de programas destinados a la resolución de flujo de carga armónico aplicado en un sistema de distribución.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADO

Objetivo específico	Actividad	Resultado de la actividad	Técnicas e instrumentos
1. Definir el estado del arte de las principales cargas no lineales y los métodos utilizados para el flujo Armónico presentados en la literatura científica	-Recolección de información otorgada por fuentes de información bibliográfica.	-Determinación del método y cargas del sistema de distribución para el desarrollo del algoritmo.	-Memoria portátil -Documentos varios
2. Desarrollar un algoritmo de flujo de carga armónico mediante el método de barrido iterativo para identificar los porcentajes de distorsión producidos por la intervención de armónicos en los sistemas de distribución radial.	-Desarrollo del diagrama de flujo ocupado en el algoritmo. -Programación del flujo de carga armónico mediante el lenguaje Python.	-Obtención del flujo de carga armónico para sistemas radiales de distribución. -Datos de las distorsiones armónicas de los sistemas analizados	-Programación -Lenguaje Python -Plataforma Spyder
3. Modelar los componentes de un sistema eléctrico de distribución y las cargas lineal y no lineal considerando; impedancia constante, corriente constante y potencia constante (ZIP).	-Identificación del modelamiento del transformador con taps. -Aplicación del método de linealización para modelar cargas no lineales.	-Algoritmo para modelar el transformador. -Corrientes armónicas de las cargas linealizadas.	-Programación -Lenguaje Python -Libro de análisis de armónicos.
4. Comparar resultados mediante la utilización de programas destinados a la resolución de flujo de carga armónico aplicado en un sistema de distribución.	-Simulación en los softwares DIgSILENT, EasyPower y SimuLAR_SR	-Porcentajes de error entre los softwares y el algoritmo desarrollado.	-Simulación -DIgSILENT -EasyPower SimuLAR_SR

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

8.1. Antecedentes

El análisis armónico es una aplicación importante para estudios y diseño de sistemas de distribución, se utiliza para cuantificar la distorsión en las formas de onda de voltaje y corriente, que es causado por cargas no lineales, convertidores, etc., en varias barras para un sistema de distribución para determinar si existe un problema resonante peligroso y cómo se podría disminuir. Por tal motivo el análisis de flujos de carga armónico se ha vuelto cada vez más importante ya que la presencia de equipos electrónicos productores de distorsiones armónicas está en pleno desarrollo. Los estudiantes A. Garcés, y J. Galvis (2004) a través de su publicación “Flujo de Carga Armónico para Sistemas Radiales”, abordaron el estudio de sistemas con cargas no lineales, orientado a respuestas armónicas en función de la frecuencia, donde se presenta un método enfocado hacia los sistemas radiales [1].

Para lo cual se utiliza un algoritmo de barrido iterativo, presentado para sistemas balanceados utilizando modelados de varios elementos del sistema, que se exponen a metodologías que han sido usadas para plantear y resolver problemas de flujo de carga armónico.

No obstante J. Teng y C. Chang (2000) a través de su artículo “Un método de flujo de carga armónico rápido para sistemas de distribución industrial”, aplica técnicas muy generales, las cuales conducen a la disponibilidad de software para formular y solucionar la propagación de armónicos en sistemas de distribución. La técnica ocupada se basa en un método diseñado para ahorrar tiempo computacional, sin importar la estructura de red de los sistemas de distribución. El cual se trata de un barrido hacia adelante y atrás, muy eficiente para evitar el uso de técnicas convencionales como Newton Raphsoy y Gauss Seidel que requieren de la inversión de la matriz Jacobiana y no siempre convergen debido a que su tiempo de compilación es elevado [2].

También existen otros métodos utilizados en la actualidad para la resolución de flujo de carga armónico como el método de escaneo de frecuencia el cual es la más simple y más compleja técnica utilizada individualmente para el análisis armónico. Donde se determina la respuesta armónica del sistema en un nodo a partir del cálculo de su matriz de impedancia. Los Catedraticos, L. Sainz, M. Caro y J. Pedra, realizan una publicación denominada “Estudio de la respuesta armónica del sistema eléctrico” donde se aborda la determinación de matrices de impedancia y presenta una clasificación de dichas matrices de acuerdo con las cargas lineales y no lineales conectadas en el sistema de carga armónico determinadas así por la variación de

la frecuencia. Los resultados se aplican para analizar la respuesta armónica de los sistemas de energía eléctrica en presencia de dispositivos electrónicos en redes de distribución radiales y mallados [3].

8.2. Marco teórico

8.2.1. Flujo de carga

El flujo de carga es una red interconectada complicada que consta de las siguientes secciones principales como se ilustra en la figura 1, consta de una barra de generación, transmisión, su transmisión, líneas de transmisión hasta llegar las cargas.



Fig. 1. Representación de un Flujo de carga.

El problema del flujo de energía eléctrica es el problema más estudiado y documentado en ingeniería de energía. Es el cálculo de la carga de la línea dados los niveles de generación y demanda de P, Q y S medidos en kW, kVAr, kVA, respectivamente, la red de transmisión es casi lineal, y uno podría esperar que el flujo de energía sea un problema lineal.

Los flujos de carga son de gran importancia para la planificación y el diseño de sistemas eléctricos en la expansión de la red, estos ayudan a determinar las condiciones de operación que proporcionan información en magnitud y ángulo de fase que se encuentra en cada barra al publicar la potencia activa y reactiva que fluye a través de cada línea.

8.2.2. Flujo de carga Armónico

Los componentes del sistema de potencia, las cargas y los generadores que producen armónicos de tiempo en una red libre de armónicos se denominan no lineales, un flujo de carga con presencia de armónicos, como se muestra en la figura 2, presenta datos a través de cálculos que permite analizar el sistema de energía eléctrica con el objetivo de encontrar variaciones de voltajes, corrientes, potencia activa y potencia reactiva del sistema las cuales describen su funcionamiento.

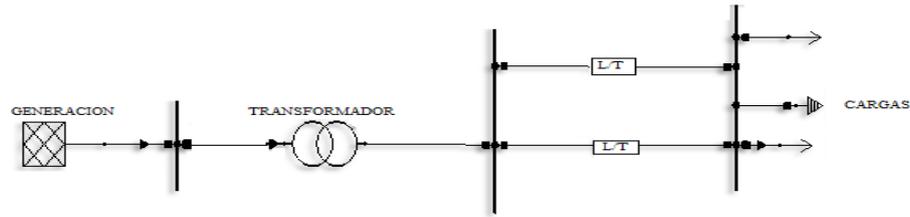


Fig. 2. Flujo de carga armónico.

El análisis de flujos de carga armónico sirve para determinar el impacto de las cargas que producen distorsiones sobre el resto del sistema, principalmente las redes eléctricas de distribución poseen un conjunto de consumidores los cuales poseen cargas, esas cargas producen distorsiones denominados armónicos, los resultados obtenidos con dicho análisis sirven para el diseño de nuevos equipos, cumpliendo estándares de calidad de energía, criterios de funcionamiento, etc. [4].

En el análisis de un flujo de carga armónico se pretende obtener la tensión y corriente fundamenta (nominal) y armónica de toda la red y los parámetros que caracterizan e influyen los equipos y dispositivos no lineales con su potencia activa y reactiva de cada uno de ellos y de los datos obtenidos en dependencia del sistema que se desea analizar determina el comportamiento de la carga y el número de armónico que influye.

Se puede identificar varias soluciones para un flujo de carga armónico, aplicando métodos híbridos entre cálculo armónico y métodos numéricos, los cálculos de dichas incógnitas se analizan de tal forma que se determina la influencia de distorsiones que perjudican al sistema. También existen métodos específicos para lo que son sistemas eléctricos radiales los cuales analizan circuitos primarios y secundarios [5].

El método más común para sistemas de distribución es la aplicación de los barridos iterativos ya colabora en gran manera a desarrollar el análisis de los flujos de carga armónico en redes de distribución, el cual se aborda en esta investigación por su fácil aplicación y rápida compilación para el desarrollo del estudio armónico [1].

8.2.3. Métodos de solución de propagación de armónicos

En la actualidad existen diferentes métodos para el análisis armónico en el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo, se han desarrollado métodos híbridos de dominio de frecuencia y tiempo con el fin de combinar las ventajas individuales de los métodos de dominio de frecuencia y tiempo. Los fundamentos y los principios teóricos de estos métodos se dan a continuación:

- *Dominio de la Frecuencia:* En general, los métodos disponibles para el análisis armónico en ellos dominios de frecuencia se dividen en método directo, análisis armónico iterativo y métodos de flujo de potencia armónico, respectivamente [6].
- *Dominio del Tiempo:* Estos métodos se modelan mediante ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento dinámico del sistema. Por lo tanto se utiliza métodos numéricos y la transformada rápida de Fourier para su solución [7].

8.2.3.1. Métodos en el dominio de la frecuencia

Estos métodos analizan el flujo de carga en un instante determinado de funcionamiento u operación, que representan un estado estable trabajando a partir de dos sub-modelos.

1. El primero es un modelo en frecuencia fundamental, es decir en estado estable.
2. El segundo se modela la red en la frecuencia armónica para identificar el comportamiento de las corrientes armónicas [8].

8.2.3.2. Método Directo

La respuesta de frecuencia del flujo de carga, en un nodo, se obtiene mediante la inyección de una corriente o voltaje en por unidad en pasos de frecuencia discreta para el rango particular de frecuencias, el proceso se basa en la solución de la ecuación de red.

$$[Y] * V = I \quad (8.1)$$

Donde:

[Y]: Matriz de admitancia de barra.

V: Vector de voltaje de nodo.

I : Vector de inyección de corrientes con un solo elemento diferente de cero.

Este método trabaja con bastante precisión para la mayoría de las cargas electrónicas. Sin embargo, la inyección de corriente ideal puede dar resultados erróneos para hornos de arco y convertidores electrónicos en condiciones de resonancia. A su vez la aparición de una resonancia paralela puede causar una reducción significativa en la corriente armónica generada a esa frecuencia. Se pueden usar dos formas alternativas para representar las fuentes armónicas y así minimizar este problema:

1. Se usa la fuente de corriente no ideal y se estima la impedancia de derivación. Esto se aplicaría particularmente a los hornos de arco, ya que la impedancia interna de un

horno de arco no se puede suponer infinita. Los experimentos han sugerido una inductancia L en serie con una resistencia R , definida de la siguiente manera:

$$L = \frac{(X_{LV} + X_{TF})}{\omega} \quad (8.2)$$

$$R = S_N \cos(\phi) 3I_N = \frac{L}{\tan(\phi)} \quad (8.3)$$

Donde:

X_{LV} : Reactancia de la conexión LV del horno

X_{TF} : Inductancia de fuga del transformador del horno

L : Inductancia de cortocircuito del horno calculada para el período de fusión

S_N : Potencia aparente

I_N : Intensidad aparente

Alternativamente, si una capacitancia está conectada muy cerca de la fuente armónica, la impedancia del sistema y las corrientes inyectadas pueden cambiar significativamente [9]. Por lo tanto, las corrientes armónicas producidas deben especificarse junto con la impedancia de derivación o la capacitancia directamente conectada al punto de suministro.

1. Se puede utilizar la fuente de voltaje o el método de reinyección de corriente. Esto consistiría en corregir la corriente armónica estimada inyectada debido a cambios en la impedancia del sistema. Se utiliza el siguiente procedimiento:
 - a. Las corrientes armónicas se especifican asumiendo un sistema de suministro inductivo.
 - b. Los voltajes armónicos se calculan multiplicando las corrientes estimadas por la reactancia inductiva del sistema.
 - c. Las nuevas corrientes se calculan dividiendo los voltajes en (b) por la impedancia real del sistema y se inyectan para realizar el estudio.

Un sistema que contiene voltajes armónicos en algunas barras y las inyecciones de corriente armónica en otras barras pueden resolverse dividiendo la matriz de admitancia y realizando una inversión parcial. Este procedimiento de solución híbrida permite obtener tensiones armónicas de bus desconocidas y corrientes armónicas desconocidas. Si V_k representa las fuentes de voltaje conocidas y la I_k las variables desconocidas, los buses restantes se

representan como una inyección de corriente armónica I_i , que puede ser cero o específico por una fuente de corriente armónica. El vector de voltaje armónico V_i representa las variables desconocidas.

La partición de la ecuación matricial para separar los dos tipos de nodos da:

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ik} \\ Y_{ki} & Y_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

El vector de voltaje desconocido V_i se obtiene de:

$$[Y_{ii}] \cdot V_i = I_i - [Y_{ik}] \cdot V_k \quad (8.5)$$

Las corrientes armónicas inyectadas por las fuentes de tensión armónica se calculan como:

$$I_k = [Y_{ki}] \cdot V_i + [Y_{kk}] \cdot V_k \quad (8.6)$$

Se requiere un paso adicional para obtener la reducción matriz de admisión, que no es el resultado de la solución.

Se ha propuesto una técnica orientada a la dispersión para la solución de redes no lineales con excitación híbrida de voltaje y corriente para el análisis armónico. Es utilizado en redes con pocas cargas que inyectan corrientes armónicas, siendo una buena aproximación a la condición de un sistema. Sin embargo, en sistemas con varias fuentes de distorsión este método es poco recomendado por el exceso de corrientes armónicas [10].

8.2.3.3. Análisis Armónico Iterativo (AAI)

El Análisis Armónico Iterativo se basa en el siguiente proceso iterativo de las sustituciones secuenciales tipo Gauss:

- El dispositivo productor de armónicos se modela como una fuente de corriente dependiente de la tensión de alimentación, representada en cada iteración por una fuente de corriente armónica fija.
- El problema se resuelve primero usando un voltaje de suministro estimado para obtener las corrientes armónicas, a su vez, las corrientes armónicas se utilizan para obtener los voltajes armónicos.
- Estos voltajes armónicos permiten el cálculo de corrientes armónicas más precisas, el proceso de solución iterativa se detiene una vez que los cambios en las corrientes armónicas son lo suficientemente pequeños.

Las condiciones distorsionadas y no distorsionadas se pueden manejar con este método. Una de las principales ventajas del método AAI es que los componentes de la red eléctrica se pueden modelar de forma cerrada, con simulación en el dominio del tiempo. Sin embargo, la característica de convergencia es lenta y estrecha.

El margen de estabilidad de la AAI ha limitado su aplicación a la solución de sistemas de potencia prácticos. Para asegurar la convergencia, se requiere el dominio numérico diagonal de la matriz de parámetros del sistema, sin embargo, esta no es una condición satisfecha por sistemas débiles o pobremente amortiguados o frecuencias resonantes muy afinadas [11].

8.2.3.4. Método de Flujo de Energía Armónica (FEA)

El método FEA tiene en cuenta la naturaleza dependiente de la tensión de los componentes de potencia, en general, la tensión y la corriente armónica las ecuaciones se resuelven simultáneamente usando el método de Newton. Un marco de referencia general donde los nodos, las fases, el desequilibrio de fases, los componentes lineales, no lineales y variables en el tiempo, los armónicos y los efectos de acoplamiento cruzado armónico se representan explícitamente y se resuelven de manera iterativa de manera unificada.

La solución se basa en un proceso de linealización en torno a un punto de operación particular, esta es una condición válida solo en un cierto punto de operación, el proceso de linealización da como resultado un equivalente armónico de Norton donde el desequilibrio de fase y los efectos de acoplamiento cruzado armónico se representan explícitamente, esto dependencia al tamaño del flujo de carga a analizar y al número de armónicos a determinar el sistema de convergencia es más robusto.

Los pasos principales del proceso de solución son los siguientes:

1. Resolver el flujo de potencia en estado estable a frecuencia fundamental 60Hz o 50Hz.
2. Construir la matriz de admitancias de barra para todas las frecuencias en las cuales se inmiscuyen las frecuencias armónicas.
3. Linealizar cada componente para valores cercanos a un punto de operación I_b y V_b como se establece en las siguientes ecuaciones.

$$\Delta V = V - V_b \quad (8.7)$$

$$\Delta I = I - I_b \quad (8.8)$$

Para cada función no lineal, la ecuación linealizada queda expresada como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\Delta I = [F] \cdot \Delta V \quad (8.9)$$

Siendo $[F]$ el Jacobiano que relaciona voltajes y corrientes, cuya estructura es igual al de una matriz de Toeplitz¹ [12].

$$[F] = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \cdot & \cdot & a_{-(n-1)} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_2 & a_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{-2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{-1} \\ a_{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_0 \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

Al sustituir (8.7) y (8.8) en (8.9) nos da:

$$I = [F] \cdot V + I_N \quad (8.11)$$

Dónde:

$$I_N = I_b - [F] \cdot V_b \quad (8.12)$$

4. La ecuación (8.11) puede interpretarse como un equivalente de Norton armónico para el componente no lineal y representa el proceso de linealización en el dominio armónico que se establece como un vector equivalente, que resulta algo robusta y que tiene buen carácter de convergencia, además se puede inmiscuir varios componentes.
5. Combine redes lineales y linealizadas, en la representación unificada para todo el sistema, es decir:

$$\Delta I = [Y_j] \cdot \Delta V \quad (8.13)$$

Dónde:

ΔI : Es el vector de corrientes incrementales que tienen la contribución de componentes no lineales.

ΔV : Es el vector de voltajes incrementales.

$[Y_j]$: Es matriz de admitancia de componentes lineales y no lineales. Los componentes posteriores están representados en cada caso por el equivalente armónico de Norton calculado en la ecuación (8.11).

6. Resuelva el sistema linealizado completo para calcular voltajes armónicos.

¹ Matriz de Toeplitz, es una matriz cuadrada en la que los elementos de sus diagonales (de izquierda a derecha)

7. Verificar si se cumple el criterio de convergencia; si está hecho, proceda con la salida de resultados; de lo contrario, reinicie desde el paso 3. Esta es una metodología numéricamente sólida que tiene, además, buenas propiedades de convergencia.

8.2.3.5. Método de Penetración Armónica (PH)

La formulación más simple presente en la literatura es la correspondiente a la penetración armónica (HP, *Harmonic Penetration*), que funciona con la hipótesis de no considerar la interacción armónica entre la red y los dispositivos no lineales, es decir, se considera que el voltaje armónico no influya en el comportamiento del dispositivo no lineal. Obviamente, en esta formulación, el hecho de no considerar la interacción red-NLD² se extiende a la definición de potencia. Por lo tanto, para un nodo y cualquiera de los sistemas, $S_i = V_i^1 \cdot (I_i^1)^*$, donde V_i^1 e I_i^1 son el voltaje y la intensidad fundamentales de ese nodo. La hipótesis de la no interacción permite abordar el modelado de dispositivos no lineales que se refieren a su comportamiento que solo depende de las tensiones fundamentales y sus datos, lo que facilita su conexión con el flujo de cargas convencionales, lo que resulta en el flujo de carga convencional modificado (CLFm, *Modified Conventional Load Flow*) [13].

Una vez que se ha incluido el estado del sistema, incluyendo los dispositivos no lineales presentes en él, los voltajes armónicos se pueden calcular utilizando el método de nodo (VN³, *Voltage Nodes method*) método de voltaje nodal a partir de la matriz de admitancias que caracteriza todas las cargas pasivas de red, Y_{Bm}^h , y la inyección de intensidades armónicas de dispositivos no lineales [14]. El proceso se refleja en la figura 3.

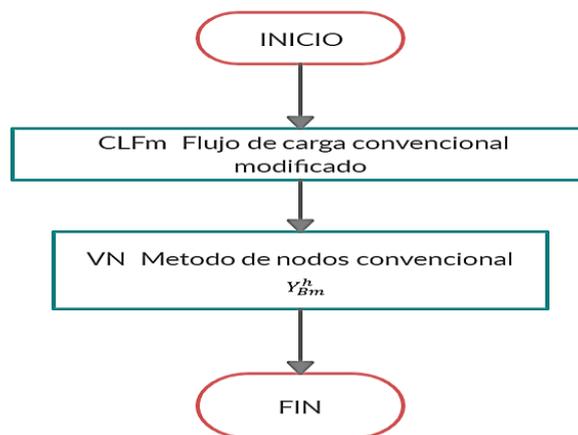


Fig. 3. Estructura del Método de Penetración Armónica.

² NLD, (*Non Linear Devices*), Dispositivos no lineales.

³ VN³, *Voltage Nodes method*, Metodo de nodos convencional

Los datos e incógnitas del método de penetración armónica para un sistema de n nodos y h_m armónicos (ver tabla 1),

Tabla 1: Datos e incógnitas de la penetración armónica

	Nodos	TIPO	DATOS	INCÓGNITAS	Nº INCÓGNITAS
CLFm	1	SLACK	V_1^1		0
	2 a g	PV	P_i, U_i	V_i^1	$2*(g-1)$
	g+1ac	PQ	P_i, Q_i	V_i^1	$2*(c-1)$
	c+ a n	NLD	$\beta_i^1, \dots, \beta_i^r$	$V_i^1, \beta_i^1, \dots, \beta_i^r$	$(2+r)*(n-c)$
VN	1	SLACK	X_1	V_i^h	$2*hm$
	2 a g	PV	X_i	V_i^h	$2*hm *(g-1)$
	g+1ac	PQ	Y_i^h	V_i^h	$2*hm *(c-g)$
	c+ a n	NLD	I_i^h	V_i^h	$2*hm *(n-c)$

Fuente: Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas [14].

Donde:

X_1 y X_i con $i=2, \dots, g$ son las reactancias a la frecuencia fundamental de los generadores de los nodos Slack y PV.

El flujo de cargas convencionales modificadas se basa en la resolución del sistema de ecuaciones formado por:

- Las condiciones impuestas por los nodos PV y PQ (14 y 15).

$$P_i = Re \left\{ V_i^1 \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij}^1 V_j^1 \right) \right\} ; U_i = V_i^1 (i = 2, \dots, g) \quad (8.14)$$

- Las condiciones impuestas por los nodos PQ son:

$$S_i = \left\{ V_i^1 \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij}^1 V_j^1 \right) \right\} ; (i = g + 1, \dots, c) \quad (8.15)$$

Donde:

- Y_{ij}^1 : Es el elemento de la matriz de admitancias fundamentales de la red, Y_B^1
- Los equilibrios de potencia en los nodos no lineales (8.15), $S_i = V_i^1 \cdot (I_i^1)^*$ y la corriente fundamental consumida por los dispositivos no lineales puede modificarse

mediante una función que depende de la tensión fundamental del nodo de suministro y los parámetros del dispositivo [13].

8.2.3.6. Penetración Armónica Iterativa

La penetración armónica iterativa (IHP, *Iterative Harmonic Penetration*) es una modificación del método singular de penetración armónica que toma en consideración la influencia de los armónicos en el comportamiento de los dispositivos no lineales [15]. Cada uno de estos métodos PH e IHP, tienen la misma estructura, pero el método VN se complementa un análisis armónico iterativo, (IHA⁴, *Iterative Harmonic Analysis*) se considera la interacción armónica del sistema como se muestra en la figura 4, donde se introduce información se soluciona el flujo de carga convencional, luego se realiza el análisis de la penetración armónica y se analiza los voltajes nodales en dependencia del armónico al cual se expone.

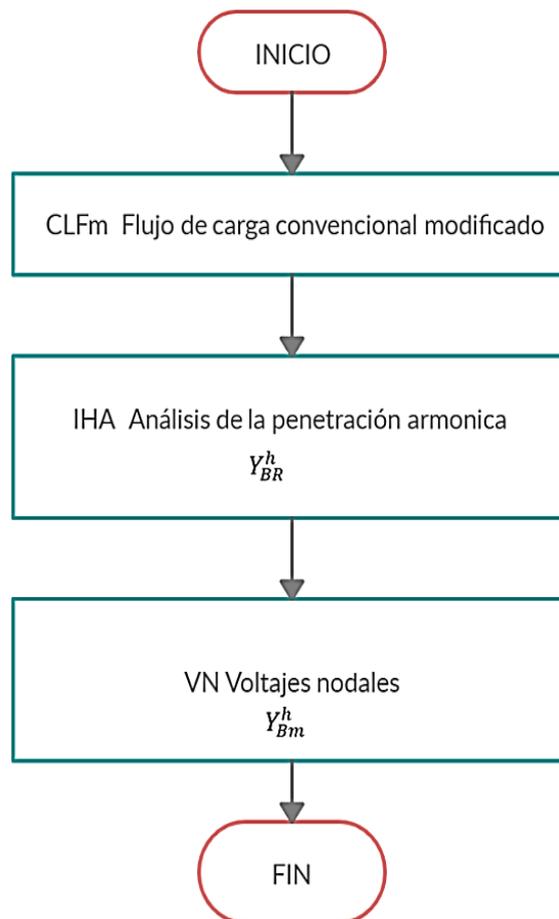


Fig. 4. Estructura del método de penetración armónica iterativa.

Los datos e incógnitas correspondientes al procedimiento de la penetración armónica iterativa, para un sistema de n nodos y h_m armónicos, se representan a continuación, ver tabla 2.

⁴ IHA, *Iterative Harmonic Analysis*, análisis armónico iterativo

Tabla 2: Datos e incógnitas de la penetración armónica iterativa.

	Nodos	TIPO	DATOS	INCÓGNITAS	N° INCÓGNITAS
CLFm	1	SLACK	V_1^1		0
	2 a g	PV	P_i, U_i	V_i^1	$2*(g-1)$
	g+1ac	PQ	P_i, Q_i	V_i^1	$2*(c-1)$
	c+ a n	NLD	B_i^1, \dots, B_i^r	$V_i^1, B_i^1, \dots, B_i^r$	$(2+r)*(n-c)$
AHÍ	1	SLACK	X_1		0
	2 a g	PV	X_i		0
	g+1 a c	PQ	Y_i^h		0
	c+ 1 a n	NLD	$V_i^1, B_i^1, \dots, B_i^r$	$V_i^h, B_i^1, \dots, B_i^r$	$(2*h_m+r)*(n-c)$
VN	1	SLACK	X_1	V_1^h	$2*hm$
	2 a g	PV	X_i	V_i^h	$2*hm*(g-1)$
	g+1ac	PQ	Y_i^h	V_i^h	$2*hm*(c-g)$
	c+ a n	NLD	I_i^h		0

Fuente: Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas [14].

Este flujo de carga convencional modificado, CLFm, es el mismo utilizado en la metodología de la penetración armónica y proporciona las tensiones fundamentales de los nodos de la red y los parámetros de los dispositivos no lineales, sin tener en cuenta la interacción armónica.

Este método de análisis armónico iterativo, primero reduce los nodos no lineales desde la solución del CLFm para luego determinar la distinción armónica en dichos nodos y el comportamiento de las cargas no lineales, NLD, bajo la consideración que dice que las tensiones armónicas influyen en el comportamiento de dichas cargas [1].

De esta manera una vez que se obtiene la solución del CLFm, los generadores de los nodos PV se sustituyen por reactancias, y las cargas correspondientes a los nodos PQ por sus impedancias, del mismo modo que en la penetración armónica. Debido a la hipótesis que se plantea la potencia fundamental se puede incorporar admitancias armónicas a la matriz general inicial de la red Y_B^h , para formar la matriz Y_{Bm}^h .

Luego de realizar este proceso, el sistema se reduce a nodos no lineales, figura 4, mediante la eliminación Gaussiana de la matriz de admitancias modificada a la parte lineal del sistema, obteniendo la matriz Y_{BR}^h . Este proceso permite obtener el sistema con nodos donde se encuentran conectados dispositivos no lineales $i = c + 1, \dots, n$.

Debido a que en su gran mayoría los sistemas de distribución radial son sistemas que contienen netamente cargas a base de elementos electrónicos este método es adecuado, pero con más simpleza el método de penetración armónica normal es mucho más sencilla de estudiar debido a que se puede ingresar cargas a partir de la inyección de corriente en

dependencia del sistema a analizar sin la necesidad de buscar iterativamente donde se puede proyectar una carga que afecte al sistema de carga.

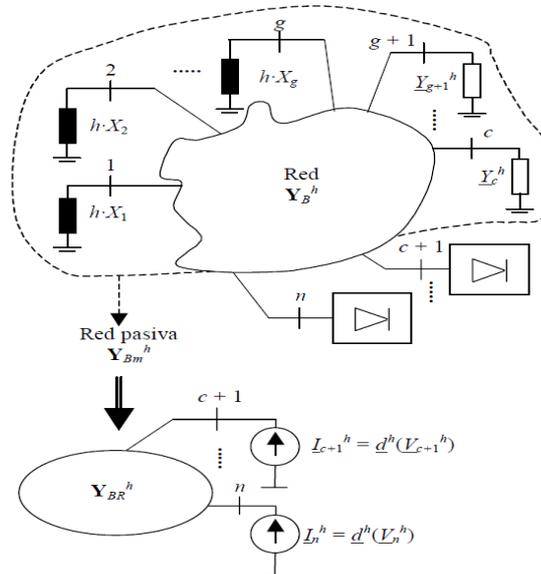


Fig. 5. Tratamiento del sistema en el AHI.

Fuente: Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas [14].

Este método iterativo obtiene valores de las incógnitas mediante el algoritmo de Gauss-Seidel (GS). Esto quiere decir que, se obtienen valores de tensiones para cada iteración δ , y los últimos valores obtenidos por cada iteración armónica $(V_i^h)^\delta$ son usados para actualizar el estado de los dispositivos no lineales $(\beta_i^j)^\delta$ con $j=1, \dots, r$, y las corrientes en la red que representa la ecuación (16), es decir,

$$(I_i^k)^\delta = d^k(V_i^1, (V_i^h)^\delta, \beta_i^j) = d^k((V_i^h)^\delta) \quad (8.16)$$

Las corrientes que se obtienen permiten los cálculos de las tensiones armónicas en cada uno de los nodos no lineales para cada una de las iteraciones:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{c+1}^h \\ \dots \\ \underline{V}_n^h \end{bmatrix} = (\underline{Y}_{BR}^h)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{c+1}^h \\ \dots \\ \underline{I}_n^h \end{bmatrix} + (\underline{Y}_{BR}^h)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{d}^h(\underline{V}_{c+1}^h) \\ \dots \\ \underline{d}^h(\underline{V}_n^h) \end{bmatrix}^\delta \quad (8.17)$$

Luego de haber caracterizado el comportamiento de los dispositivos no lineales se conocen sus tensiones inyectadas, resolución del AHI, se aplica el método de los nodos para obtener las corrientes armónicas en sus respectivos nodos $I_B^h = Y_{Bm}^h \cdot U_B^h$.

La iteración armónica como se menciona en [6], requiere la obtención de ecuaciones no lineales de balance de armónicos entre la red lineal y el perturbador. Estas ecuaciones deben

permitir obtener las intensidades armónicas en función de las tensiones de la red y cada uno de los parámetros de control de las cargas no lineales.

8.2.3.7. Método de Barrido Iterativo

El método de barrido iterativo se basa en las leyes de Kirchhoff y la ley de Ohm. El barrido iterativo de corriente se lo realiza aplicando la primera ley de Kirchhoff que se basa en un barrido aguas arriba en cada línea hallando los flujos de corriente. Mientras que en el barrido de voltajes se aplica la segunda ley de Kirchhoff aguas abajo hallando las tensiones nodo a nodo [16].

Las leyes fundamentales de circuitos para el método de barrido iterativo son expresadas de la siguiente manera:

- Primera ley de Kirchhoff.

$$I_N = [A] \cdot I_B \quad (8.18)$$

- Segunda ley de Kirchhoff.

$$V_B = [A]^T \cdot V_N \quad (8.19)$$

- Relación tensión corriente.

$$I_B = [Y_B] \cdot V_B \quad (8.20)$$

Donde:

Y_B : Vector de admitancia de las ramas

V_B : Vector de tensión por las ramas

V_n : Vector de tensiones nodales

I_N : Vector de inyección de corrientes

A : Incidencia nodal

Usando las ecuaciones (8.18), (8.19) y (8.20) se obtiene:

$$[A] \cdot [Y_B] \cdot [A]^T \cdot V_N = I_N \quad (8.21)$$

Si el sistema está correctamente ordenado. La ecuación (8.21) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$[A_{N-1}] \cdot [Y_B] \cdot [A_0^T \dots A_{N-1}^T] \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_{N-1} \end{bmatrix} = I_{N-1} \quad (8.22)$$

La matriz $[A]$ tiene un tamaño de $\{N \times B\}$ donde B es el número de tramos de la red del sistema. Para el caso de sistemas radiales $B = N-1$, implicando lo anterior la matriz A_{N-1} es cuadrada.

La matriz $[A]$ se crea de tal forma que en un tramo de red orientado se pondrá un 1 al nodo de envío y un -1 al nodo de recibo. Por lo tanto, cada columna tendrá solo dos valores diferentes de cero ± 1 . Por ese motivo la suma de sus elementos es igual a cero como se muestra a continuación:

$$[A_0^T] + [A_{N-1}^T] \cdot \ell_{N-1} = 0 \quad (8.23)$$

Donde

- e_{N-1} es el vector columna cuyos elementos son iguales a 1.

La característica de la ecuación (8.23) permite reescribir la ecuación (8.22) de la siguiente manera:

$$[A_{N-1}] \cdot [Y_B] \cdot [A_0^T \dots A_{N-1}^T] \cdot (V_N - V_0 \cdot \ell_{N-1}) = I_{N-1} \quad (8.24)$$

La matriz $[Y_{Bus}]$ se puede definir como $A_{N-1} * Y_B * A_{N-1}^T$, por lo tanto (8.24) puede ser separada en dos ecuaciones para solucionar el flujo de carga armónico de la siguiente manera:

$$[A_{N-1}] \cdot I_B = I_{N-1} \quad (8.25)$$

$$[Y_B] \cdot [A_{N-1}^T] \cdot (V_N - V_0 \cdot \ell_{N-1}) = I_B \quad (8.26)$$

Si se soluciona la ecuación (8.25) es realizar un barrido hacia arriba por lo tanto se obtiene las corrientes en cada uno de los nodos y resolver la ecuación (8.26) permite realizar un barrido hacia abajo que de esto se obtiene las tensiones. Estas dos ecuaciones son base del algoritmo de barrido iterativo que consta en la aplicación de las dos leyes de Kirchhoff [17], [16].

a. Barrido de corrientes

Las líneas se modelan inicialmente a través de su equivalente serie. Esto permite calcular las corriente por las líneas superiores a partir de las corrientes por las líneas inferiores y la carga disponible correspondiente, insertando un voltaje nodal inicial en la barra slack, para calcular cada una de las inyecciones de corrientes nodales [18].

Según el método aplicado se formula de la siguiente manera permitiendo obtener las corrientes en dependencia de los armónicos formulándolos de la siguiente manera:

Para las cargas modeladas como potencia constante:

$$I = \left(\frac{P + j \cdot Q}{V} \right)^* \quad (8.27)$$

Para las cargas modeladas como impedancias constantes:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (8.28)$$

Después de conocer cada una de las corrientes nodales se puede determinar los flujos de corriente por las líneas.

$$I_k = I_{CK} + \sum_{i \in \Omega_k} (I_{ik}) \quad (8.29)$$

Donde:

I_k : Corriente por la línea k

I_{CK} : Corriente en el nodo de recibo de la línea k

I_{ik} : Corriente de la línea i que está conectada al nodo de recibo de la línea k

k : Índice de cada una de las líneas del sistema

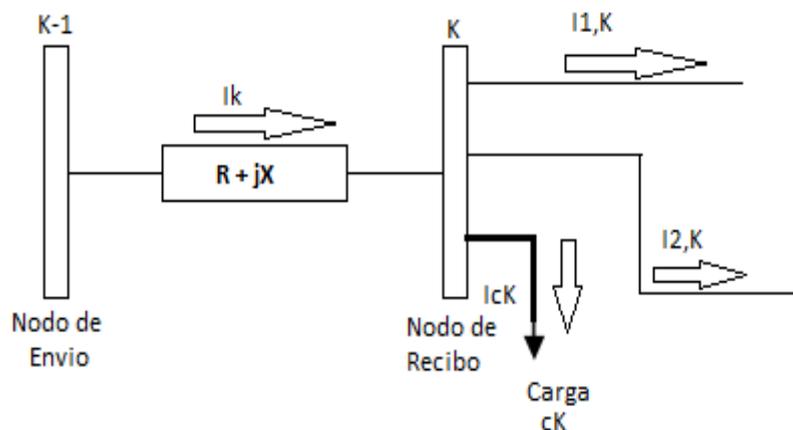


Fig. 6. Corrientes en un sistema de distribución.

Fuente: Estudio comparativo de flujo en sistemas de distribución [18].

Si se desea aplicar el modelo completo (modelo π), se adiciona el efecto capacitivo a través de una admitancia en paralelo conectada en cada lado de la línea. Estas se pueden modelar como impedancias constantes de forma análoga a la carga.

b. Actualización del Nodo Slack

Cuando las corrientes en cada uno de los nodos han sido actualizadas se debe corregir el valor de voltaje en el nodo fuente es decir en el nodo Slack. Las corrientes en el nodo Slack es la

suma de las corrientes en todos los elementos del sistema analizado, su valor se obtiene luego de realizar el barrido hacia arriba, con dicho barrido se puede iniciar el barrido de voltajes.

$$V_o = V_{th} - I_{th} \cdot Z_{th} \quad (8.30)$$

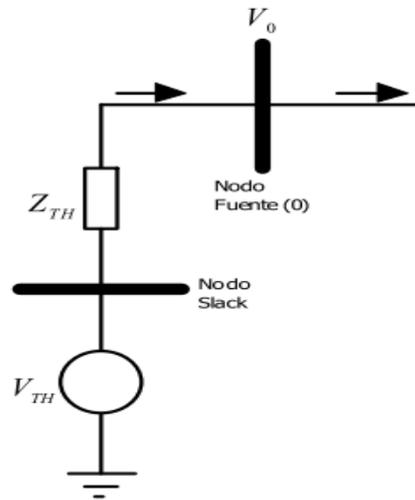


Fig. 7. Equivalente de red del sistema de distribución.

Fuente: Estudio comparativo de flujo en sistemas de distribución [18].

Donde V_{th} , I_{th} y Z_{th} son valores de voltaje, corriente e impedancia de Thevenin respectivamente.

c. Barrido de Voltajes

Ya conocido la tensión en el nodo Slack se calcula las demás tensiones inferiores, utilizando el ordenamiento nodal, aplicando la siguiente ecuación:

$$V_k = V_{k-1} - I_k \cdot (R_k + j \cdot X_k) \quad (8.31)$$

La cual permite conocer el valor de la tensión en cada uno de los nodos inferiores (k), para la cual es necesario realizar el barrido de corrientes, aguas arriba [19].

8.2.3.8. Métodos en el Dominio del Tiempo

Este método utiliza elementos del sistema de distribución modelados mediante ecuaciones diferenciales, que representan el comportamiento dinámico. Este conjunto de ecuaciones es no lineal, por lo tanto, se requieren de métodos numéricos y la transformada de Fourier para su resolución, los métodos más comunes analizan las variables de estado y análisis nodal.

El método variable de estado se fue utilizado por primera vez para el análisis de convertidores de potencia AC-DC. En cambio, el análisis nodal es eficiente para el estudio de transitorios electromagnéticos [20].

8.2.4. Fuentes de distorsión armónica

8.2.4.1. Modelación de componentes del sistema eléctrico de distribución

El modelamiento adecuado de los sistemas radiales de distribución garantiza que los métodos de análisis de flujo utilizados proporcionen datos realistas con errores mínimos, tomando en consideración a la realidad. Un modelamiento completo con cada uno de los elementos presentes en un sistema de distribución, garantiza mayor exactitud pero dificulta la solución, desde el punto de vista computacional, por otra parte modelos simples conllevan a resultados erróneos [21].

8.2.4.2. Transformadores

El modelo del transformador con cambiadores de fase n_1 y n_2 e impedancias a los lados del alto voltaje y bajo voltaje z_1 y z_2 como se muestra en la figura 8. En los sistemas de distribución los transformadores cumplen la función de controlar los niveles de voltaje y esto a su vez permite el control del flujo de potencia activa y reactiva que intervienen debido a las cargas y diferentes dispositivos del flujo de carga.

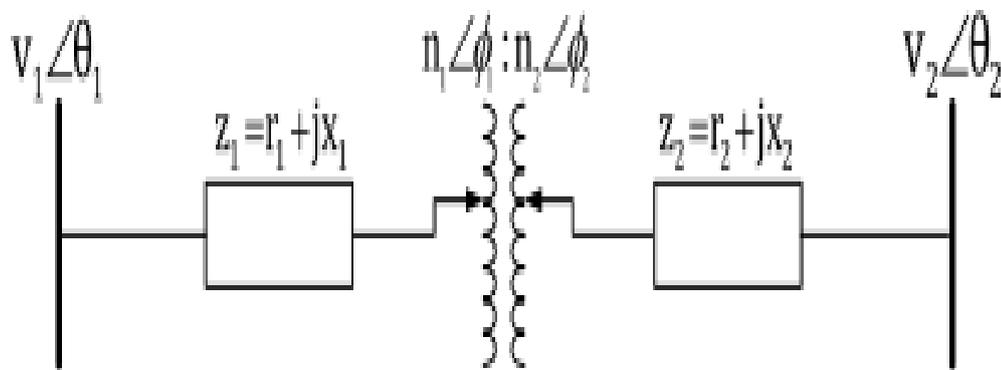


Fig. 8. Modelo de un transformador con taps.

Fuente: Flujo de potencia de armónicos utilizando Matlab [22].

Para resolver el flujo de carga a frecuencia fundamental se utiliza al transformador considerado como modelo π del transformador, el cual presenta una impedancia serie y unas dos admitancias en paralelo, todas estas dependientes de la posición de los taps del transformador.

En la figura 9, se muestra el modelo π de un transformador con taps y cambiadores de fase donde se puede determinar la reactancia del mismo, en dependencia de la frecuencia.

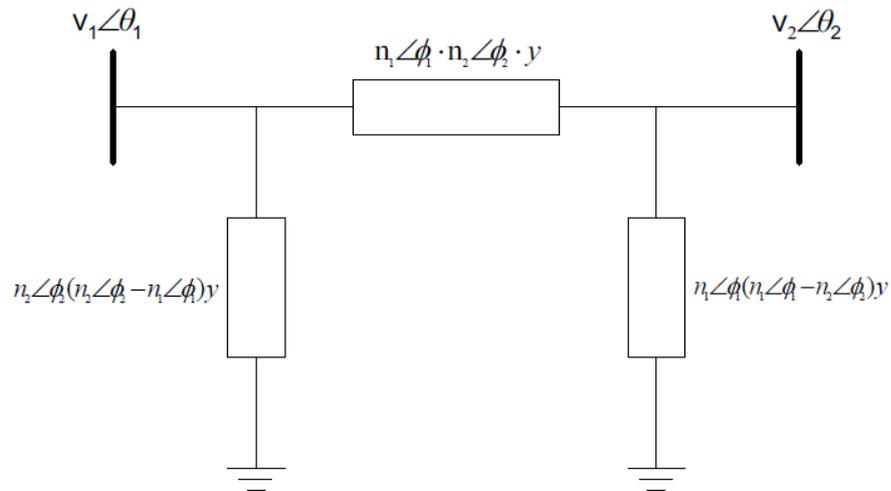


Fig. 9. Modelo π de un transformador con taps y cambio de fase.

Fuente: Flujo de potencia de armónicos utilizando Matlab [22].

Donde:

$$y = \frac{1}{n_1^2 Z_2 + n_2^2 Z_1} \quad (8.32)$$

En la ecuación (8.32) se muestra el modelo matemático del transformador π donde se toma en consideración las reactancias y conductancias. En cambio para el análisis de flujos de carga armónico se debe tomar en consideración que la reactancia del transformador depende de la frecuencia como se indica en la ecuación (8.33), mientras que la resistencia permanece constante para todas las frecuencias [22].

$$X_2^h = h * X_2 \quad (8.33)$$

8.2.4.3. Líneas

El modelo más simple que se usa en los sistemas de distribución en una impedancia en serie R-L, la cual ayuda a considerar las pérdidas por las mismas como se muestra en la figura 10.

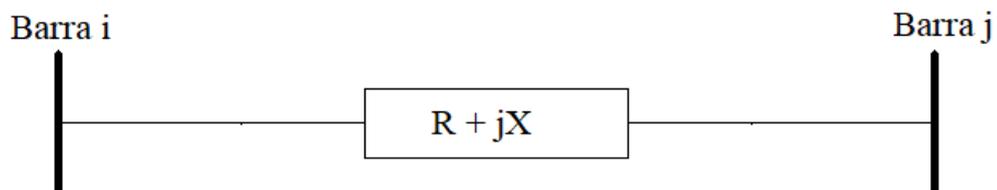


Fig. 10. Modelo de la Línea.

Donde:

$$Z_L = R + jhX_L \quad (8.34)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (8.35)$$

8.2.4.4. Cargas

El modelamiento de las distintas cargas depende del tipo de usuario:

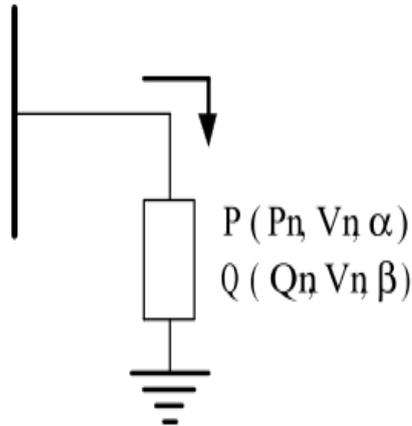


Fig. 11. Modelo de cargas.

Fuente: Flujo de Carga Óptimo en Sistemas de Distribución [17].

Las cargas residenciales normalmente tienen un modelo de impedancia constante, las cargas industriales son modeladas por medio de potencia constante, mientras que las cargas comerciales presentan modelos con tendencia a un modelo de corriente constante, también se pueden representar como modelos híbridos.

Cada una de las cargas pueden representarse mediante las ecuaciones (8.36) y (8.37) que representa la potencia nominal con la tensión.

$$P = P_n \left(\frac{|V|}{V_n} \right)^\alpha \quad (8.36)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{|V|}{V_n} \right)^\beta \quad (8.37)$$

Donde:

P_n : Valor nominal de potencia activa

Q_n : Valor nominal de potencia reactiva

V/V_n : Desviación de la tensión con respecto a su valor nominal

α y β : modelos según el tipo de usuario

- Modelo de potencia constante $\alpha = \beta = 0$
- Modelo de corriente constante $\alpha = \beta = 1$
- Modelo de impedancia constante $\alpha = \beta = 2$

En algunas ocasiones se utilizan valores racionales de α y β para representar modelos híbridos, puede existir una combinación lineal entre modelos para los diferentes tipos de carga en un nodo, en la mayoría de los casos α y β toman valores iguales representando una variación equivalente entre la potencia activa y reactiva.

8.2.4.5. Compensadores

Para los compensadores por ser cargas especiales en el sistema de distribución, su análisis y modelación debe ser muy cuidadosa debido a que la respuesta se caracteriza por ser extremadamente sensibles con este tipo de elementos. En los sistemas eléctricos los condensadores son los más utilizados debido a que ayuda a disminuir pérdidas de sistema y son más económicos considerando otros métodos de compensación más sofisticados [23].

- *Conmutación:* Transferencia de corriente unidireccional entre los elementos del circuito del convertidor de tiristores (o diodo) que impulsan la secuencia.
- *Convertidor:* Un dispositivo que cambia la energía eléctrica de una forma a otra. Un convertidor de semiconductores es un convertidor que utiliza semiconductores como elementos activos en el proceso de conversión.

El modelo de los condensadores es un modelo simple puesto a que el total de la capacitancia es el equivalente de todos los condensadores agregados al sistema, estos pueden ser conectados en serie o en paralelo, para obtener reactancias capacitivas con efecto armónico se debe dividir por el efecto como se muestra en la ecuación (8.38) y en la figura 12.

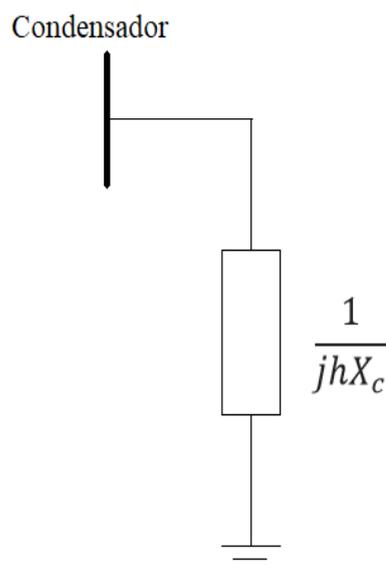


Fig. 12. Modelo simplificado del condensador.

$$Z_c \frac{1}{j \cdot \omega \cdot h \cdot C_{eq}} \quad (8.38)$$

8.2.4.6. Rectificadores AC/DC de 6 y 12 pulsos

Los rectificadores con filtro capacitivos de 6 y 12 pulsos, constan de un rectificador ideal y un condensador de filtrado que permiten alimentar una carga en corriente continua. Existen varios modelos que analizan el comportamiento del rectificador operando en modo de conducción AC/DC, además se puede combinar dos rectificadores de 6 pulsos para completar uno de 12 se puede acoplar reactancias en la entrada para reducir la distorsión global del sistema, a este método de la gestión de la calidad se le conoce como control de 12 pulsos.

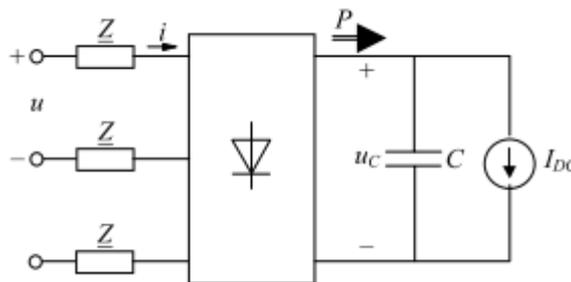


Fig. 13. Rectificador trifásico no controlado con filtro capacitivo.

Fuente: Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas [14].

Para determinar la emisión armónica de estos dispositivos en el sistema se tiene en cuenta las siguientes condiciones:

- La tensión de alimentación, con la frecuencia fundamental, donde U es el valor eficaz de la tensión de la línea.

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (8.39)$$

- La impedancia de la línea de alimentación es idéntica para cada entrada y su valor se calcula aplicando:

$$Z_s = R_s + j \cdot X_s \cdot h \quad (8.40)$$

- La impedancia correspondiente al transformador del convertidor se expresa así:

$$Z_T = R_T + j \cdot X_T \cdot h \quad (8.41)$$

8.2.4.7. Motores de inducción

Una de las principales causas para que los motores de inducción generen corrientes armónicas se debe a pequeñas asimetrías en las ranuras del rotor y estator, irregularidades en los

devanados trifásicos y comportamiento no lineal del hierro en el estator u el rotor. Estos armónicos inducen fuerzas electromotrices con frecuencias iguales a la relación entre la velocidad y la longitud de onda.

Las ecuaciones (8.42) y (8.43) muestran las expresiones para el cálculo de la impedancia de un motor de inducción para frecuencia armónica.

$$Z = R_m + jhX \quad (8.42)$$

$$R_m = R \left(0,45\sqrt{h} + 0,55 \cdot \frac{\pm h\omega_s \sqrt{\pm h - 1}}{\pm h\omega_s - \omega_r} \right) \quad (8.43)$$

Donde:

R_m : Resistencia de motor

X : Reactancia del motor

ω_s : Velocidad nominal del motor

ω_r : Velocidad del rotor del motor

h : Orden del armónico

\pm : (+) Armónico de secuencia positiva, (-) armónico de secuencia negativa

8.2.4.8. Hornos de arco

Los hornos de arco son equipos principalmente utilizados en acerías, uno de los problemas de la es la aleatoriedad de la generación de corrientes armónicas pues depende de los factores del proceso de fundición, carga de operación, tipo de metales a fundir. Lo cual da respuesta a la interrupción de corriente y que los rangos de armónicos sean amplios.

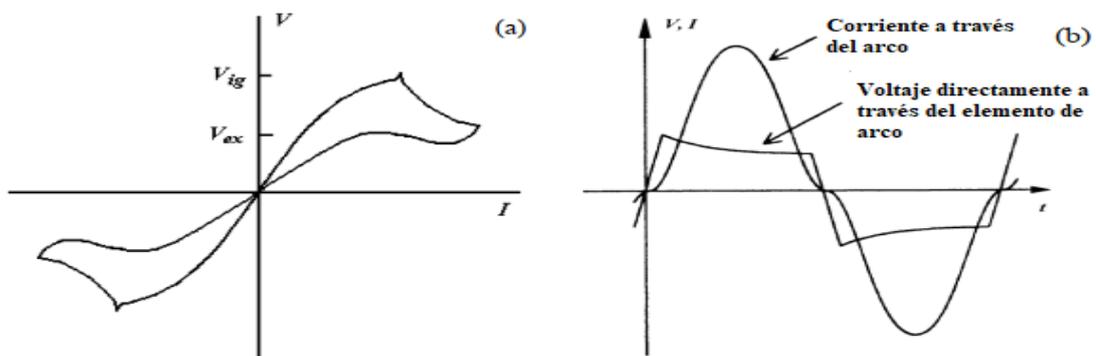


Fig. 14. Voltaje y corriente característicos en hornos de arco.

Fuente: Modeling and Simulation of Power Systems Harmonics [22].

Existen cuatro modelos para el estudio de armónicos; modelo de resistencia no lineal [24], modelo de fuente de corriente, modelo de fuentes de voltaje y modelo de voltaje no lineal variante en el tiempo.

8.2.5. Armónicos

8.2.5.1. Armónico

Es una componente sinusoidal de una onda o cantidad periódica que tiene un múltiplo de frecuencia de la frecuencia fundamental.

- *Armónico, característico:* son armónicos producidos por el equipo convertidor de semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes de los múltiplos de tres, por ejemplo, el 5°, 7°, 11°, 13°, etc.
- *Armónico, no característico:* Son los armónicos que no son producidos por equipos convertidores de semiconductores en el curso de la operación normal. Estos pueden ser el resultado de frecuencias oscilantes; demodulación de armónicos característicos y fundamentales; o un desequilibrio en los sistemas de alimentación de CA, el ángulo de retraso asimétrico o el funcionamiento del convertidor de ciclo.

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, es decir a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar (50, 60) Hz. La distorsión armónica es igual a la suma de las señales de frecuencia fundamental y las frecuencias armónicas producto de equipos del sistema de distribución que poseen características no lineales.

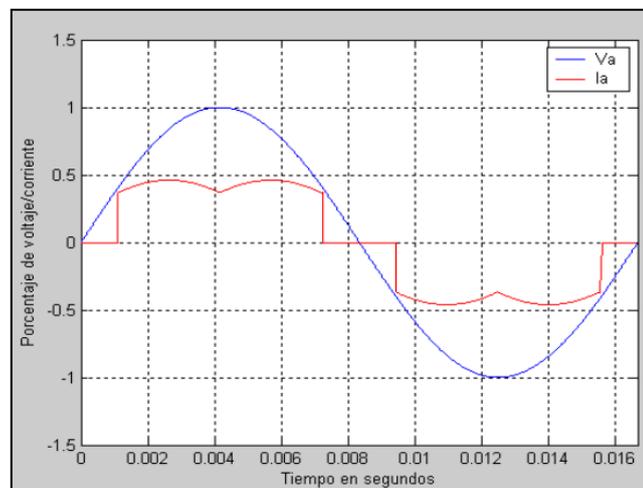


Fig. 15. Señal de tensión y corriente medidos en una carga no lineal.

Fuente: Armónicos en las Redes Eléctricas [25].

En la figura 15, se muestra la forma de tensión y corriente medidas en un sistema industrial con una distorsión típica por cargas no lineales.

- *Desviación de una onda sinusoidal:* Un simple número de mediciones de la distorsión de un sinusoidal debido a componentes armónicos. Esto es igual a la relación del valor absoluto de la diferencia máxima entre la onda distorsionada y el valor máximo de la fundamental.
- *Desviación de una onda sinusoidal, teóricamente máxima:* Para una onda no sinusoidal, es la relación de la suma aritmética de las amplitudes (rms) de todos los armónicos en la onda a la amplitud (rms) de lo fundamental.

8.2.5.2. Tasa de distorsión armónica

La suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corriente armónica en porcentaje de la máxima corriente de carga demandada (15 o 30 demanda min).

Los valores de distorsión armónica están definidos en porcentajes (%) de cantidades eléctricas, estos valores son utilizados para reconocer el grado de contaminación de redes eléctricas. Por lo tanto la distorsión armónica total (THD) se utiliza para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa [2], [22].

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (8.44)$$

Cuando se trata de armónicos de intensidad, la expresión se convierte en:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (8.45)$$

Mientras que la ecuación para armónicas individuales se expresa de la siguiente manera:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (8.46)$$

8.2.5.3. Factor de calidad

Dos veces π la relación de la máxima energía guardada a la energía disipada por ciclo a una determinada frecuencia. Una definición equivalente aproximada es que la Q es la relación de la frecuencia de resonancia al ancho de banda entre aquellas frecuencias sobre los lados opuestos de la frecuencia de resonancia, donde la respuesta de la estructura resonante difiere

en 3dB de la resonancia. Si el circuito resonante comprende una inductancia, L, y una capacitancia, C, en serie con una resistencia efectiva, R, entonces el valor de Q es:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8.47)$$

8.2.5.4. Indicadores esenciales de la distorsión armónica

La existencia de indicadores permite cuantificar y evaluar la distorsión de la onda fundamental producida por los armónicos [25], tanto de voltaje como corriente los cuales son:

a) Factor de potencia

El factor de potencia es la relación entre potencia activa P y la potencia aparente S.

$$fp = \frac{P}{S} \quad (8.48)$$

Mientras que, en el área de electrónica, el factor de potencia es frecuentemente confundido con el coseno phi (Cos ϕ), cuya definición es:

$$Cos\phi = \frac{P1}{S1} \quad (8.49)$$

Por lo tanto, el Cos ϕ se refiere únicamente a la frecuencia fundamental, y en presencia de armónicos, es diferente del factor de potencia fp.

Donde:

P1 : Potencia activa del fundamental.

S1 : Potencia aparente del fundamental.

b) Factor de Cresta

Es el factor definido como la relación entre el valor cresta de corriente o de tensión (Im o Vm) y el valor eficaz (IRMS y VRMS).

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \dots k = \frac{V_m}{V_{RMS}} \quad (8.50)$$

Para una señal sinusoidal fundamental en factor cresta es igual a $\sqrt{2}$, mientras que para la señal con efecto armónico puede tener un factor de cresta oscilante $< 0 >$ a $\sqrt{2}$ este factor es útil para detectar la presencia de valores crestas excepcionales con respecto al valor eficaz.

c) Potencia de Distorsión

La potencia activa P de distorsión es la potencia adicional que se obtiene en dependencia de las fluctuaciones de voltaje y corriente, en dependencia del orden armónico del sistema.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (8.51)$$

Donde:

φ_h : Desfase entre tensión y la intensidad del armónico orden h

V_h : Tensión en el orden del armónico h

I_h : Corriente en el orden del armónico h

En cambio, la potencia reactiva es únicamente la fundamental y viene dada por la ecuación:

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (8.52)$$

Por lo tanto, la potencia de distorsión se describe como:

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (8.53)$$

Como consecuencia, debido a la presencia de armónicos, la relación $S^2 = P^2 + Q^2$ no es válida. De tal manera que se reescribe como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (8.54)$$

8.2.5.5. Índices armónicos generales

El índice armónico más común, que se relaciona con la forma de onda de voltaje, es el THD, que se define como el cuadrado medio raíz (r.m.s.) de los armónicos expresados como un porcentaje del componente fundamental, es decir.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} * 100\% \quad (8.55)$$

Donde V_n es la tensión de frecuencia única r.m.s. en armónica n, N es la orden armónica máxima a considerar y V_1 es la línea fundamental para la tensión neutra r.m.s. Para la mayoría de las aplicaciones, es suficiente considerar el rango armónico del 2 al 25, pero la mayoría de los estándares especifican hasta la 50.

Los niveles de distorsión actuales también se pueden caracterizar por un valor THD, pero puede ser engañoso cuando la corriente de carga fundamental es baja. Un valor alto de THD para la corriente de entrada puede no ser de gran preocupación si la carga es ligera, ya que la magnitud de la corriente armónica es baja, aunque su distorsión relativa a la frecuencia

fundamental es alta. Para evitar esa ambigüedad, un factor de distorsión total de la demanda (TDD) es utilizado en su lugar, definido como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I} * 100\% \quad (8.56)$$

Este factor es similar a THD, excepto que la distorsión se expresa como un porcentaje de alguna magnitud de corriente de carga nominal o máxima, en lugar de como un porcentaje de la corriente fundamental. Dado que los sistemas de alimentación eléctrica están diseñados para soportar la corriente de carga nominal o máxima, el impacto de la distorsión de corriente en el sistema será más realista si la evaluación se basa en los valores diseñados, en lugar de en una referencia que fluctúa con los niveles de carga.

9. HIPÓTESIS

Al desarrollar el algoritmo computacional en Python, para el análisis de flujo de carga armónico utilizando el método de barrido iterativo, los datos obtenidos del mismo, ayudaran a identificar los porcentajes del THDi en cada nodo respectivamente.

10. METODOLOGÍA

10.1. Tipo de investigación

El presente proyecto de investigación da a conocer la situación de los sistemas de distribución de topología radial en lo referente al grado de distorsión armónica a la cual está sometida, todas estas producidas por las cargas no lineales conectadas, con lo cual se plantea alternativas que permitan un análisis más fácil, para identificar en comportamiento ante diferentes fuentes de distorsión.

10.1.1. Investigación descriptiva

Se utiliza principalmente el método de análisis, es decir, se descompone el objeto a estudiar en sus distintos aspectos o elementos, para de esta manera llegar a un conocimiento más técnico, se realiza una exposición de hechos e ideas explicando las circunstancias a las cuales están sometidas las redes de distribución debido al crecimiento de la tecnología y uso de la electrónica.

Este tipo de investigación ayudo analizar como la carga no lineal interactúa en el sistema de distribución, utilizado para su respectiva linealización, adquiriendo parámetros de corriente en su diferente orden armónico.

10.1.2. Investigación diagnóstica

Este tipo de investigación brinda acceso a las características de un problema planteado abarcando un campo delimitado específico, ayudando a comprender la situación a la cual está sometido actualmente los sistemas de distribución radial, identificando los factores analizar para adentrarnos más al problema planteado ayudando a la toma de decisiones concatenadas con los datos obtenidos, permitiendo lograr una alternativa de solución para problema del flujo más factibles y sencillas para la solución del flujo de carga armónico.

10.1.3. Investigación aplicada

Ya que se pondrá en práctica todos los conocimientos científicos adquiridos, como también el uso de tecnologías conocidas para realizar el análisis y programación de un algoritmo que permita identificar de manera precisa y con resultados suficientemente próximos a la realidad.

10.2. Método de investigación

10.2.1. Metodología de la investigación bibliográfica

Este tipo de investigación ayuda con la explicación del estudio, se basará en consultar artículos técnicos, libros, publicaciones en internet y antecedentes de proyectos similares referentes a flujos de carga armónica en sistemas de distribución radial. Lo cual ha proporcionado el conocimiento de teorías, hipótesis, resultados e instrumentos aplicados en las referencias seleccionadas, ayudando a la elección del método correcto para la solución del problema.

10.2.2. Inductivo – deductivo

Analiza de forma detallada cada uno de los métodos, instrumentos temas y subtemas que se utilizaron en la elaboración del trabajo de investigación, a su vez este método permitió establecer las conclusiones y recomendaciones del problema investigado.

En relación al método utilizado se analizó cada uno de las metodologías para la resolución de flujo de carga armónico en sistemas de distribución a partir del análisis de investigaciones ya realizadas, a su vez ayudo con la implementación de un algoritmo que permitió obtener datos y parámetros necesarios para establecer nuestras propias deducciones y de esta manera recomendar procesos que pueden ser aplicados en este tipo de investigaciones.

10.2.3. Analítico y sintético

Se utilizó el análisis y síntesis de toda la información referente a flujo de carga armónico, métodos de resolución y parámetros armónicos que se obtienen en el análisis. En base a estos datos se propuso el desarrollo del proyecto investigativo.

10.3. Técnicas e instrumentos

10.3.1. La observación

Esta técnica es la más adecuada para la investigación, ya que parte de la utilización sensorial para el correspondiente registro de datos obtenidos en el proceso, llegando a obtener resultados importantes y adecuados para solucionar el problema propuesto.

10.3.2. Simulación

Se desarrollará mediante el uso de softwares tales como DIgSILENT Y SimulAr_SR los cuales nos ayudaran a determinar los parámetros referentes a las distorsiones armónicas totales en los sistemas de distribución, para de esta manera constatar datos con el algoritmo propuesto e identificar el rango de error existente.

a) DIgSILENT

Es una de las herramientas para el análisis de sistemas eléctricos más poderosas que existe en el mercado, la cual satisface ampliamente los requerimientos de operación, mantenimiento planeación y estudios de cualquier empresa de electricidad en el ámbito nacional e internacional, en las áreas de sistemas eléctricos de potencia y en sus diferentes niveles de aplicación [26].

b) SimulAr_SR

Es un programa computacional desarrollado bajo el entorno de Windows en el que se muestra la eficiencia del método de penetración armónica y el uso del barrido iterativo para la solución de sistemas de distribución con efecto armónico, desarrollado con un lenguaje de programación denominado Borland Delphi 5.0., [27].

10.3.3. Programación

Se realizará mediante el uso del lenguaje de programación libre Python el cual permitirá diseñar nuestro algoritmo a partir de vectores y formulación matemática aplicado a sistemas de distribución radial, inmiscuyéndose en el estudio de armónicos, permitiendo identificar el porcentaje de distorsión armónica total del sistema de distribución planteados para la investigación.

a) Lenguaje de programación Python

Es un lenguaje de programación poderoso, cuenta con estructuras de datos eficientes de alto nivel, con un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. La elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hicieron de este lenguaje el ideal para scripting y desarrollo rápido de algoritmos en diversas áreas y sobre la mayoría de plataformas [28].

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

11.1. Estudio de flujos de carga

Hallar la solución de un sistema eléctrico de distribución significa conocer la magnitud y ángulo de cada una de las barras del sistema, para condiciones especificadas de la barra de referencia y carga. A la magnitud y ángulo de los voltajes de las barras del sistema se las conoce como variables de estado, pues permiten conocer la situación operativa en un instante dado del sistema.

En cada una de las barras se debe conocer varias de sus variables: magnitud y ángulo del voltaje y la corriente. Las variables de estado se encuentran relacionadas con P Y Q a través de las admitancias de cada una de las barras en la red.

Estas variables se encuentran relacionadas en las ecuaciones de potencia activa y reactiva (8.14) y (8.15), una vez reconocido al menos dos variables en cada una de las barras se puede resolver el sistema de ecuaciones mediante algoritmos iterativos como Gauss-Seidel, Newton-Raphson y en aplicado en este proyecto barrido iterativo (aguas arriba y aguas abajo).

11.2. Problema de flujo de carga en sistemas de distribución

El principal problema de los flujos de carga radica en el desconocimiento del balance de la potencia y la carga del sistema debido a la presencia de pérdidas en la red, a consecuencia de la no linealidad del sistema de ecuaciones, pues dichas potencias (activa y reactiva) tiene una relación cuadrática con el voltaje y corriente. Esto obliga a que una de las barras del sistema de potencia activa y reactiva no se pueda especificar, a esta barra se le denomina barra oscilante o de referencia ($v\theta$), en el cual se define el voltaje y ángulo, para que sirva de referencia para todo el sistema a analizar.

En otras barras del sistema se pueden especificar la potencia activa y reactiva y la magnitud del voltaje (PV), mientras que las demás barras de sistema son barras donde se especifica la

potencia activa y reactiva, generalmente son barras (PQ), las cuales varían en dependencia de la carga conectada, he aquí el problema de los armónicos en los sistemas de distribución.

11.3. Solución de flujos de carga aplicando el método de Barrido Iterativo

El flujo de carga a frecuencia fundamental puede ser aplicado a metodologías tradicionales, sin embargo para sistemas radiales de distribución, existen algoritmos más rápidos especialmente diseñados para este tipo de sistemas, uno de estos métodos es el barrido iterativo de corrientes y voltajes.

Este método aplica de manera separada la primera y segunda ley de Kirchhoff: la primera ley se usa en el barrido aguas arriba en donde se encuentran los flujos de corriente por cada línea. La segunda ley se usa en el barrido aguas abajo encontrando las tensiones en los nodos con sus respectivos ángulos ver apartado (8.2.3.7).

11.4. Inicialización del flujo de carga armónico

La selección de las condiciones iniciales en el caso del flujo de carga armónico es mucho más compleja que las del flujo convencional. No obstante para seleccionar dichos valores se toman dos recomendaciones principales:

- La amplitud y fase de las tensiones a frecuencia fundamental se seleccionan de la manera habitual 1 pu a 0° .
- La magnitud de los voltajes armónicos en los elementos no lineales y a las frecuencias de estudio se asumen en un valor cercano a 0.001 pu y 0° .

Una fase de inicialización para el presente proyecto es el concepto de penetración armónica tradicional empleando voltajes planos (1 pu) a frecuencia fundamental para obtener un aproximado de las corrientes armónicas (usando el modelo porcentual de las cargas no lineales). De esta forma se tiene valores iniciales de cada una de las tensiones armónicas del sistema. Este tipo de inicialización será adoptada en el presente trabajo, con el método de penetración armónica.

11.5. Descripción del algoritmo para FCA

El programa FCA es capaz de calcular flujos de carga armónicos para sistemas radiales de distribución utilizando el método de inyección de corrientes armónicas para cargas independientes del voltaje en estado estable utilizando programación estructurada en la

plataforma y lenguaje PYTHON con una interfaz Win32gui que es un módulo que nos permite controlar la interface gráfica de Windows.

Con la finalidad de facilitar y optimizar los cálculos se ha utilizado lista de datos y posterior a esto la convergencia de los mismos a matrices las cuales permiten un manejo sencillo de los recursos computacionales y disminuye el tiempo de ejecución del programa.

En el **Anexo 14** se presenta el manual de usuario de la aplicación FCA.

11.6. Modelado armónico de cargas no lineales

Las relaciones voltaje corriente de cargas no lineales como convertidores con conmutación de línea se modelará como fuentes de corriente armónicas acopladas. Las corrientes armónicas inyectadas de una carga no lineal ($I_{inyectada}^{(h)}$) en la barra m serán función de sus voltajes fundamentales y armónicos:

$$Real(I_{inyectada}^{(h)}) = V_m^{(1)}(V_m^{(1)}, V_m^{(5)}, V_m^{(7)}, \dots, V_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \quad (11.1)$$

$$Imaginaria(I_{inyectada}^{(h)}) = V_m^{(1)}(V_m^{(1)}, V_m^{(5)}, V_m^{(7)}, \dots, V_m^{(L)}, \alpha_m, \beta_m) \quad (11.2)$$

Donde α_m y β_m son el control de carga no lineal y L es el orden armónico máximo considerado $L = h_{max}$. Las corrientes de la ecuación. (8.57) se refieren a la barra no lineal m al que está conectada la carga no lineal. En algunos casos, por ejemplo, la formulación de flujo de potencia armónica desacoplada, es aconsejable ignorar los acoplamientos armónicos $g_m^{(h)} = V_m^{(h)}, \alpha_m, \beta_m$, y simplificar el problema. Como ejemplo, para un puente rectificador de onda completa conectado al barra m, α_m es el ángulo de disparo de los rectificadores controlados por semiconductores (SCR) y β_m es la impedancia de conmutación inductancia o el voltaje de DC (E). Tenga en cuenta que el circuito equivalente modela un rectificador / inversor trifásico de onda completa con una carga general, donde L_{com} es la inductancia de conmutación, es decir, la inductancia de fuga del transformador, y;

- Para una carga pasiva, solo se consideran la resistencia R y la inductancia de filtro F,
- Para un motor DC, solo se consideran R y E (E> 0) al conducir, y
- Para el funcionamiento del inversor con un generador de DC, solo se consideran R y E (E<0).

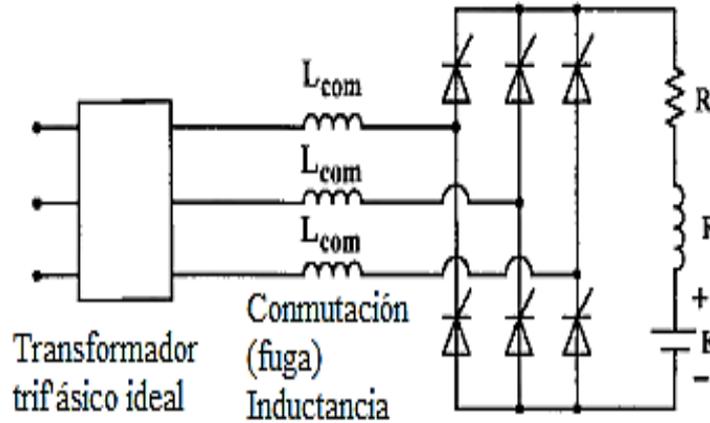


Fig. 16. Señal de tensión y corriente medidos en una carga no lineal.

11.7. Modelado de cargas lineales a frecuencias armónicas.

En la frecuencia fundamental, las cargas lineales se modelan como barra PQ y PV convencionales. Sin embargo, las admisiones de derivación se utilizan para modelarlas a frecuencias armónicas ecuación (8.59). La admisión de una carga lineal conectada a la barra k en el n ésimo armónico es:

$$y_k^{(h)} = \frac{(P_k^{(1)} - jQ_k^{(1)})/h}{(V_k^{(1)})^2} \quad (11.3)$$

Donde j representa el operador por $\sqrt{-1}$. Los bancos de condensadores se modelan como una reactancia de derivación fija. Los transformadores son abordados por inductancias de fuga lineal, y sus no linealidades y pérdidas debidas a corrientes parasitarias, histéresis y saturación se desprecian.

11.8 Algoritmo de flujo de carga armónica para sistemas radiales de distribución

Para resolver el flujo de carga armónico se utiliza el método de barrido iterativo aguas arriba para corrientes y aguas abajo para tensiones. Una vez calculado el flujo de potencia se continúa con el flujo de potencia para frecuencias armónicas. Para lo cual se debe seguir el siguiente algoritmo.

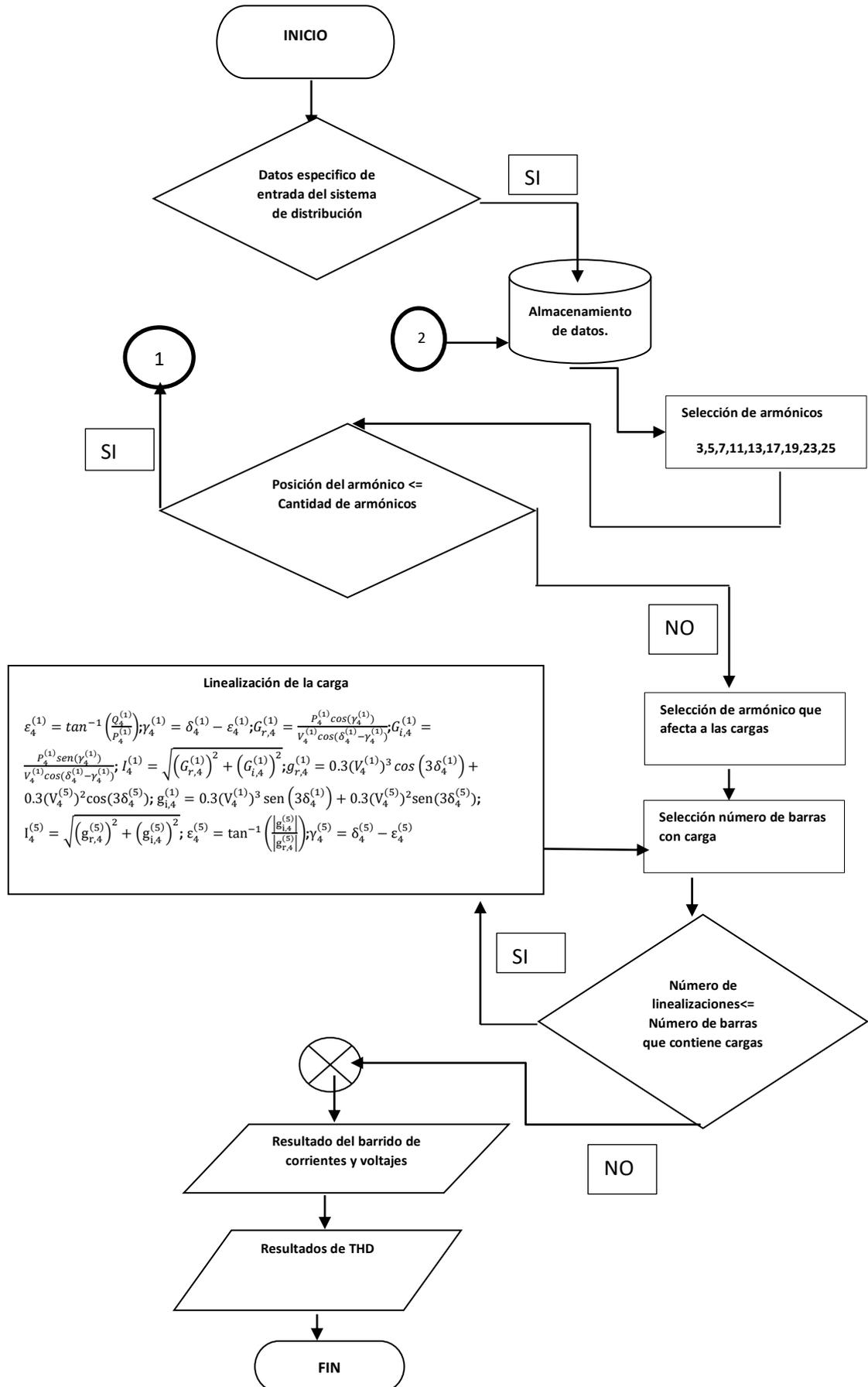
1. Lectura de datos específicos de entrada característicos del sistema de distribución.
2. Lectura del orden armónico a ser analizado, para calcular la matriz completa de admitancias armónicas considerando líneas y nodos.
3. Identificar el orden armónico con el cual el sistema puede ser analizado, es decir mientras H contenga valores continúe calculando el flujo de carga para su respectivo orden, si termina el cálculo pase.

4. Proceso de iteración en dependencia de la lectura del orden armónico.
5. Calcular corrientes armónicas en el sistema utilizando el barrido aguas arriba y los voltajes armónicos utilizando el barrido iterativo aguas abajo.
6. Almacenamiento de datos obtenidos mediante matrices tanto del cálculo de barrido de corrientes y voltajes.
7. Selección del orden armónico el cual está afectando a la carga.
8. Identificación del número de cargas que afectan al sistema incluyendo en que barra se encuentra.
9. Linealizar la carga en frecuencia fundamental, calculando la corriente tanto el modulo como el ángulo en dependencia de la barra en la que se encuentra la carga.
10. Linealizar la carga con respecto al armónico con el cual se ve afectado.
11. Presentación de resultados de corrientes y voltajes armónicos del sistema analizado.
12. El numero 1 pasa a la condición de la cantidad de iteraciones en dependencia del error aceptable.
13. El numero 2 identifica los resultados en dependencia del error si es el correcto pasa a su respectivo almacenamiento, almacena corrientes y voltajes en dependencia de la cantidad de armónicos que se haya propuesto a analizar.
14. El número 3 en la condición posición armónico \leq a la cantidad de armónicos determina el porcentaje de error admisible en dependencia del bucle de iteración.
15. Calcular el porcentaje de distorsión armónica total (THD) del sistema analizado.

El diagrama de flujo muestra las formulas en dependencia del proceso a realizar, en la selección de la cantidad de barras correspondientes a las cargas propuestas realiza el cálculo de la linealización de la carga aplicando el método de las componentes rectangulares que busca determinar la corriente en función del armónico determinado para el análisis, es decir que se afecta a la carga no lineal por el orden n, para luego determinar esa corriente e inyectar en la barra seleccionada, de esta manera llegando a obtener la distorsión total de corrientes en cada una de las barras e identificar de qué manera afecta las cargas en distintos puntos, viendo así el efecto producto de las cargas ni lineales que afectan generalmente al sistema de distribución.

En la figura 17, se identifica el diagrama de flujo del algoritmo utilizada en el proyecto de investigación.

Flujograma para la resolución de sistema



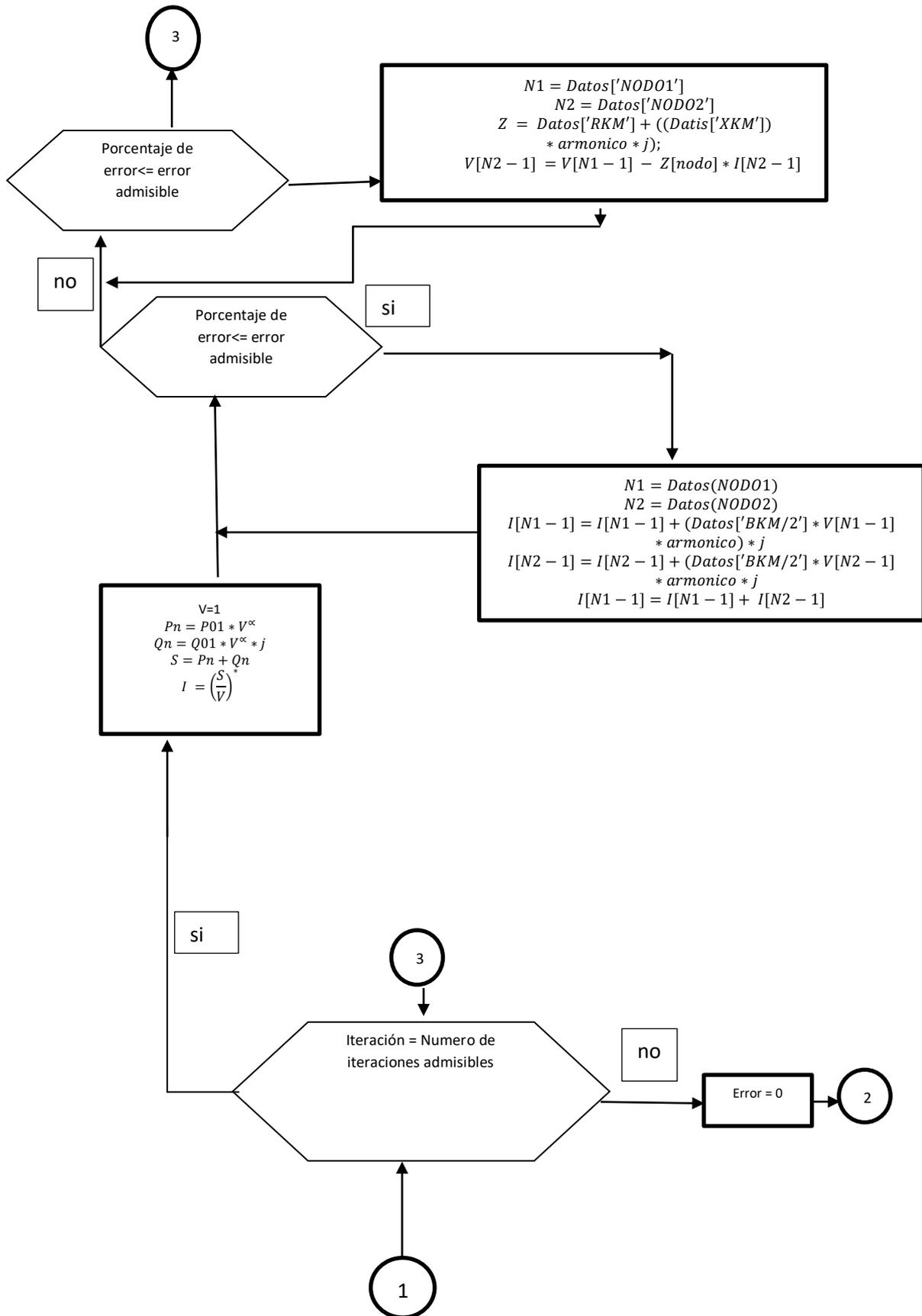


Fig. 17. Diagrama de Flujo.

11.9. Aplicación del algoritmo para la resolución de flujo de carga armónico en sistemas de distribución radial.

Se presentan los resultados obtenidos en la simulación de un sistema de 3 barras con dos cargas y de un sistema de 5 barras con cuatro cargas. Además se muestran los resultados del THD y se compara con sistemas simulados en DIgSILENT, SimulAr_SR y EasyPower denotando el método que aplica para su simulación, considerando los porcentajes de distorsión armónica en cada barra.

11.9.1. Tres barras

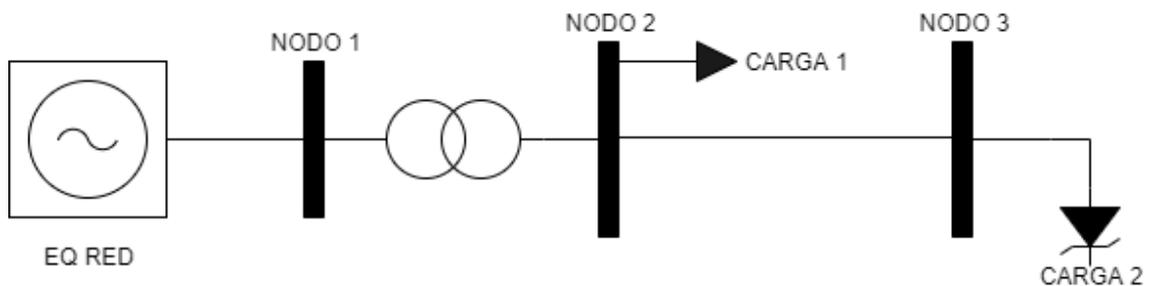


Fig. 18. Esquema de 3 barras.

Tabla 3: Datos del sistema de tres barras.

NODO1	NODO2	Rkm(pu)	Xkm(pu)	Bkm/2(pu)	P(pu)	Q (pu.)	alpha
1	2	0.005	0.0014	0.001	0.126	0.06	0
2	3	0.002	0.0016	0.001	0	0	0

Como se puede observar en la figura 18, un sistema de 3 barras en la barra 2 el sistema tiene una carga lineal mientras que en la barra 3 tiene una carga no lineal el cual pasa por un proceso de linealización para ser inyectado como corriente al sistema. En la tabla 3. Se presentan las líneas de que nodo a que nodo se extiende el sistema y con los datos en por unidad de ; Rkm(pu) resistencia en kilómetros, Xkm(pu) reactancia en kilómetros, Bkm/2(pu) susceptancia en kilómetros, P(pu) la potencia activa, Q(pu.) potencia reactiva y alpha respectivamente.

Para el estudio de propagación de armónicos se necesita resolver primero el flujo de carga a frecuencia fundamental, inyectando la corriente de cada una de las cargas, según la figura 18, existen dos cargas que influyen en el sistema, se aplica el orden armónico el cual interviene en el sistema y se resuelve el flujo de carga armónico, se obtienen los THD en las 3 barras según se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Resultados del porcentaje de distorsión armónica 3 barras.

NOMBRE	THD_I [%]
BARRA 1	0.63386385
BARRA 2	1.17672582
BARRA 3	2.81249805

Los datos obtenidos en el algoritmo FCA aplicando barrido iterativo y el simulador DIgSILENT que aplica Newton, se contrastan en la tabla 5, donde obtiene los porcentajes de distorsión armónica en cada barra.

Tabla 5: Resultados del porcentaje de distorsión armónica en FCA y DIgSILENT.

NOMBRE	DIgSILEN (THD[%])	FCA (THD[%])
BARRA 1	0,6	0,6338639
BARRA 2	1,2	1,1767258
BARRA 3	2,9	2,8124981

La comparación de los valores de distorsión armónica total (THD) representados en la tabla 5, se muestra en la tabla 6, en donde se determina el error tanto absoluto como relativo, comparando el método de barrido iterativo con el método de Newton demostrando que el error promedio es de 1,75%, y que los resultados obtenidos en nuestro algoritmo es semejante a los resultados obtenidos en DIgSILENT.

Tabla 6: Error absoluto y relativo de FCA y DIgSILENT.

NOMBRE	DIgSILEN (THD[%])	FCA (THD[%])	Error absoluto	Error relativo [%]
BARRA 1	0,6	0,6338639	0,62±0,02	2,74
BARRA 2	1,2	1,1767258	1,19±0,01	0,98
BARRA 3	2,9	2,8124981	2,90±0,04	1,53

En la figura 19, se muestra los resultados obtenidos, mostrando los porcentajes en cada barra en función de la distorsión armónica total obtenida en el simulador DIgSILENT y el algoritmo FCA desarrollado en Python, las barras denotan las variaciones pertinentes de cada resultado aplicado en una configuración netamente radial.

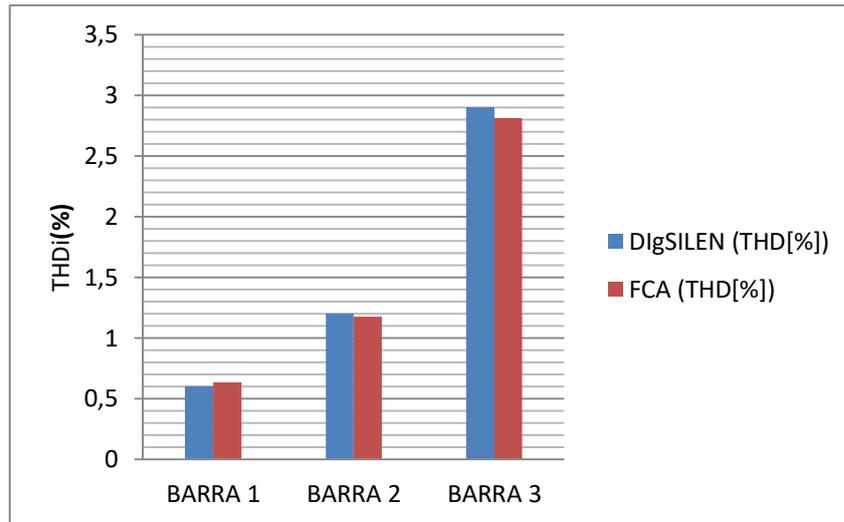


Fig. 19. Porcentaje de distorsión armónica Barrido-Newton.

En la tabla 7, se contrastan los resultados de los simuladores SimulAr_SR y EasyPower con el algoritmo propuesto (FCA), siendo la comparación del método de barrido iterativo que es aplicado para cada caso de resolución obteniendo un error promedio de 1,30%.

Tabla 7: Error absoluto y relativo de FCA, EasyPower y SimulAr_SR

NOMBRE	EasyPower (THD[%])	SimulAr_SR (THD[%])	FCA (THD[%])	Error absoluto	Error relativo [%]
BARRA 1	0,65	0	0,6338639	0,62±0,01	1,26
BARRA 2	1,18	1,17	1,1767258	1,18±0,001	0,07
BARRA 3	2,90	2,99	2,8124981	2,90±0,07	2,58

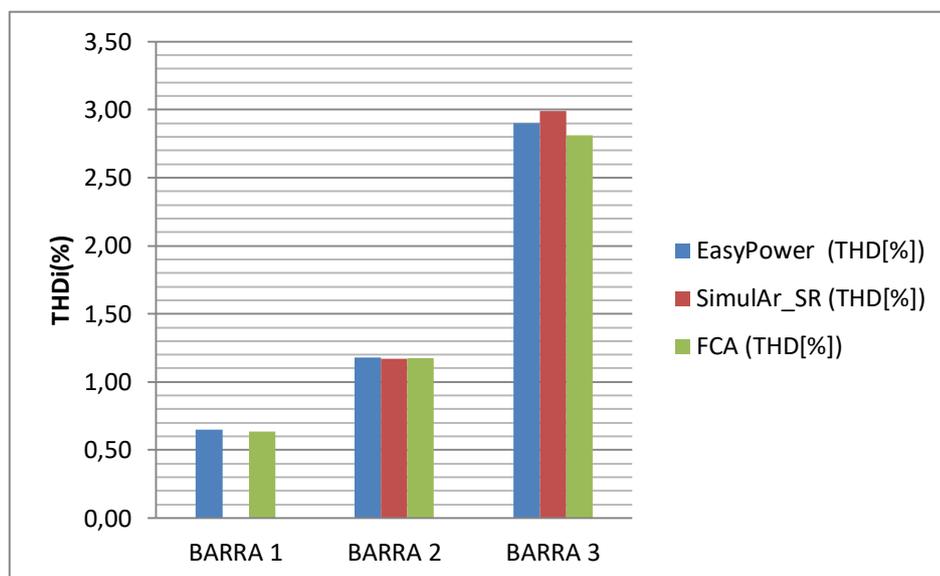


Fig. 20. Porcentaje de distorsión armónica en el sistema Barrido-Barrido.

11.9.2. Cinco barras

La figura 21, muestra la estructura del sistema radia a analizar que consta con 4 cargas dos lineales con las mismas características y 2 cargas no lineales de iguales características, compuesta con 5 nodos.

En la tabla 8, se presentan las líneas de que nodo a que nodo se extiende el sistema y con los datos en por unidad de ; $R_{km}(pu)$ resistencia en kilómetros, $X_{km}(pu)$ reactancia en kilómetros, $B_{km}/2(pu)$ susceptancia en kilómetros, $P(pu)$ la potencia activa, $Q(pu.)$ potencia reactiva y α respectivamente.

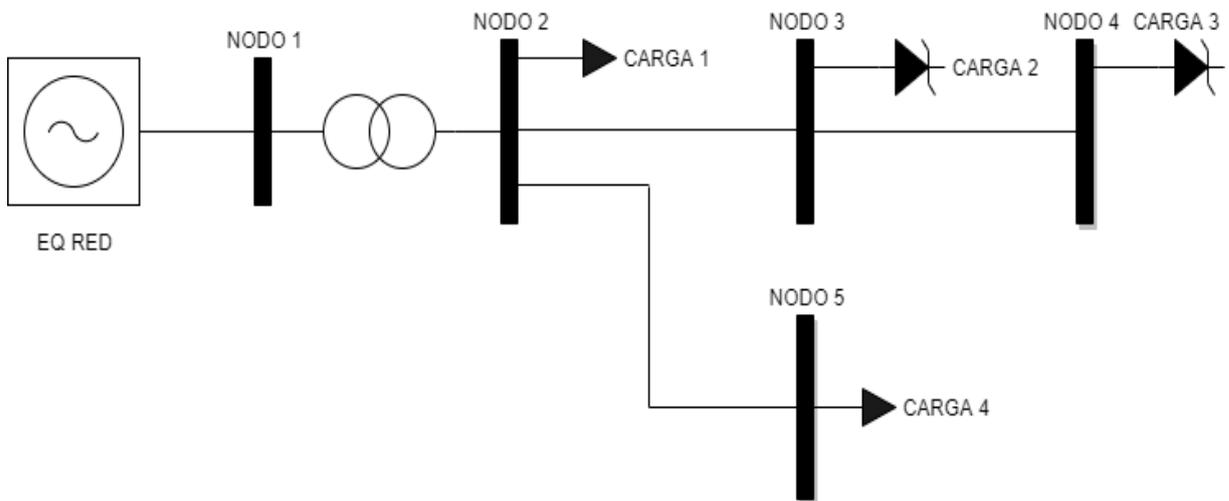


Fig. 21. Esquema de 5 barras.

Tabla 8: Datos del sistema de cinco barras.

NODO1	NODO2	$R_{km}(pu)$	$X_{km}(pu)$	$B_{km}/2(pu)$	$P(pu)$	$Q(pu.)$	α
1	2	0.005	0.0014	0.0001	0.126	0.06	0
2	3	0.002	0.0016	0.0001	0	0	0
3	4	0.0037	0.0008	0.0001	0	0	0
2	5	0.0027	0.0022	0.0001	0	0	0

En la tabla 9, se muestran los resultados de distorsión armónica del sistema de 5 barras analizado, con sus respectivos porcentajes que se desatan debido a la inyección de corriente realizada en el algoritmo FCA propuesto, para la incorporación de la corriente se linealizó cuatro cargas diferentes según muestra la figura en dependencia de cada nodo, se linealizó en función del orden armónico que afecta cada una de las cargas y se obtuvo los THDi de cada nodo.

Tabla 9: Resultados del porcentaje de distorsión armónica 5 barras.

NOMBRE	THD _i [%]
BARRA 1	1,17104
BARRA 2	2,02673
BARRA 3	5,41884
BARRA 4	6,71876
BARRA 5	2,51820

Los datos obtenidos en el algoritmo de FCA y el simulador DIgSILENT se contrasta en la tabla 10, donde se pueden identificar los porcentajes de distorsión armónica de cada uno de los sistemas, donde se aplica barrido iterativo y Newton respectivamente, identificando así un error promedio de 2,31%.

Tabla 10: Resultados del porcentaje de distorsión armónica en FCA , DIgSILENT y SimulAr_SR

NOMBRE	DIgSILENT (THD[%])	FCA (THD[%])	Error absoluto	Error relativo [%]
BARRA 1	1,1	1,17104	1,14±0,04	3,13
BARRA 2	2	2,02673	2,01±0,01	0,66
BARRA 3	5,2	5,41257	5,35±0,11	2,00
BARRA 4	6,9	6,71249	6,35±0,09	1,38
BARRA 5	2,3	2,51249	2,34±0,11	4,42

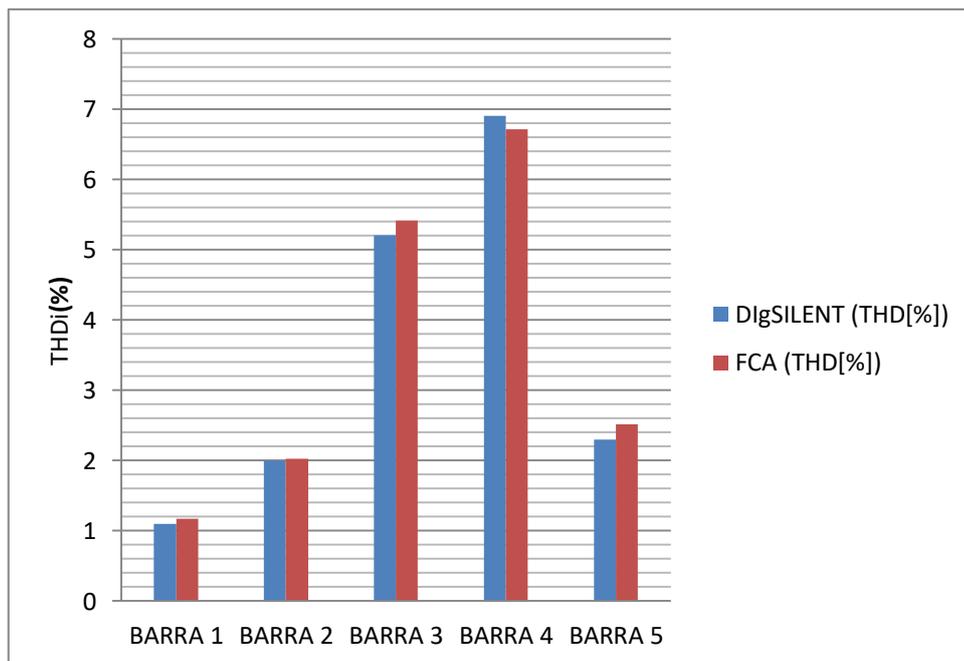
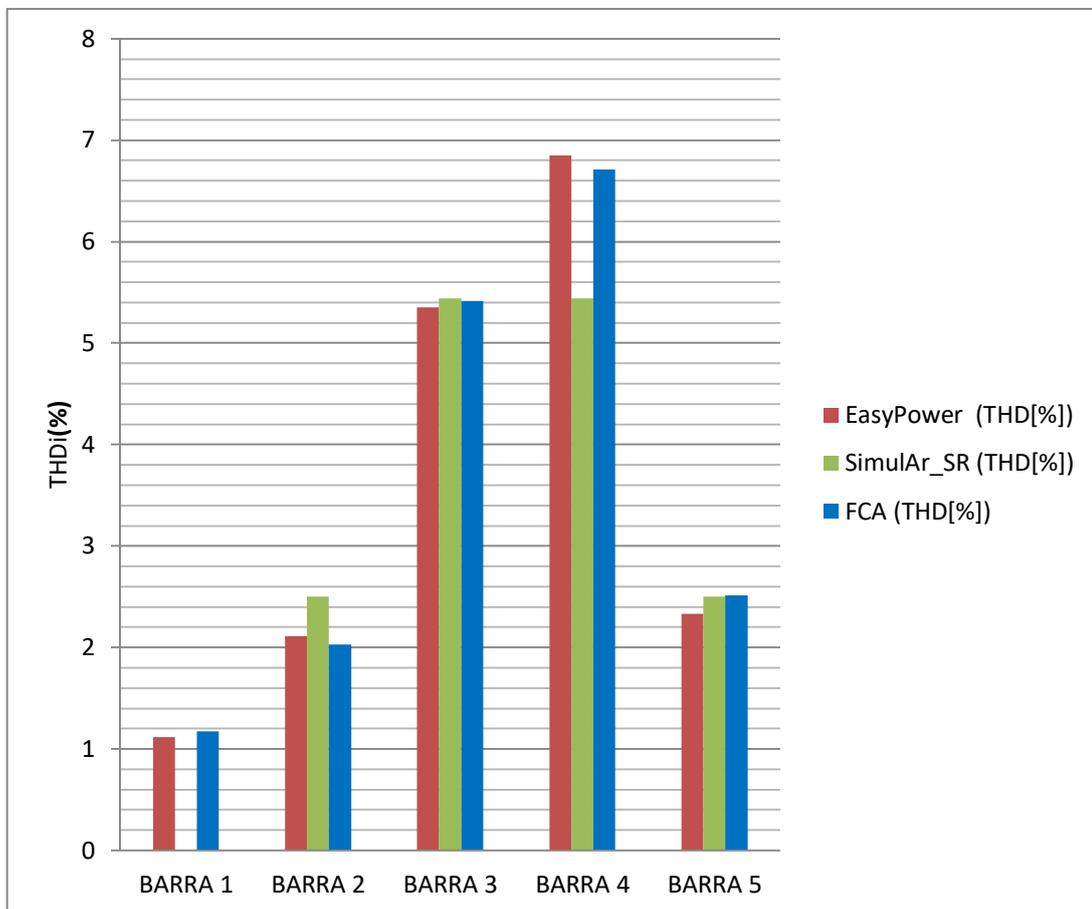
**Fig. 22.** Porcentaje de distorsión armónica en el sistema de 5 barras.

Tabla 11: Error absoluto y relativo de FCA , DIgSILENT y SimulAr_SR

NOMBRE	EasyPower (THD[%])	SimulAr_SR (THD[%])	FCA (THD[%])	Error absoluto	Error relativo [%]
BARRA 1	1,12	0	1,17104	1,15±0,03	2,23
BARRA 2	2,11	2,5	2,02673	2,07±0,04	2,01
BARRA 3	5,35	5,44	5,41257	5,38±0,04	0,75
BARRA 4	6,85	5,44	6,71249	6,78±0,07	1,01
BARRA 5	2,33	2,5	2,51249	2,42±0,09	3,60

**Fig. 23.** Porcentaje de distorsión armónica en el sistema de 5 barras.

En la tabla 10, se contrastan los resultados de los simuladores SimulAr_SR y EasyPower con el algoritmo propuesto (FCA), siendo la comparación del método de barrido iterativo que es aplicado para cada caso de resolución obteniendo un error promedio de 1,92%.

NOTA: En los anexos: 9, 10, 11, 12 y 13 se puede evidenciar los valores obtenidos en cada una de las simulaciones propuestas en DIgSILENT, EasyPower y SimulAr_SR.

11.9.3. Ejemplo Ilustrativo

Para ilustrar el funcionamiento de la metodología propuesta, se utiliza el sistema de 4 nodos que se muestra a continuación figura 24, en el que la fuente o barra slack se encuentra en el nodo 1, que se ha analizado para 6 armónicos, en el convertidos de 6 pulsos se analiza el armónico 7, y una batería de condensadores de 6 pulsos potencia aparente se ha añadido al nodo 4, con una P : 5Mw, Q : 3Kvar, este ejemplo de muestra en la obra de J. Arrillaga, C. D. Callaghan, que lleva por nombre "Three phase AC-DC load and harmonic load flows", IEEE Trans. on Power Delivery", el método utilizado es el mero numérico de barrido iterativo, barrido de corriente aguas arriba, y barrido de voltaje aguas abajo.

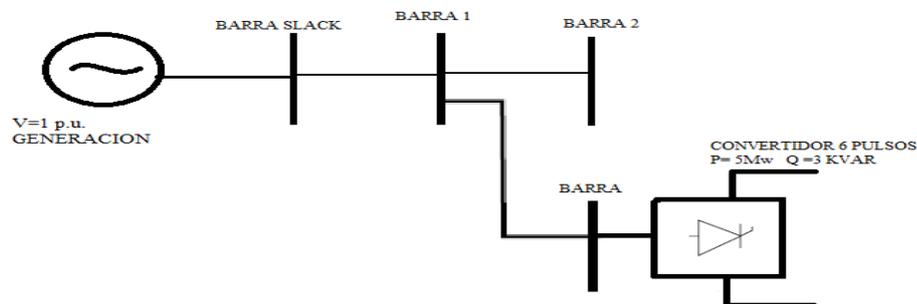


Fig. 24. Esquema radial del sistema que se va a utilizar en el análisis

Fuente: Three phase AC-DC load and harmonic load flows [29].

Tabla 12: Datos del sistema

Nodo de envió	Nodo de recibo	R [pu]	X [pu]	P [pu]	Q [pu]
1	2	0.00043	0.00022	0.1111	0.06666
2	3	0.00232	0.00118	0.10000	0.04444
2	3	0.00077	0.00073	0.10000	0.04444

Fuente: Three phase AC-DC load and harmonic load flows [29].

La figura 24, y en la tabla 12, muestran la topología y los datos del sistema de 4 nodos. Debe tenerse en cuenta que las potencias solicitadas están asociadas con el nodo receptor; Además, los generadores distribuidos no se implementan en este ejemplo debido al tamaño del sistema, y porque se trata de un sistema de distribución radial.

Paso 1. Leer los datos del sistema (tabla 12.)

Paso 2. Calcular los coeficientes de linealización.

- La amplitud y la fase de las tensiones de frecuencia fundamentales se seleccionan de la manera habitual en 1 pu a 0 grados.
- La magnitud de las tensiones armónicas en los elementos no lineales y en las frecuencias de estudio se asume en un valor cercano a 0,01 pu y 0 grados.
- No debe tomarse estrictamente, ya que depende del tipo de cargas de línea que se consideran, además, las magnitudes de las tensiones tienden a disminuir a medida que aumenta la frecuencia.

Tabla 13: Datos del sistema completo.

Nodo 1	Nodo 2	Rkm(pu)	Xkm(pu)	Bkm/2(pu)	P(pu)	Q (pu.)	alpha
1	2	0.00043	0.00022	0.0001	0.1111	0.06666	0
2	3	0.00232	0.00118	0.0001	0.10000	0.04444	0
2	3	0.00077	0.00073	0	0.10000	0.04444	2

Fuente: Three phase AC-DC load and harmonic load flows [29].

Se calcula el barrido iterativo mediante las leyes de Kirchhoff se obtiene las magnitudes de corriente y voltaje.

a) Corriente

En este aparatado se realiza el barrido de corrientes tomando en cuenta la ecuación (25)

$I_x[\text{Nodo analizado}] = I_x[\text{Nodo analizado}] + I_x[\text{De llegada}]$, esto se hace aguas arriba aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff.

$$\begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{x3} \\ I_{x4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,041 - 0,055 j \\ 0,041 - 0,0554 j \\ 0,009 - 0,00434 j \\ 0,001 - 0,00444 j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,041 - 0,055 j \\ 0,041 - 0,0554 j \\ 0,009 - 0,00434 j \\ 0,001 - 0,00444 j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,306637 - 0,10014 j \\ 0,306682 - 0,09984 j \\ 0,100389 - 0,04 j \\ 0,10843 - 0,04 j \end{bmatrix}$$

Tabla 14: Corrientes obtenido en el Barrido Iterativo

Corriente Fundamental (pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	0,347637	-0,15514j	0,38068	<-24,04 °
2	0,347682	-0,15524j	0,38076	<-23,89 °
3	0,109389	-0,04434j	0,11803	< -22,06°
4	0,10943	-0,04444j	0,1181	< -22,10°

b) Voltaje

En este apartado se realiza el barrido de corrientes tomando en cuenta la ecuación (26) $V_x[\text{Nodo analizado}] = V_x[\text{Nodo de envio}] - Z_X[\text{linea}] \cdot I_x[\text{Nodo analizado}]$, esto se hace aguas abajo desde el principio es decir desde la barra principal aplicando la ley de voltajes nodales fundamentales de Kirchhoff.

$$\begin{bmatrix} V_{x1} \\ V_{x2} \\ V_{x3} \\ V_{x4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 0j \\ 0,041 - 0,0554j \\ 0,009 - 0,00434j \\ 1 - 0j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,00002 + 6,74 \cdot 10^{-5}j \\ 0,99994 + 3,63 \cdot 10^{-4}j \\ 0,99986 + 7,60 \cdot 10^{-5}j \\ 1,000004 + 1,0843 \cdot 10^{-5}j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,00022j \\ 0,00118j \\ 0,00073j \\ 0,0001j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,306637 - 0,10014j \\ 0,306682 - 0,09984j \\ 0,100389 - 0,04j \\ 0,10843 - 0,04j \end{bmatrix}$$

Tabla 15: Voltajes obtenidos en el Barrido Iterativo

Voltaje Fundamental (pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	1	0j	1	< 0 °
2	0,999832074	1,6888e^-06j	0,99984	<-0,239885 °
3	0,999832014	2,813e^-06j	0,999856	< -0,39956°
4	1	0j	1	< 0°

c) Resultados del barrido corrientes y voltajes

En este apartado se realiza el barrido de corrientes tomando en cuenta la ecuación (25) que se refiere a la ecuación de la impedancia en el cual ya intervine el número de armónico $Z_X[\text{Linea}] = \text{Resistencia} + jhX$ esto se hace aguas abajo desde el principio es decir desde la barra principal aplicando la ley del modelo ZIP, impedancia, corriente y potencia constante.

$$\begin{bmatrix} Z_{x1} \\ Z_{x2} \\ Z_{x3} \\ Z_{x4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00043 \\ 0,00232 \\ 0,00077 \\ 0,00076 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h^7 \\ h^7 \\ h^7 \\ h^7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,00022j \\ 0,00118j \\ 0,00073j \\ 0,00072j \end{bmatrix}$$

Tabla 16: Corrientes obtenido en el Barrido Iterativo con influencia del armónico 7

Corriente del armónico #7(pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	0,347007	-0,15287j	0,37918	<-23,77 °
2	0,347229	-0,153573j	0,37967	<-23,85 °
3	0,109253	-0,043781j	0,117698	< -21,91°
4	0,10943	-0,04444j	0,1181	< -22,10°

Tabla 17: Voltajes obtenidos en el Barrido Iterativo con influencia del armónico 7.

Voltaje del armónico #7 (pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	1	0j	1	< 0 °
2	0.99963	0,000413132j	0,9993	<-0,02368°
3	0.999655	0,000421j	0,99945	< -0,02413°
4	1	0j	1	< 0°

Para calcular la linealización de la carga se utiliza el método de componentes fundamentales de corriente y voltaje se utiliza las ecuaciones del anexo 1, se puede observar de mejor manera la linealización en el Anexo 1.

- El voltaje fundamental en la barra 4 tiene un valor de 0.9996-7.0500e-05j el voltaje armónico de la carga con respecto a la barra elegida y determinada por el barrido de voltajes y corrientes es 0.99915442-7.13678e-05j, este voltaje se utiliza si desea que la carga este analizada en el voltaje que influyo en el sistema, para la linealización se toma en cuenta un valor de voltaje de 0.1+0j en estado normal por función de sus componentes.
- La potencia activa de la carga en pu.: 0.05, la potencia reactiva de la carga en pu.: 0.03
- La corriente de la carga con respecto a la fundamental es: 0.058746 y su ángulo es: -0.54049 radianes, En componentes rectangulares: 0.05004-0.03002j)
- La corriente de la carga con respecto al armónico es: 0.05835886 y su ángulo es: -0.00020958 radianes, en componentes rectangulares: 0.0583588-1.22e-05j
- La corriente fundamental de la barra incluida la linealización de la carga se muestra en la tabla.18.

Tabla 18: Corrientes obtenidos en el Barrido Iterativo fundamental con influencia de la carga.

Corriente Fundamental Incluida la Carga (pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	0.347637	-0,15287j	0,37773	<-23,89 °
2	0.34768	-0,153573j	0,37831	<-23,94 °
3	0.109389	-0,043781j	0,11728	< -21,91°
4	0.359429	-0,15556j	0,391647	< -23,40°

Tabla 19: Corrientes obtenidos en el Barrido Iterativo con influencia de la carga linealizada

Corriente Fundamental Incluida la Carga Armónica #7 (pu)				
Número de Nodo	Rectangulares		Polares	
	Real	Imaginario	Modulo	Angulo
1	0,347007	-0,15287j	0,37918	<-23,77 °
2	0,347229	-0,153573j	0,37967	<-23,85 °
3	0,109253	-0,043781j	0,117698	< -21,91°
4	0,429586	-0,04444j	0,431878	< -5,90°

El porcentaje de armónicos se puede identificar a partir de la tabla 19, la cual muestra la distorsión armónica en función de la frecuencia, es decir, el porcentaje de variación armónica que influye en el sistema a analizar y su THD.

Tabla 20: Distorsión del armónico 7 y THD.

VARIABLE	FRECUENCIA ARMÓNICA	
	H=7	THD %
I(IND1)	0,91	2,99
I(IND2)	0,91	2,99
I(IND3)	0,91	2,99
I(IND4)	3,84	4,84

d) Comparación de resultados.

Los resultado obtenido por el método de Newton Rapshon propuesto por J. Arrillaga, C. D. Callaghan, que lleva por nombre "Three phase AC-DC load and harmonic load flows", IEEE Trans. on Power Delivery” y resuleto por JULIAN DAVID MARTINEZ PIEDRAHITA en su obra Flujo de carga linealizado para sistemas de distribución con presencia de generación distribuida.

Tabla 21: Resultados del autor obtenidos con el método de Newton Rapshon – voltajes.

Nodo	V^{re} [pu]	V^{im} [pu]
1	1	0
2	0,99982	-0,000002
3	0,99954	-0,000017
4	0,99971	-0,000041

Fuente: Flujo de carga linealizado para sistemas de distribución [30].

Tabla 22: Resultados del autor obtenidos con el método de Barrido Iterativo – voltajes fundamentales y con linealización.

Voltajes (pu)		
Número de Nodo	Rectangulares	
	Real	Imaginario
1	1	0j
2	0,999832074	-1,6888e ⁻⁰⁶ j
3	0,999832014	-2,813e ⁻⁰⁶ j
4	1	0j

Tabla 23: Resultados del autor obtenidos con el método de Newton Rapshon – corrientes

Nodo de envío	Nodo de recibo	V[pu]	V[pu]
1	2	0,31063	-0,15532
2	3	0,09986	-0,04438
4	5	0,09984	-0,04438

Fuente: Flujo de carga linealizado para sistemas de distribución [30].

Tabla 24: Resultados del autor obtenidos con el método de Barrido Iterativo – corrientes fundamentales y con linealización.

Corrientes (pu)		
Número de Nodo	Rectangulares	
	Real	Imaginario
1	0,347637	-0,15514j
2	0,347682	-0,15524j
3	0,109389	-0,04434j
4	0.359429	-0,15556j

12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONOMICOS)

Dentro de los impactos técnicos se tiene una retribución de los datos que se pueden obtener al momento de correr la simulación, tal es el caso como el conocimiento del comportamiento de una red de distribución ante ciertos tipos de cargas, o también las características que se pueden presentar al momento de identificar corrientes y voltajes en cierta orden armónica. Básicamente el impacto técnico es la predicción o el conocimiento que se adquiere al observar

ciertos eventos en función a los valores porcentuales de la distorsión armónica total (THD). Se tiene además los impactos que tienen los investigadores, al realizar cálculos matemáticos o simulaciones y plantear nuevos métodos aplicativos para conocer más a profundidad el comportamiento de un flujo de carga armónico de sistemas radiales de distribución.

Los impactos económicos se muestran en proyectos analíticos de sistemas de distribución con efectos de distorsiones armónicas sin sustento previo de simulaciones o análisis, ya que, si se conoce el comportamiento del sistema con afectación de armónicos, se puede discrepar entre la elección de dispositivos que ayuden a eliminar dicho problema en la red, ahorrando así el dinero en proyectos cuyo resultado no sea favorable. También se presenta en la no adquisición de softwares que tienen costo, ni la utilización de métodos de resolución dificultosos y que lleva mucho tiempo su ejecución y la complejidad de su didáctica, al momento de resolver un flujo de carga.

13. CONCLUSIONES

- Conociendo la base teórica de los elementos que producen armónicos en el sistema de distribución se identifica ciertos métodos aplicables para el estudio de dicho fenómeno, tales como; el método directo, penetración armónica, penetración armónica iterativa y el barrido iterativo siendo uno de los más relevantes para el estudio de sistemas radiales, ya que permite la obtención de corrientes y voltajes aplicando la primera y segunda ley de Kirchhoff en conjunto con la matriz primitiva de admitancias, lo que facilita su resolución.
- El algoritmo de flujo de carga armónica propuesto es de fácil implementación y no representa operaciones intermedias que enmascaren u oscurezcan la claridad de los principios en los cuales se basa. Con el se puede hallar los voltajes y corrientes fundamentales y armónicas en cada nodo, pudiéndose aplicar para resolver sistemas de numerosos nodos y con diferentes cargas que se han linealizado en dependencia del orden armónico, obteniéndose resultados satisfactorios en función de este tipo de variaciones que se producen en las redes de distribución.
- Dentro del flujo de carga de estudio el elemento modelado es el transformador que actúa en dependencia del variador de taps, debido a que este equipo es el más común en sistemas de distribución, si se da el caso se toma en consideración un transformador

ideal ya que se considera el modelo de impedancia constante, corriente constante y potencia constante, que a su vez es aplicado para la linealización de las cargas que se inyectan a la red.

- Los resultados obtenidos en el algoritmo de flujo de carga armónico para sistemas radiales de distribución fueron comparados con los softwares DIgSILENT, EasyPower y SimulAr_SR, lo que permitió determinar un error promedio de 1,61%, siendo aplicado para sistemas balanceados con diferente metodología de solución comparando entre el barrido iterativo con Newton-Raphson y barrido iterativo con barrido iterativo, determinando que la técnica de barrido iterativo es un método aplicable para sistemas radiales de distribución.

14. RECOMENDACIONES

- En los sistemas de distribución debido a la variación constante e instalación de cargas, es apropiado utilizar métodos numéricos con barrido iterativo debido a que los métodos usuales como Newton Rhapsion y Gaus Seidel no son apropiados ya que estos métodos de análisis se usan en sistemas eléctricos de potencia es decir va desde la generación, transmisión y sub transmisión donde los efectos de las cargas son mínimas y el cálculo tendría errores considerables.
- La complementación de interfaces contribuye en gran medida a programas propuestos en las universidades por lo cual el desarrollo de la interfaz usando el algoritmo de barrido iterativo de flujo de carga armónico es de suma importancia ya que puede ayudar a investigaciones futuras en los sistemas de distribución complementando en la creación de equipos más adecuados al sistema actual de alimentación distribuida.
- Para investigaciones futuras se puede tomar en consideración el barrido iterativo de corrientes y voltajes para comparar con métodos acopladores de potencia e introducción de armónicos producidos por cargas no lineales de esta manera se logrará contribuir al desarrollo y estudio de armónicos en los sistemas de distribución.

15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. GARCÉS RUIZ y J. C. GALVIS MANSO, «Flujo De Carga Armónico Para Sistemas Radiales», *Sci. Tech.*, vol. 10, n.º 25, pp. 65-70, 2004.
- [2] J. H. Teng y C. Y. Chang, «A fast harmonic load flow method for industrial distribution systems», *PowerCon 2000 - 2000 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 3, pp. 1149-1154, 2000.
- [3] L. Sainz, M. Caro, y J. Pedra, «Study of electric system harmonic response», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, n.º 2, pp. 868-874, 2004.
- [4] L. Coria, «Análisis De Flujos De Carga», vol. 1, n.º 1, pp. 117-202, 2015.
- [5] A. L. Collado, M. José, y A. L. Sarmiento, «Algoritmos para el flujo de carga en circuitos de distribución secundaria "Año 53 de la Revolución"», 2010.
- [6] I. I. MOHAMED, «MODELADO Y REGULACIÓN DE LOS COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA REACTIVA EN LOS FLUJOS DE CARGAS CON ARMÓNICOS», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2001.
- [7] L. F. Pak, V. Dinavahi, G. Chang, M. Steurer, y P. F. Ribeiro, «Real-time digital time-varying harmonic modeling and simulation techniques IEEE task force on harmonics modeling and simulation», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, n.º 2, pp. 1218-1227, 2007.
- [8] C. Arturo y V. Coronel, «Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución», UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013.
- [9] A. Medina *et al.*, «Harmonic analysis in frequency and time domain», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, n.º 3, pp. 1813-1821, 2013.
- [10] S. Ity-, R. I. E. N. Ted, F. O. Ith, I. T. S. Application, H. Analysis, y N. Zcalaliti, «SPARS ITY-0 RI EN TED HYBRID FORMULATION OF LINEAR MULTIPORTS AND ITS APLICACION TO HARMONIC ANALYSIS», vol. 5, n.º 3, pp. 1453-1458, 1990.
- [11] J. Arrillaga y C. D. Callaghan, «Double-iterative algorithm for the analysis of power and harmonic flows at AC/DC convertor terminals», *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, vol. 136, n.º 6, pp. 319-324, 1989.

- [12] S. J. Ranade, «Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 1: Concepts, models, and simulation techniques», *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 16, n.º 1, p. 65, 1996.
- [13] S. Herraiz, L. Sainz, y J. Clua, «Review of harmonic load flow formulations», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, n.º 3, pp. 1079-1087, 2003.
- [14] S. HERRAIZ JARAMILLO, «Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, 2002.
- [15] N. R. W. J. Arrillaga, *Power System Harmonics*, Second Edi. 2003.
- [16] G. W. Chang, S. Y. Chu, y H. L. Wang, «An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, n.º 2, pp. 882-884, 2007.
- [17] VÍCTOR MARIO VÉLEZ MARÍN, «Flujo de Carga Óptimo en Sistemas de Distribución con Presencia de Cogeneradores Utilizando una Técnica de Optimización Multiobjetivo», UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2008.
- [18] G. A. GUTIERREZ MONSALVE, «ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE METODOLOGIAS DE FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION», UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2008.
- [19] I. Pérez, «Flujo de carga con armónicos empleando la matriz impedancia de barras», vol. XXII, n.º 4, 2001.
- [20] J. Segundo-Ramírez y A. Medina, «An enhanced process for the fast periodic steady state solution of nonlinear systems by poincaré map and extrapolation to the limit cycle», *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 11, n.º 8, pp. 661-670, 2010.
- [21] C. Eduardo, C. Jiménez, C. Eduardo, y C. Jiménez, «Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos», UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA FACULTAD, 2007.
- [22] G. CONSTANTE, «FLUJO DE POTENCIA DE ARMÓNICOS UTILIZANDO MATLAB», ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2014.
- [23] R. López y J. Pedra, «Desarrollo y Validación de Modelos de Transformadores Monofásicos y Trifásicos con Saturación, para el Análisis de Armónicos en Sistemas

- de Potencia», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, 2000.
- [24] D. Committee, I. Power, y E. Society, «IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», *IEEE Std 519-2014 (Revision IEEE Std 519-1992)*, vol. 2014, pp. 1-29, 2014.
- [25] Universidad Politecnica Salesiana, «Armonicos en las Redes Eléctricas», pp. 4-7, 2013.
- [26] J. Arcila, «DigSilent Básico», p. 3, 20015.
- [27] A. Garcés, J. Galvis, y R. Gallego, «Análisis de sistemas de distribución radiales bajo condiciones de polución armónica», vol. 1, p. 10, 2005.
- [28] G. Van, «El tutorial de Python», p. 108, 2013.
- [29] J. Arrillaga y S. Member, «Three Phase AC-DC Load aill Hamionic Flows», *Power*, vol. 6, n.º 1, 1991.
- [30] J. An, «FLUJO DE CARGA LINEALIZADO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON PRESENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA», 2015.

ANEXOS

16. ANEXOS

Anexo I. Ejemplo ilustrativo

Para un sistema compuesto de 4 barras, en la barra 4 está conectada una carga no lineal cuya $P=250W$, $Q=100Var$, el sistema se quiere analizar para el armónico 5:

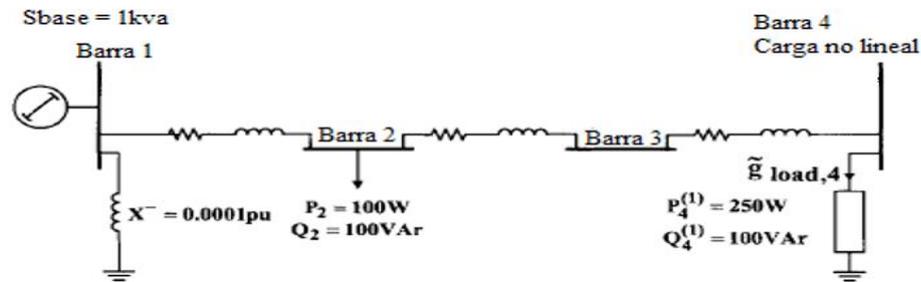


Fig. 25. Sistema de cuatro barras y una carga no lineal

Fuente: Power Quality in Power Systems and Electrical Machines [31].

Datos:

Tabla 25: Datos del sistema de 4 barras

NODO1	NODO2	RKM	XKM	BKM/2	P	Q	ALPHA
1	2	0.0025	0.0026	0.0001	0	0	0
2	3	0.0034	0.0036	0.0001	0	0	0
3	4	0.004	0.0023	0	0.085	0.04	2

Fuente: Power Quality in Power Systems and Electrical Machines[31]

Inicio Barrido Iterativo

- Calculo de las potencias iniciales del sistema de 4 barras.

$$P_n = P_0 * |Va|^{alpha} \quad (16.1)$$

$$P_n = 0.0821188 \text{ pu.}$$

$$Q_n = P_0 * |Va|^{alpha} \quad (16.2)$$

$$Q_n = 0.03864j \text{ pu.}$$

Se debe calcula la potencia activa como mencionamos anteriormente se especifican la potencia real $P_l^{(1)}$ y la potencia aparente total $S_{i,total}^{(1)}$ o a su vez la potencia reactiva total $Q_{i,total}^{(1)}$.

- Calculamos la matriz de la potencia real

$$S = Pn + Qn \quad (16.3)$$

$$S = 0.0821188 + 0.03864j \text{ pu.}$$

- Calculo de las corrientes en la carga, para el barrido iterativo aguas arriba se calcula las corrientes por ende se necesita un punto de inicio el cual se calcula en este apartado

$$I(NODAL) = \frac{S^*}{V} \quad (16.4)$$

$$I(NODAL) = 0.0833465 - 0.0397392j \text{ pu.}$$

- Calculo del efecto capacitivo de las líneas aguas arriba

$$I(NODO1) = I(NODO1) + j * B * V * h \quad (16.5)$$

$$I(NODO2) = I(NODO2) + j * B * V * h \quad (16.6)$$

Ley de corrientes de Kirchhoff: En cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen. De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nodo es igual a cero.

- Barrido de corrientes

$$I_{total}(n) = I(NODO1) + I(NODOS2) \quad (16.7)$$

- Barrido de corriente iteración fundamental

$$I_{total}(n) = I(NODO1) + I(NODOS2)$$

$$I1 = 1.827 - 0.8855j \text{ pu.}$$

$$I2 = 1.111 - 0.8855j \text{ pu.}$$

$$I3 = 0.859 - 0.415799j \text{ pu.}$$

$$I4 = 0.774 - 0.375799j \text{ pu.}$$

- Barrido de corriente para el armónico h=5

$$I_{total - 5}(n) = I(NODO1) + I(NODOS2)$$

$$I1 = 1.8331699 - 0.896159j \text{ pu.}$$

$$I2 = 1.1173678 - 0.551170j \text{ pu.}$$

$$I3 = 0.862917 - 0.4225842j \text{ pu.}$$

$$I4 = 0.779571537 - 0.382847j \text{ pu.}$$

- Barrido de voltajes

En el barrido de voltaje se utiliza la ley de Kirchhoff aplicado para el sistema aguas abajo

En un circuito cerrado, la suma de todas las caídas de voltaje es igual al voltaje total suministrado De manera equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un circuito es igual a cero.

Calculo de la impedancia del sistema

$$Z = \text{resistencia} + j * \text{reactancia}$$

$$Z = \text{resistencia} + j2\pi fh \quad (16.8)$$

$$Z1 = 0.0034 + 0.0036j \text{ pu.}$$

$$Z2 = 0.004 + 0.0023j \text{ pu.}$$

$$Z3 = 0.0013 + 0.008j \text{ pu.}$$

$$Z4 = 0.004 + 0.0023j \text{ pu.}$$

Barrido de voltaje iteración fundamental

$$V(NOD02) = V(NOD01) - Z * I \quad (16.9)$$

$$V1 = 1 + 0j \text{ pu.}$$

$$V2 = 0.987402 - 0.004694j \text{ pu.}$$

$$V3 = 0.983010 - 0.0050067j \text{ pu.}$$

$$V4 = 0.9817035 - 0.00513j \text{ pu.}$$

Barrido de voltaje para el armónico h=5

$$V - 5(n) = V(NOD01) - Z * I$$

$$V1 = 1 + 0j \text{ pu.}$$

$$V2 = 0.9873 - 0.004674j \text{ pu.}$$

$$V3 = 0.98288 - 0.004968j \text{ pu.}$$

$$V4 = 0.981560 - 0.005094j \text{ pu.}$$

El paso inicial para la linealización de la carga tenemos el flujo de carga fundamental sin ninguna intervención de algún armónico solo la honda de frecuencia fundamental.

Las corrientes de dispositivos no lineales reales e imaginarias $G_{r,m}^{(h)}$ y $G_{i,m}^{(h)}$ referido a la barra oscilante- pueden calcularse de la siguiente manera, donde las siguientes potencias se refieren a la barra no lineal 4:

$$P_4^{(1)} = V_4^{(1)} I_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)}) \quad (16.10)$$

$$Q_4^{(1)} = V_4^{(1)} I_4^{(1)} \sen(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)}) \quad (16.11)$$

- Paso 1: Usando el vector de solución (v) del análisis de flujo de potencia fundamental y suponiendo magnitudes de voltaje armónico y ángulos de fase de 0.1 pu y 0 radianes, respectivamente a la carga no lineal, el vector de barra U_o tenemos:

$$V1 = 1 + 0j \text{ pu.}$$

$$V2 = 0.987402 - 0.004694j \text{ pu.}$$

$$V3 = 0.983010 - 0.0050067j \text{ pu.}$$

$$V4 = 0.9817035 - 0.00513j \text{ pu.}$$

$$U_o = \left(\delta_2^{(1)} V_2^{(1)}, \delta_3^{(1)} V_3^{(1)}, \delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_1^{(5)} V_1^{(5)}, \delta_2^{(5)} V_2^{(5)}, \delta_3^{(5)} V_3^{(5)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)}, \alpha_m, \beta_m \right) \quad (16.12)$$

Para la liberalización utilizamos

$$U_o = \left(\delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)} \right) \quad (16.13)$$

$$U_o = \left(\delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)}, \alpha_m, \beta_m \right) \quad (16.14)$$

$$U_o = (0.98 \text{ pu.} - 0.00523313 \text{ rad}, 0.1V \text{ 0rad}, 0,0)$$

Tenga en cuenta que se supone que las variables de dispositivo no lineales α_m, β_m son cero porque no hay variables de dispositivo definidas en este ejemplo para la carga no lineal en el bus 4.

- Paso 2: Use U_0 para calcular las corrientes de dispositivos no lineales. Con $P_4^{(1)}: 250W$ correspondiente a 0.25 pu., $Q_4^{(1)} = 100 VAR$ correspondiente a 0.100 pu, $V_4^{(1)} = 0.9872$ pu, $\delta_4^{(1)} = 0.005233$ radianes, uno obtiene:

Calculo de la corriente con respecto a la barra por analizar y la forma de onda fundamental se determina ángulo de la carga en estado normal

$$\varepsilon_4^{(1)} = \tan^{-1} \left(\frac{Q_4^{(1)}}{P_4^{(1)}} \right) = 0.3805 \text{ rad}$$

Angulo real de la carga con respecto a la barra en la iteración fundamental

$$\gamma_4^{(1)} = \delta_4^{(1)} - \varepsilon_4^{(1)} = -0.38391 \text{ rad}$$

Suponiendo que la barra 1 sea el bus oscilante ($\delta_1^{(1)} = 0$ radianes y $V_1^{(1)}$) se halla la componente real de la corriente.

$$G_{r,4}^{(1)} = \frac{P_4^{(1)} \cos(\gamma_4^{(1)})}{V_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})} = 0.2514 \text{ pu}$$

$$G_{i,4}^{(1)} = \frac{P_4^{(1)} \sin(\gamma_4^{(1)})}{V_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})} = -0.1015 \text{ pu}$$

Corriente no lineal fundamental

$$I_4^{(1)} = \sqrt{(G_{r,4}^{(1)})^2 + (G_{i,4}^{(1)})^2} = 0.2711 \text{ pu}$$

$$I_4^{(1)} = 0.2711 \text{ pu.} \quad \gamma_4^{(1)} = -0.38391 \text{ radianes}$$

Los componentes de la corriente del quinto armónico de la corriente de carga no lineal en la barra 4 son:

$$g_{r,4}^{(1)} = 0.3(V_4^{(1)})^3 \cos(3\delta_4^{(1)}) + 0.3(V_4^{(5)})^2 \cos(3\delta_4^{(5)})$$

$$g_{r,4}^{(1)} = 0.2994 \text{ pu}$$

$$g_{i,4}^{(1)} = 0.3(V_4^{(1)})^3 \text{sen}(3\delta_4^{(1)}) + 0.3(V_4^{(5)})^2 \text{sen}(3\delta_4^{(5)})$$

$$g_{i,4}^{(1)} = -0.003036 \text{ pu}$$

$$I_4^{(5)} = \sqrt{(g_{r,4}^{(5)})^2 + (g_{i,4}^{(5)})^2} = 0.2994 \text{ pu}$$

$$\epsilon_4^{(5)} = \tan^{-1} \left(\frac{|g_{i,4}^{(5)}|}{|g_{r,4}^{(5)}|} \right) = 0.01014 \text{ rad}$$

$$\gamma_4^{(5)} = \delta_4^{(5)} - \epsilon_4^{(5)} = -0.01014 \text{ rad}$$

$$I_4^{(5)} = 0.2994 \text{ pu} \quad \gamma_4^{(5)} = -0.01014 \text{ radianes}$$

Las corrientes fundamentales se añaden las corrientes calculadas con el barrido iterativo en la iteración fundamental y a la iteración con el 5 armónico.

Tabla 26: Datos obtenidos de la resolución del ejemplo propuesto

Corriente fundamental (pu)	Corriente linealización fundamental (pu)	Total (pu)
(1.827-0.8855j)	0-0j	1.827-0.8854j
(1.111-0.5417j)	0-0j	1.111-0.5417j
(0.859-0.41579995j)	0-0j	0.859-0.41579995j
(0.774-0.375799997j)	(0.25411928-0.10319360j)	1.02811934-0.4789936j
Corriente 5 armónico (pu)	Corriente linealización 5 armónico (pu)	Total (pu)
(1.833161-0.896159j)	0-0j	1.833161-0.896159j
(1.117367-0.551170j)	0-0j	1.117367-0.551170j
(0.862917-0.422584j)	0-0j	0.862917-0.422584j
(0.779575-0.382847j)	(0.2742396892877-0.004260712)	1.053813367-0.3876841j

Cálculo del porcentaje de distorsión armónica

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{inf} I_{n,rms}^2}}{I_{fund_rms}} \quad (16.15)$$

Tabla 27: Datos obtenidos de los niveles de THD del ejemplo propuesto

Numero de Barras	THD
En el armónico 5 La distorsión el en la barra [1]	1.01 %
En el armónico 5 La distorsión el en la barra [2]	1.01 %
En el armónico 5 La distorsión el en la barra [3]	1.01 %
En el armónico 5 La distorsión el en la barra [4]	0.99 %

Anexo II. Tabla de datos propuestos por la IEEE de 35 barras

NODO1	NODO2	Rkm(pu)	Xkm(pu)	Bkm/2(pu)	P(pu)	Q (pu.)	alpha
1	2	0,0025	0,0026	0,0001	0	0	0
2	3	0,0034	0,0036	0,0001	0	0	0
3	4	0,004	0,0023	0	0,085	0,04	2
4	5	0,0013	0,0008	0	0	0	0
5	6	0,004	0,0023	0	0,085	0,04	2
5	7	0,0022	0,0012	0	0	0	0
7	8	0,0042	0,0013	0	0,042	0,021	0
7	9	0,0022	0,0012	0	0,085	0,04	1
9	10	0,0038	0,0021	0	0,042	0,021	0
10	11	0,0043	0,0025	0	0,14	0,07	1
11	12	0,0027	0,0015	0	0,126	0,062	0
12	13	0,0027	0,0015	0	0	0	0
13	14	0,0026	0,0008	0	0,085	0,04	0
13	15	0,0027	0,0015	0	0,042	0,021	1
10	16	0,0068	0,0022	0	0	0	0
16	17	0,0167	0,0054	0,0001	0,042	0,021	2
16	18	0,0026	0,0008	0	0,085	0,04	0

3	19	0,0031	0,001	0	0,042	0,021	0
19	20	0,0019	0,0011	0	0,042	0,021	0
20	21	0,0026	0,0008	0	0,126	0,063	0
20	22	0,0037	0,0012	0	0,042	0,021	1
2	23	0,0024	0,0014	0	0,085	0,04	0
23	24	0,0035	0,002	0	0	0	0
24	25	0,001	0,0003	0	0,038	0,018	1
25	26	0,0068	0,0022	0	0,085	0,04	2
24	27	0,0054	0,0031	0	0,085	0,04	0
27	28	0,004	0,0023	0	0	0	0
28	29	0,0037	0,0012	0	0,042	0,021	0
27	30	0,012	0,0039	0	0	0	0
30	31	0,0016	0,0005	0	0,161	0,08	1
30	32	0,0099	0,0032	0	0,042	0,021	2
2	33	0,0052	0,0017	0	0	0	0
33	34	0,0031	0,001	0	0,085	0,04	0
33	35	0,0042	0,0013	0	0,093	0,044	2

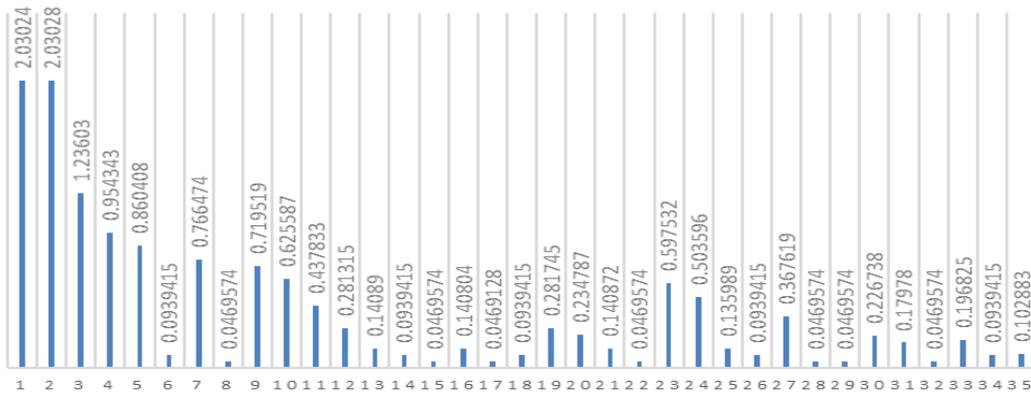
Anexo III. Tabla de corrientes del orden armónico ejemplo IEEE de 35 barras

ARMÓNICO	1	5	7	11	13	19	23
BARRA	(pu)						
I(N1)	2.0302	2.0465	2.0529	2.0594	2.0734	2.1020	2.120
I(N2)	2.0302	2.0467	2.0533	2.0600	2.0741	2.1031	2.122
I(N3)	1.2360	1.2516	1.2579	1.2646	1.2785	1.3077	1.326
I(N4)	0.9543	0.9646	0.9685	0.9728	0.9818	1.0014	1.014
I(N5)	0.8604	0.8732	0.8783	0.8837	0.8948	0.9186	0.934
I(N6)	0.0939	0.0911	0.0900	0.0888	0.0865	0.0823	0.080
I(N7)	0.7664	0.7821	0.7883	0.7949	0.8083	0.8365	0.854
I(N8)	0.0469	0.0485	0.0491	0.0498	0.0512	0.0540	0.055
I(N9)	0.7195	0.7336	0.7391	0.7450	0.7570	0.7825	0.798
I(N10)	0.6255	0.6396	0.6452	0.6511	0.6632	0.6887	0.705
I(N11)	0.4378	0.4483	0.4525	0.4570	0.4657	0.4842	0.495
I(N12)	0.2813	0.2918	0.2960	0.3005	0.3092	0.3276	0.339
I(N13)	0.1408	0.1451	0.1468	0.1486	0.1522	0.1596	0.164
I(N14)	0.0939	0.0982	0.0999	0.1017	0.1052	0.1127	0.117
I(N15)	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.046
I(N16)	0.1408	0.1424	0.1431	0.1437	0.1455	0.1493	0.151

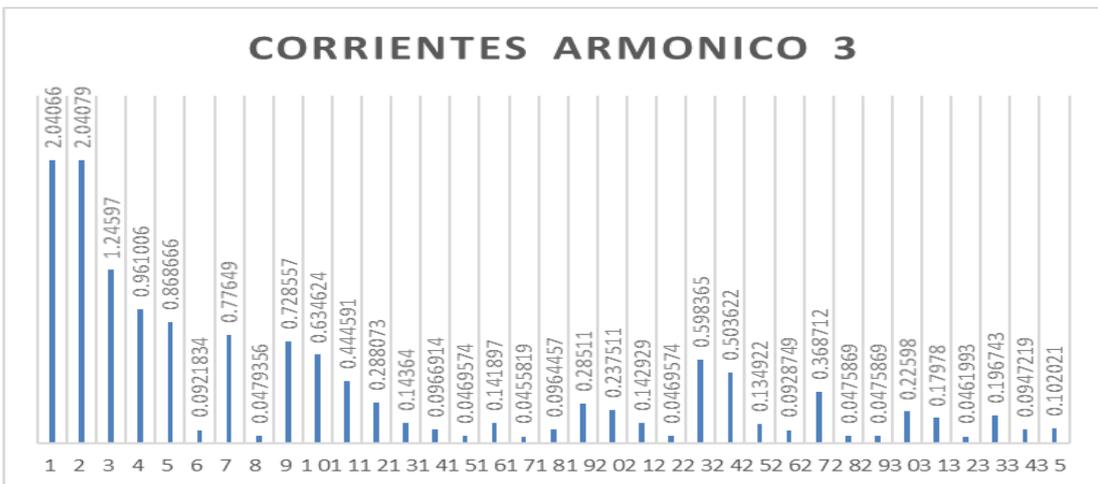
I(N17)	0.0469	0.0448	0.0440	0.0431	0.0417	0.0389	0.037
I(N18)	0.0939	0.0978	0.0993	0.1010	0.1042	0.1110	0.115
I(N19)	0.2817	0.2873	0.2897	0.2923	0.2974	0.3079	0.313
I(N20)	0.2347	0.2392	0.2412	0.2433	0.2474	0.2558	0.260
I(N21)	0.1408	0.1442	0.1457	0.1472	0.1504	0.1567	0.160
I(N22)	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.046
I(N23)	0.5975	0.5989	0.5995	0.6002	0.6017	0.6046	0.606
I(N24)	0.5035	0.5036	0.5037	0.5038	0.5041	0.5048	0.505
I(N25)	0.1359	0.1343	0.1336	0.1330	0.1316	0.1292	0.128
I(N26)	0.0939	0.0922	0.0916	0.0909	0.0896	0.0872	0.086
I(N27)	0.3676	0.3693	0.3701	0.3709	0.3725	0.3756	0.377
I(N28)	0.0469	0.0479	0.0483	0.0487	0.0495	0.0510	0.051
I(N29)	0.0469	0.0479	0.0483	0.0487	0.0495	0.0510	0.051
I(N30)	0.2267	0.2256	0.2252	0.2247	0.2239	0.2225	0.221
I(N31)	0.1797	0.1797	0.1797	0.1797	0.1797	0.1797	0.179
I(N32)	0.0469	0.0458	0.0454	0.0450	0.0441	0.0427	0.042
I(N33)	0.1968	0.1967	0.1966	0.1966	0.1966	0.1966	0.196
I(N34)	0.0939	0.0952	0.0957	0.0962	0.0974	0.0995	0.100
I(N35)	0.10288	0.10150	0.10094	0.10035	0.09919	0.09702	0.095

Anexo IV. Histogramas de la corriente con respecto al armónico

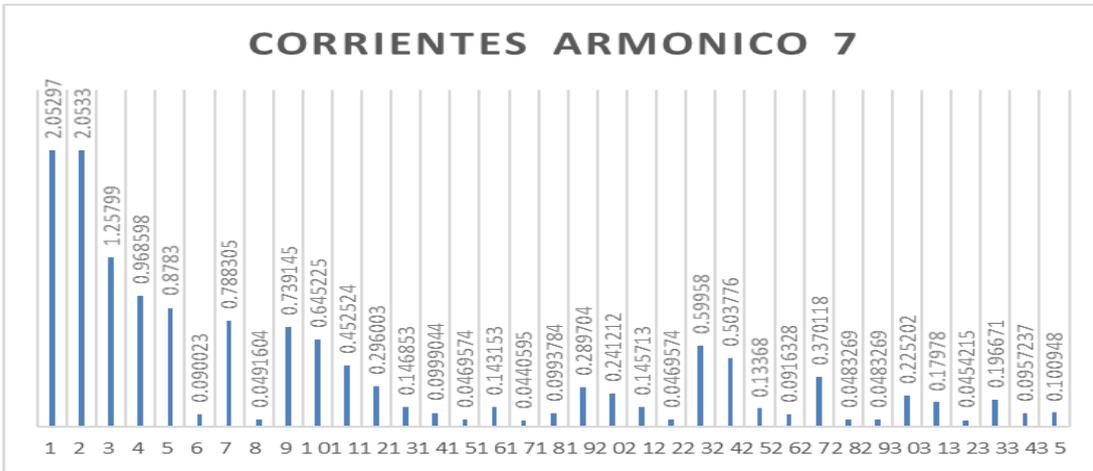
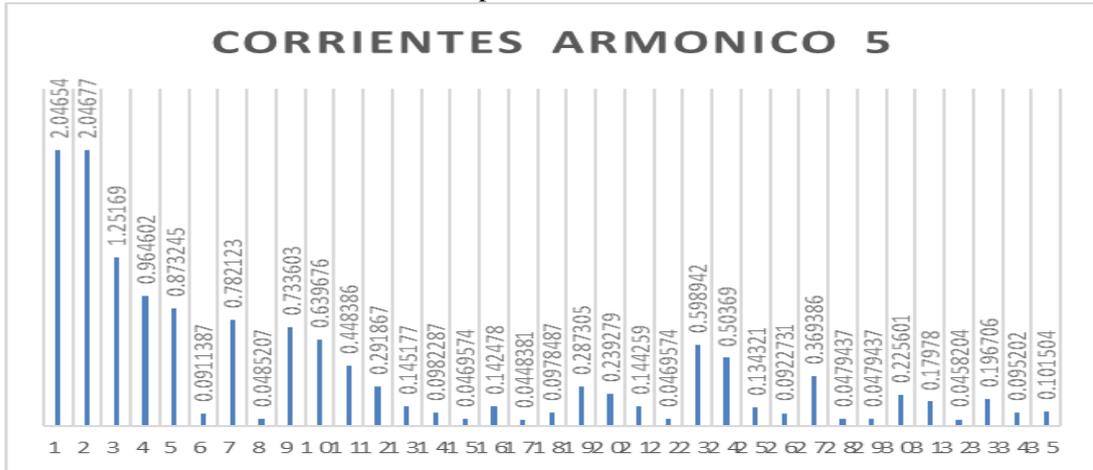
CORRIENTES ARMONICO 1



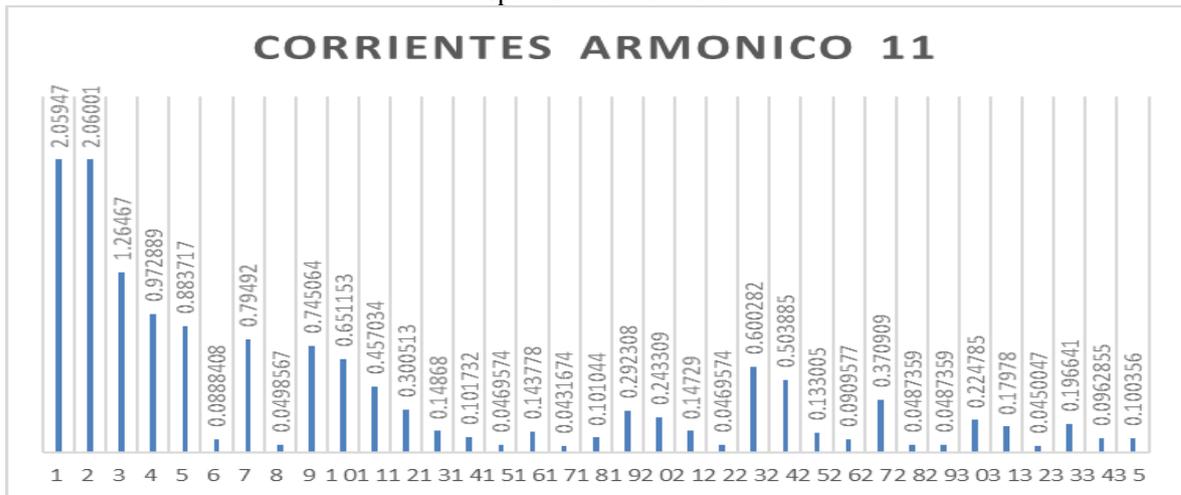
CORRIENTES ARMONICO 3

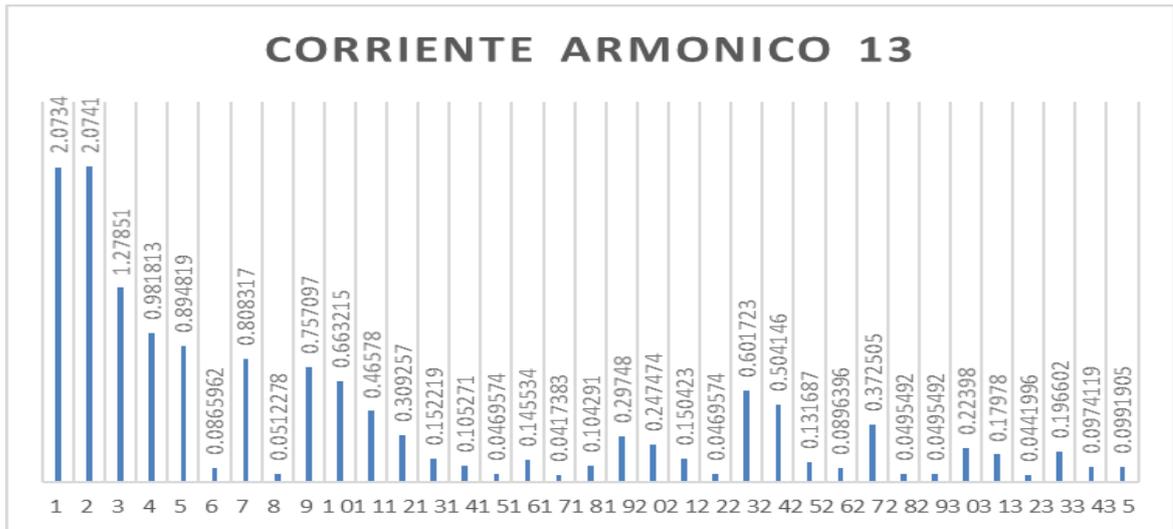


a) Comportamiento de la corriente con respecto al fundamental, b) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 3

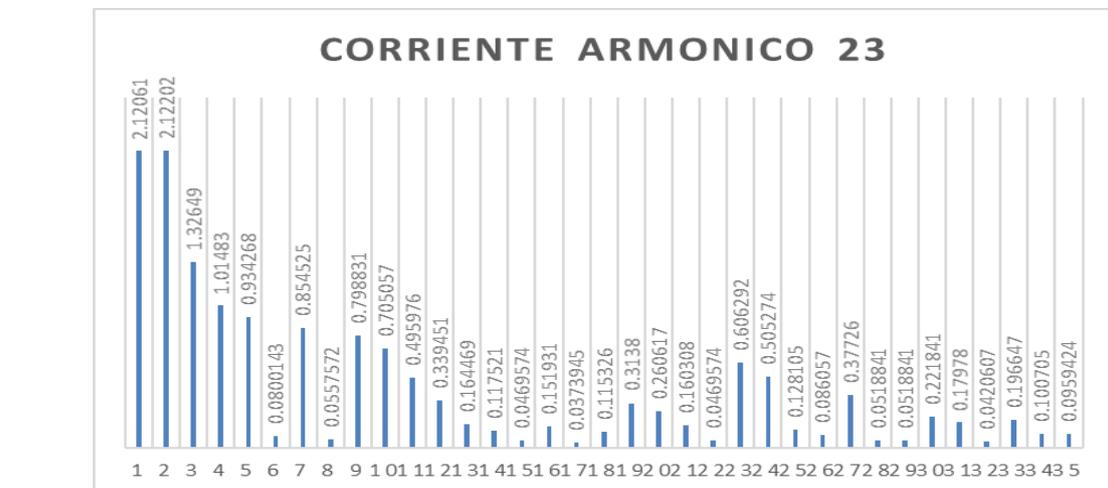
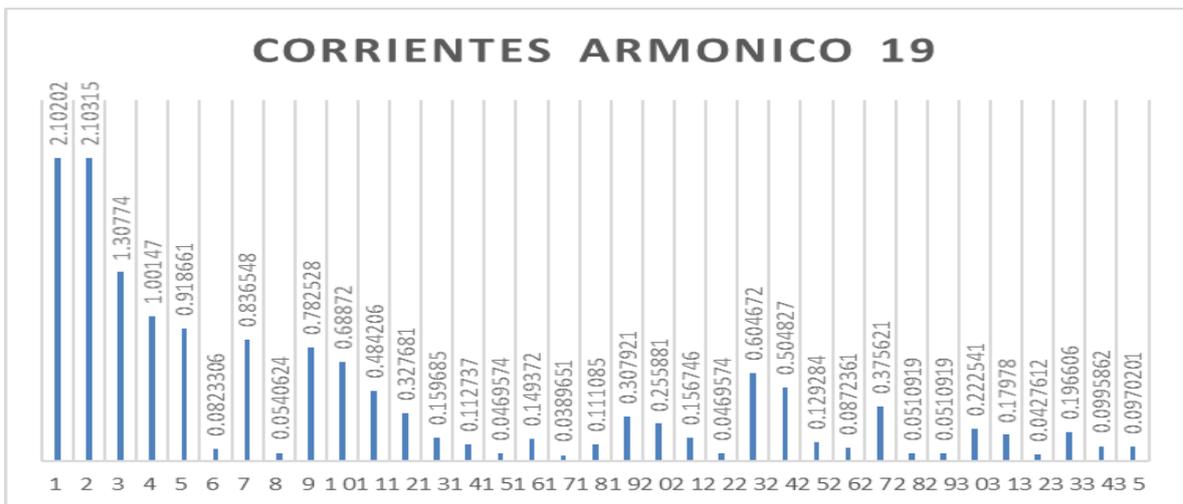


a) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 5 b) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 7





a) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 11, b) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 13



a) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 19, b) Comportamiento de la corriente con respecto al armónico 23

Anexo V. Tabla de datos de voltajes armónicos del sistema IEEE de 35 barras

ARMONICO	1	5	11	13	19	23	% Distorsión
BARRA	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	
V(N1)	1	1	1	1	1	1	2.14471
V(N2)	0.99313	0.98347	0.96751	0.95974	0.93752	0.92331	3.07818
V(N3)	0.98741	0.96976	0.94119	0.92672	0.88634	0.86142	3.12515
V(N4)	0.98302	0.96155	0.92725	0.90967	0.86121	0.83201	3.10648
V(N5)	0.98171	0.95904	0.92299	0.90443	0.85351	0.82307	3.14552
V(N6)	0.98128	0.95828	0.92181	0.90306	0.85174	0.82119	2.74695
V(N7)	0.97979	0.95550	0.91711	0.89721	0.84295	0.81091	3.19638
V(N8)	0.97959	0.95518	0.91664	0.89665	0.84217	0.81004	3.32191
V(N9)	0.97799	0.95220	0.91168	0.89055	0.83331	0.79994	3.18837
V(N10)	0.97528	0.94719	0.90350	0.88051	0.81887	0.78373	3.21748
V(N11)	0.97311	0.94311	0.89684	0.87231	0.80717	0.77079	3.22615
V(N12)	0.97224	0.94150	0.89422	0.86907	0.80252	0.76568	3.35454
V(N13)	0.97181	0.94070	0.89294	0.86750	0.80030	0.76327	3.286
V(N14)	0.97156	0.94031	0.89237	0.86681	0.79935	0.76224	3.43236
V(N15)	0.97166	0.94044	0.89253	0.86700	0.79963	0.76256	3
V(N16)	0.97428	0.94568	0.90133	0.87796	0.81551	0.78013	3.13809
V(N17)	0.97347	0.94449	0.89971	0.87616	0.81336	0.77799	2.67832
V(N18)	0.97403	0.94529	0.90076	0.87728	0.81457	0.77910	3.39288
V(N19)	0.98650	0.96834	0.93903	0.92421	0.88292	0.85752	3.19425
V(N20)	0.98599	0.96736	0.93739	0.92225	0.88015	0.85435	3.18781
V(N21)	0.98561	0.96678	0.93651	0.92123	0.87876	0.85277	3.23632
V(N22)	0.98581	0.96708	0.93698	0.92178	0.87953	0.85367	3
V(N23)	0.99147	0.98037	0.96225	0.95355	0.92883	0.91316	3.02445
V(N24)	0.98945	0.97662	0.95595	0.94616	0.91855	0.90127	3.00481
V(N25)	0.98931	0.97641	0.95565	0.94583	0.91812	0.90079	2.89821
V(N26)	0.98864	0.97542	0.95420	0.94421	0.91607	0.89851	2.85308
V(N27)	0.98717	0.97236	0.94882	0.93777	0.90688	0.88782	3.04494
V(N28)	0.98695	0.97194	0.94812	0.93694	0.90572	0.88648	3.18463
V(N29)	0.98677	0.97166	0.94769	0.93644	0.90504	0.88571	3.18463
V(N30)	0.98433	0.96801	0.94233	0.93039	0.89723	0.87700	2.96118
V(N31)	0.98404	0.96756	0.94166	0.92963	0.89623	0.87589	3
V(N32)	0.98385	0.96729	0.94127	0.92920	0.89572	0.87534	2.81418
V(N33)	0.99206	0.98184	0.96507	0.95698	0.93391	0.91920	2.99752
V(N34)	0.99176	0.98138	0.96437	0.95618	0.93284	0.91798	3.1247
V(N35)	0.99161	0.981185	0.96410	0.95590	0.93253	0.917667	2.88325

Anexo VI. Tabla de datos propuestos por la IEEE de 136 barras

NODO1	NODO2	Rkm(pu)	Xkm(pu)	Bkm/2(pu)	P(pu)	Q (pu.)	alpha
1	2	0,17435	0,402504	0	0	0	1
2	3	0,0009871	0,0022736	0	0,0004778	0,0001901	1
3	4	0,117223	0,27061	0	0,0004255	0,0001693	1
4	5	0,0522106	0,12052	0	0,0008702	0,0003462	2
5	6	0,081763	0,188747	0	0,0031131	0,0012386	0
6	7	0,0857015	0,19784	0	0,0014887	0,0005923	1
7	8	0,060092	0,13871	0	0,0023867	0,0009496	1
7	9	0,029799	0,0297521	0	0,000623	0,0002479	0
9	10	0,273703	0,143971	0	0,001246	0,0004957	2
9	11	0,057115	0,057025	0	0,0014018	0,0005577	0
11	12	0,209	0,10994	0	0,0011681	0,0004647	1
11	13	0,48174	0,16524	0	0,002492	0,0009915	2
11	14	0,062082	0,06198	0	0,0029145	0,0011595	0
14	15	0,26374	0,13873	0	0,0030372	0,0012084	2
14	16	0,02979	0,029752	0	0,002154	0,000857	1
16	17	0,15426	0,081148	0	0,0019859	0,0007901	1
1	18	0,17435	0,4025	0	0	0	1
18	19	0,0009872	0,00227	0	0	0	1
19	20	0,11722	0,27061	0	0	0	1
20	21	0,057136	0,13189	0	0,0003013	0,0001473	2
21	22	0,37323	0,19632	0	0,0023097	0,0011292	0
21	23	0,095552	0,22058	0	0,0006026	0,0002946	2
23	24	0,15924	0,083763	0	0,0023097	0,0011292	1
23	25	0,012807	0,029563	0	0,0012051	0,0012051	0
25	26	0,02363	0,054578	0	0	0	2
26	27	0,0098508	0,022742	0	0,0005698	0,0002786	2
27	28	0,062082	0,061988	0	0,0036467	0,0017828	1
28	29	0,012418	0,012397	0	0	0	0
29	30	0,099527	0,052352	0	0,0012465	0,0006094	0
30	31	0,209	0,1099	0	0,0005698	0,0002786	2
29	32	0,029799	0,029752	0	0	0	0
32	33	0,04976	0,026176	0	0,0008547	0,0004179	2
33	34	0,2189	0,1151	0	0	0	1
34	35	0,059714	0,031411	0	0,0039674	0,0019396	1
32	36	0,039729	0,039671	0	0	0	
36	37	0,19407	0,10208	0	0,0018115	0,0008856	1
37	38	0,13934	0,073293	0	0,0024217	0,001184	2
36	39	0,029799	0,029752	0	0,0007532	0,0003682	0
1	40	0,17435	0,402504	0	0	0	2
40	41	0,062061	0,1432	0	0,0000125	0,0000053	0
41	42	1,555	0,5336	0	0,0000627	0,0000266	1
41	43	0,0009872	0,002273	0	0	0	1

43	44	0,036447	0,084141	0	0,0011788	0,0004997	1
44	45	0,4279	0,2251	0	0,0006267	0,0002657	2
44	46	0,03349	0,077315	0	0,0017229	0,0007303	0
46	47	0,068956	0,15918	0	0,0045856	0,0019439	1
47	48	0,0325	0,075042	0	0,0026296	0,0011147	1
48	49	0,06009	0,13871	0	0,0023576	0,0009994	1
49	50	0,14899	0,14876	0	0	0	0
50	51	0,14899	0,14876	0	0,0010922	0,000463	2
49	52	0,02363	0,05457	0	0	0	1
52	53	0,013789	0,031836	0	0,0007281	0,0003087	1
53	54	0,031521	0,07276	0	0,0025847	0,0010957	0
54	55	0,015763	0,03638	0	0,0006917	0,0002932	0
55	56	0,010838	0,025015	0	0,0002184	0,0000926	2
53	57	0,057136	0,13189	0	0	0	1
57	58	0,13436	0,0706	0	0,0002053	0,000087	1
58	59	0,21896	0,11517	0	0,0015055	0,0006382	2
59	60	0,26374	0,13873	0	0,0022069	0,0009355	2
60	61	0,17417	0,091619	0	0,0009238	0,0003916	1
61	62	0,10947	0,05758	0	0	0	1
48	63	0,07289	0,16827	0	0,0022669	0,000961	1
1	64	0,003938	0,009094	0	0	0	1
64	65	0,14185	0,32746	0	0,0029402	0,0011697	1
65	66	0,2009	0,4639	0	0,0008302	0,0003303	1
66	67	0,17337	0,4002	0	0,0008302	0,0003303	0
67	68	0,17239	0,39795	0	0,0010377	0,0004129	2
68	69	0,08964	0,20693	0	0,0017641	0,0007018	0
69	70	0,2936	0,15444	0	0,0008302	0,0003303	1
69	71	0,03053	0,07049	0	0,0021792	0,000867	1
71	72	0,36825	0,1937	0	0,0002329	0,0000927	1
72	73	0,53745	0,2827	0	0,0000508	0,0000202	1
71	74	0,0354	0,081868	0	0,0007264	0,000289	0
74	75	0,69498	0,23837	0	0,0040599	0,0016152	2
1	76	0,0059126	0,01364	0	0	0	1
76	77	0,38319	0,8846	0	0,0010018	0,0004247	1
77	78	0,1182	0,27288	0	0,0014252	0,0006042	1
78	79	0,1093	0,2524	0	0,0009604	0,0004071	2
79	80	0,024627	0,05685	0	0,0030045	0,0012737	0
80	81	0,32529	0,32481	0	0,0014124	0,0005987	1
81	82	0,17879	0,17852	0	0,0027985	0,0011863	1
82	83	0,29858	0,15706	0	0,0008731	0,0003701	1
82	84	0,05711	0,05702	0	0,0024385	0,0010337	2
84	85	0,29858	0,15706	0	0,0024775	0,0010503	0
1	86	0,0059126	0,01364	0	0	0	1
86	87	0,21967	0,50711	0	0,0008988	0,000381	1
87	88	0,05513	0,07162	0	0,0113728	0,0048211	2

87	89	0,2305	0,53212	0	0,0045834	0,001943	0
89	90	0,03948	0,01354	0	0,003852	0,0016329	1
90	91	0,04039	0,09323	0	0	0	1
91	92	0,17435	0,4025	0	0,0007961	0,0003375	1
92	93	0,04432	0,10233	0	0,0008731	0,0003701	1
93	94	0,06994	0,16145	0	0	0	1
94	95	0,15395	0,15372	0	0,00074	0,0003137	0
95	96	0,11422	0,11405	0	0,0023205	0,0009837	2
96	97	0,13905	0,13885	0	0,0014182	0,0006012	0
94	98	0,05417	0,12507	0	0	0	2
98	99	0,070925	0,16373	0	0,0007645	0,0003241	1
1	100	0,004925	0,01136	0	0	0	1
100	101	0,088657	0,20466	0	0,0005132	0,0002176	1
101	102	0,06206	0,14326	0	0,0005987	0,0002538	2
102	103	1,2004	0,4117	0	0,0000209	0,0000384	2
102	104	0,23937	0,55259	0	0,0000907	0,0000089	2
104	105	0,36546	0,84367	0	0,0001674	0,0000709	2
105	106	0,24035	0,55486	0	0,0150652	0,0063863	2
106	107	0,10658	0,13848	0	0,0031302	0,0013269	2
107	108	0,11209	0,14564	0	0,0007983	0,0003384	2
108	109	0,28863	0,15182	0	0,0005132	0,0002176	2
109	110	0,28365	0,1492	0	0	0	2
108	111	0,02389	0,031038	0	0,0020244	0,0008582	2
111	112	0,24881	0,13088	0	0,0006082	0,0002578	2
112	113	0,45285	0,2382	0	0,0004562	0,0001934	2
113	114	0,29858	0,15706	0	0	0	2
109	115	0,40806	0,21465	0	0,0015707	0,0006658	2
115	116	0,5673	0,29841	0	0	0	2
110	117	0,57725	0,303649	0	0,0025015	0,0010604	2
117	118	0,24881	0,13088	0	0	0	2
105	119	0,16943	0,39113	0	0,0006981	0,0002959	2
119	120	0,07683	0,17737	0	0,0003207	0,000136	2
120	121	0,06501	0,15008	0	0,0006108	0,0002589	1
1	122	0,005912	0,01364	0	0	0	2
122	123	0,34084	0,78681	0	0,0009462	0,0004626	0
123	124	0,02363	0,054578	0	0,0004986	0,0002438	2
124	125	0,27641	0,094812	0	0,0012316	0,0006021	1
124	126	0,010838	0,025015	0	0,0007835	0,000383	1
126	127	0,27867	0,14659	0	0,0014548	0,0007112	1
126	128	0,051223	0,11825	0	0,0002137	0,0001045	1
128	129	0,062061	0,14326	0	0,0007479	0,0003656	1
128	130	0,072894	0,16827	0	0,0022793	0,0011143	1
130	131	0,022658	0,052305	0	0,0003561	0,0001741	0
131	132	0,04826	0,1114	0	0,002493	0,0012188	2
132	133	0,084719	0,19556	0	0,0031672	0,0015484	0

133	134	0,19865	0,19835	0	0,0033382	0,001632	1
134	135	0,20859	0,20827	0	0,002493	0,0012188	2
135	136	0,15395	0,15372	0	0	0	0

Anexo VII. Tabla de corrientes armónicas del sistema IEEE de 136 barras.

Armónico	1	5	11	13	17	%
BARRA	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	Distorsión
IN1	0.199826	0.199828	0.199830	0.199831	0.199832	1.00456
IN2	0.0277503	0.0277656	0.0278472	0.0279802	0.0282631	3.08697
IN3	0.0277503	0.0277656	0.0278472	0.0279802	0.0282631	3.08697
IN4	0.0272361	0.0272522	0.0273377	0.0274793	0.027768	3.09177
IN5	0.0267781	0.0267945	0.0268816	0.0270267	0.0273179	3.09483
IN6	0.0258416	0.025889	0.0260182	0.0262071	0.026547	3.1169
IN7	0.0224911	0.0224009	0.0223385	0.0223272	0.0223888	3.02057
IN8	0.00256867	0.0025686	0.00256867	0.00256867	0.00256867	3
IN9	0.0183203	0.01823	0.0181679	0.0181572	0.0182191	3.02581
IN10	0.00134098	0.0012776	0.00120041	0.00113066	0.00104083	2.44661
IN11	0.0163088	0.016249	0.0162192	0.0162323	0.0163159	3.04142
IN12	0.00125714	0.0012571	0.00125714	0.00125714	0.00125714	3
IN13	0.002682	0.0025477	0.00238951	0.00224853	0.00206452	2.43319
IN14	0.010861	0.0108586	0.0108831	0.0109318	0.0110411	3.0859
IN15	0.00326876	0.0031023	0.00290656	0.00273371	0.00250598	2.42741
IN16	0.00445553	0.0044555	0.00445553	0.00445552	0.00445552	3.00004
IN17	0.0021373	0.0021373	0.0021373	0.0021373	0.0021373	3.006464
IN18	0.0253991	0.0253993	0.0253995	0.0253996	0.0253997	3.45643
IN19	0.0253991	0.0253993	0.0253995	0.0253996	0.0253997	3.32132
IN20	0.0253991	0.0253993	0.0253995	0.0253996	0.0253997	3.011310
IN21	0.0253991	0.0253993	0.0253995	0.0253996	0.0253997	3.19203
IN22	0.00257095	0.0026188	0.00261885	0.00261886	0.00261887	3.1029
IN23	0.0224936	0.0224938	0.0224940	0.0224941	0.0224942	3.2392
IN24	0.00257095	0.0025709	0.00257098	0.00257099	0.00257100	3.9238
IN25	0.019253	0.019255	0.019257	0.019258	0.019259	3.43
IN26	0.0176331	0.0176333	0.0176335	0.0176336	0.0176337	3.37
IN27	0.0176331	0.0176333	0.0176335	0.0176336	0.0176337	3.201
IN28	0.0169989	0.0169991	0.0169993	0.0169994	0.0169995	3.10293
IN29	0.0129397	0.0129399	0.0129401	0.0129402	0.0129403	3.10293
IN30	0.00202175	0.0020411	0.00204121	0.00204122	0.00204123	3.9381
IN31	0.00063426	0.0006184	0.00061846	0.00061846	0.00061846	3.7432
IN32	0.0109179	0.0109181	0.0109183	0.0109184	0.0109185	3.728
IN33	0.00536754	0.0053436	0.0053438	0.0053439	0.0053440	3.23473
IN34	0.00441614	0.0044161	0.00441617	0.00441618	0.00441619	3.2456
IN35	0.00441614	0.0044161	0.00441617	0.00441618	0.00441619	3.2720
IN36	0.00555041	0.0055504	0.00555045	0.00555046	0.00555047	3.8894
IN37	0.00471203	0.0046400	0.00464004	0.00464005	0.00464006	3

IN38	0.00269564	0.0026236	0.00262365	0.00262366	0.00262367	3
IN39	0.00083838	0.0008601	0.00086013	0.00086014	0.00086014	3
IN40	0.0278051	0.0277554	0.0277293	0.0277303	0.0277638	3.00409
IN41	0.0278051	0.0277554	0.0277293	0.0277303	0.0277638	3.00409
IN42	6,81E+00	6,81E+00	6,81E+00	6,81E+00	6,81E+00	3
IN43	0.0277234	0.0276734	0.0276471	0.0276479	0.0276811	3.00403
IN44	0.0277234	0.0276734	0.0276471	0.0276479	0.0276811	3.00403
IN45	0.00068069	0.0006617	0.00063844	0.00061532	0.00059233	2.66867
IN46	0.0257624	0.0257317	0.0257311	0.02576	0.0258194	3.01506
IN47	0.0238911	0.0238022	0.023726	0.0236771	0.0236495	2.9814
IN48	0.0189105	0.0188218	0.0187467	0.0187004	0.0186746	2.97771
IN49	0.0135922	0.0135036	0.0134293	0.0133846	0.0133599	2.97007
IN50	0.00118628	0.0011371	0.00107976	0.00102742	0.00097053	2.5502
IN51	0.00118628	0.0011371	0.00107976	0.00102742	0.00097053	2.5502
IN52	0.00984521	0.0098058	0.0097891	0.00979705	0.00982951	3.01609
IN53	0.00984521	0.0098058	0.0097891	0.00979705	0.00982951	3.01609
IN54	0.00379585	0.0039431	0.00413434	0.00432726	0.0045654	3.60549
IN55	0.00098849	0.0010117	0.00104281	0.00107517	0.00111627	3.38991
IN56	0.00023722	0.0002271	0.00021538	0.00020474	0.00019302	2.54067
IN57	0.00525852	0.0050718	0.00486406	0.00467935	0.00447381	2.62877
IN58	0.00525852	0.0050718	0.00486406	0.00467935	0.00447381	2.62877
IN59	0.00503555	0.0048488	0.00464109	0.00445639	0.00425085	2.61305
IN60	0.00340036	0.0032881	0.00316406	0.003054	0.00293132	2.65587
IN61	0.00100337	0.0010033	0.00100337	0.00100337	0.00100337	3
IN62	0	0	0	0	0	0
IN63	0.00246219	0.0024621	0.00246219	0.00246219	0.00246219	3
IN64	0.0166621	0.0165692	0.0164765	0.016388	0.0163217	2.94946
IN65	0.0166621	0.0165692	0.0164765	0.016388	0.0163217	2.94946
IN66	0.0134977	0.0134078	0.0133288	0.0132678	0.0132171	2.95212
IN67	0.0126042	0.0125147	0.012438	0.0123815	0.0123335	2.95141
IN68	0.0117107	0.0115983	0.0114934	0.0114087	0.0113313	2.92297
IN69	0.0105939	0.010517	0.0104534	0.0104076	0.010369	2.95242
IN70	0.00089349	0.0008934	0.00089349	0.00089349	0.00089349	3
IN71	0.00780185	0.0076563	0.00750825	0.00737855	0.0072461	2.82208
IN72	0.00030533	0.0003053	0.00030533	0.00030533	0.00030533	3
IN73	5,47E+00	5,47E+00	5,47E+00	5,47E+00	5,47E+00	3
IN74	0.00515118	0.0050056	0.00485763	0.00472802	0.00459561	2.73263
IN75	0.0043694	0.0041944	0.00401045	0.00384535	0.00367275	2.60472
IN76	0.0178039	0.0179079	0.0180634	0.0182384	0.0185075	3.13589
IN77	0.0178039	0.0179079	0.0180634	0.0182384	0.0185075	3.13589
IN78	0.0167158	0.0168204	0.0169788	0.0171604	0.0174344	3.14933
IN79	0.0151678	0.0152727	0.0154331	0.0156193	0.0158966	3.16847
IN80	0.0141247	0.014269	0.0144788	0.014713	0.0150442	3.2196
IN81	0.0108614	0.0108741	0.0109058	0.0109541	0.0110462	3.07318

IN82	0.00932735	0.0093400	0.00937191	0.00942047	0.00951281	3.08588
IN83	0.00094830	0.0009483	0.00094830	0.00094830	0.00094830	3
IN84	0.00533949	0.0053521	0.00538406	0.00543266	0.00552504	3.15249
IN85	0.00269094	0.0028351	0.00301583	0.00319836	0.00345264	3.93618
IN86	0.0299986	0.0298663	0.0297291	0.0295924	0.0295589	2.96853
IN87	0.0299986	0.0298663	0.0297291	0.0295924	0.0295589	2.96853
IN88	0.0123525	0.0120324	0.0116536	0.01128	0.0109279	2.70375
IN89	0.0166699	0.0168608	0.0171194	0.0173928	0.0177368	3.19375
IN90	0.0116917	0.0116884	0.0116984	0.0117194	0.0117669	3.02843
IN91	0.00750786	0.0075049	0.00751684	0.00754214	0.00759292	3.05054
IN92	0.00750786	0.0075049	0.00751684	0.00754214	0.00759292	3.05054
IN93	0.00664317	0.0066403	0.00665226	0.00667778	0.00672872	3.05758
IN94	0.00569487	0.0056920	0.00570404	0.00572971	0.00578078	3.06767
IN95	0.00486451	0.0048616	0.00487369	0.0048994	0.00495049	3.07956
IN96	0.00406076	0.0040180	0.00398001	0.00395688	0.00394466	2.95133
IN97	0.00154037	0.0016190	0.00171705	0.0018121	0.00193678	3.78221
IN98	0.00083036	0.0008303	0.00083036	0.00083036	0.00083036	3
IN99	0.00083036	0.0008303	0.00083036	0.00083036	0.00083036	3
IN100	0.0322457	0.0291731	0.0251539	0.0223008	0.0180027	2.13328
IN101	0.0322457	0.0291731	0.0251539	0.0223008	0.0180027	2.13328
IN102	0.0316883	0.0286233	0.0246316	0.0218307	0.0175241	2.12484
IN103	4,37E+00	4,29E+00	4,17E+00	4,06E-01	3,99E+00	2.80874
IN104	0.0310038	0.0279554	0.0240077	0.0212756	0.0169733	2.11601
IN105	0.0309168	0.0278758	0.0239391	0.0212193	0.0169204	2.1159
IN106	0.0289651	0.0260294	0.0222432	0.0196528	0.0154917	2.09524
IN107	0.0126022	0.0112856	0.00961672	0.00849928	0.00663501	2.08134
IN108	0.00920233	0.0082307	0.00700745	0.00619409	0.00482051	2.07677
IN109	0.00498039	0.0044464	0.00378196	0.00334345	0.00259324	2.07085
IN110	0.00271697	0.0024228	0.00205943	0.00182084	0.00140908	2.06698
IN111	0.00335488	0.0030069	0.0025628	0.00226511	0.00176951	2.08361
IN112	0.00115608	0.0010358	0.00088264	0.00078013	0.00060903	2.08241
IN113	0.00049550	0.0004438	0.00037819	0.00033427	0.00026087	2.0818
IN114	0	0	0	0	0	0
IN115	0.00170599	0.0015248	0.00129783	0.00114725	0.00089184	2.07473
IN116	0	0	0	0	0	0
IN117	0.00271697	0.0024228	0.00205943	0.00182084	0.00140908	2.06698
IN118	0	0	0	0	0	0
IN119	0.00176997	0.0016810	0.00155857	0.00146192	0.00134571	2.50316
IN120	0.00101175	0.0009836	0.00094509	0.00091465	0.00087796	2.72078
IN121	0.00066340	0.00066340	0.00066340	0.00066340	0.00066340	3
IN122	0.0222656	0.0222077	0.0221669	0.0221545	0.0221827	3.00119
IN123	0.0222656	0.0222077	0.0221669	0.0221545	0.0221827	3.00119
IN124	0.0212124	0.0211219	0.0210387	0.0209821	0.0209648	2.97988
IN125	0.0013709	0.0013709	0.0013709	0.0013709	0.0013709	3

IN126	0.0192865	0.0192141	0.0191546	0.0191234	0.0191289	2.99077
IN127	0.00161934	0.0016193	0.00161934	0.00161934	0.00161934	3
IN128	0.016795	0.0167231	0.016666	0.0166403	0.0166495	2.99239
IN129	0.0008324	0.0008324	0.000832	0.00083	0.000832	3
IN130	0.0157247	0.0156529	0.0155965	0.0155725	0.0155828	2.99287
IN131	0.0131876	0.0131159	0.0130603	0.0130381	0.0130496	2.99282
IN132	0.0127912	0.0127024	0.0126243	0.0125786	0.0125641	2.97278
IN133	0.0100162	0.0100487	0.0101156	0.0102053	0.0103267	3.10669
IN134	0.00649076	0.00635029	0.00618925	0.00604439	0.00589365	2.76815
IN135	0.00277498	0.00263451	0.00247349	0.00232864	0.00217791	2.47579
IN136	0	0	0	0	0	0

Anexo VIII. Hojas de vida de los autores

HOJA DE VIDA	
1. DATOS PERSONALES	
Nombres:	Alvaro Roberto
Apellidos:	Llamba Lema
Cédula de Identidad:	050356267-0
Fecha de Nacimiento:	Salcedo, 15 de Junio de 1995
Dirección Domiciliaria:	Santa Ana de Mulliquindil
Número de Teléfono del Domicilio:	032705112
Número de Celular:	0983900630
Correo Electrónico:	alvaro.llamba2670@utc.edu.ec
2. ESTUDIOS REALIZADOS	
Nivel Secundario:	Colegio Técnico Industrial “19 de Septiembre”. Cantón Salcedo.
Nivel Primario:	Escuela Fiscal “General Rumiñahui”. Cantón Salcedo.
3. TITULOS	
Bachiller Técnico Industrial Especialidad Instalaciones, equipos y Maquinas Eléctricas	

HOJA DE VIDA

1. DATOS PERSONALES

Nombres:	Erik Eduardo
Apellidos:	Oñate Zurita
Cédula de Identidad:	050402067-8
Fecha de Nacimiento:	Latacunga, 22 de Septiembre de 1994
Dirección Domiciliaria:	Poaló Centro
Número de Teléfono del Domicilio:	032257-041
Número de Celular:	0987980599
Correo Electrónico:	erikoz1994@gmail.com

2. ESTUDIOS REALIZADOS

Nivel Secundario:	Colegio Técnico Industrial "Ramon Barba Naranjo". Cantón Latacunga.
Nivel Primario:	Escuela Fiscal Mixta "García Moreno". Cantón Latacunga.

3. TITULOS

Bachiller Técnico Industrial Especialidad Instalaciones Mantenimiento de equipos y Maquinas Eléctricas

HOJA DE VIDA

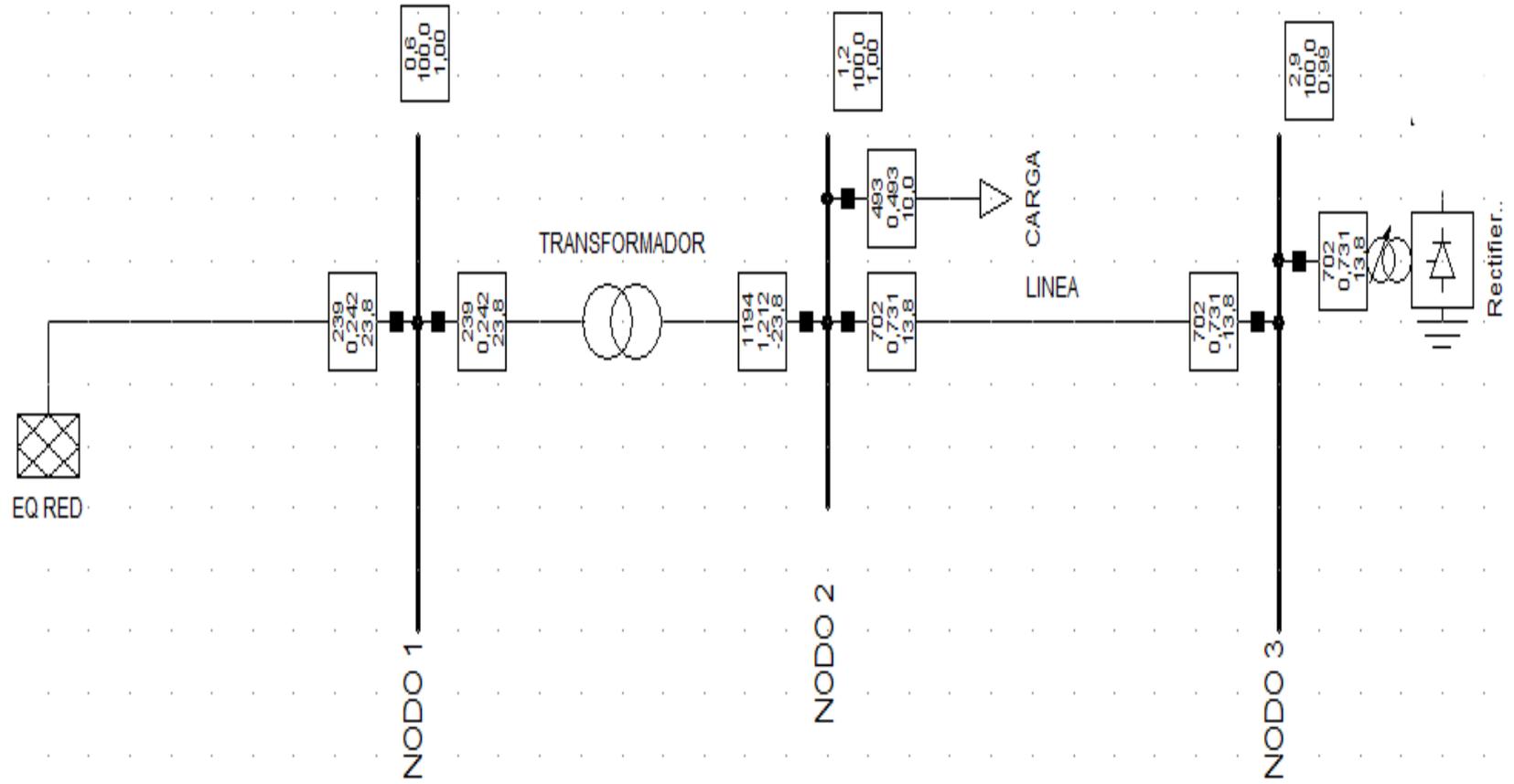
1. DATOS PERSONALES

Apellidos:	Quinatoa Caiza
Nombres:	Carlos Iván
Fecha de Nacimiento:	01/08/1988
Cédula de ciudadanía:	0503287864
Estado Civil:	Soltero
Dirección:	Tanicuchi – Latacunga
Celular:	032701605/0995830715
Email:	carlos.quinatoa4@utc.edu.ec

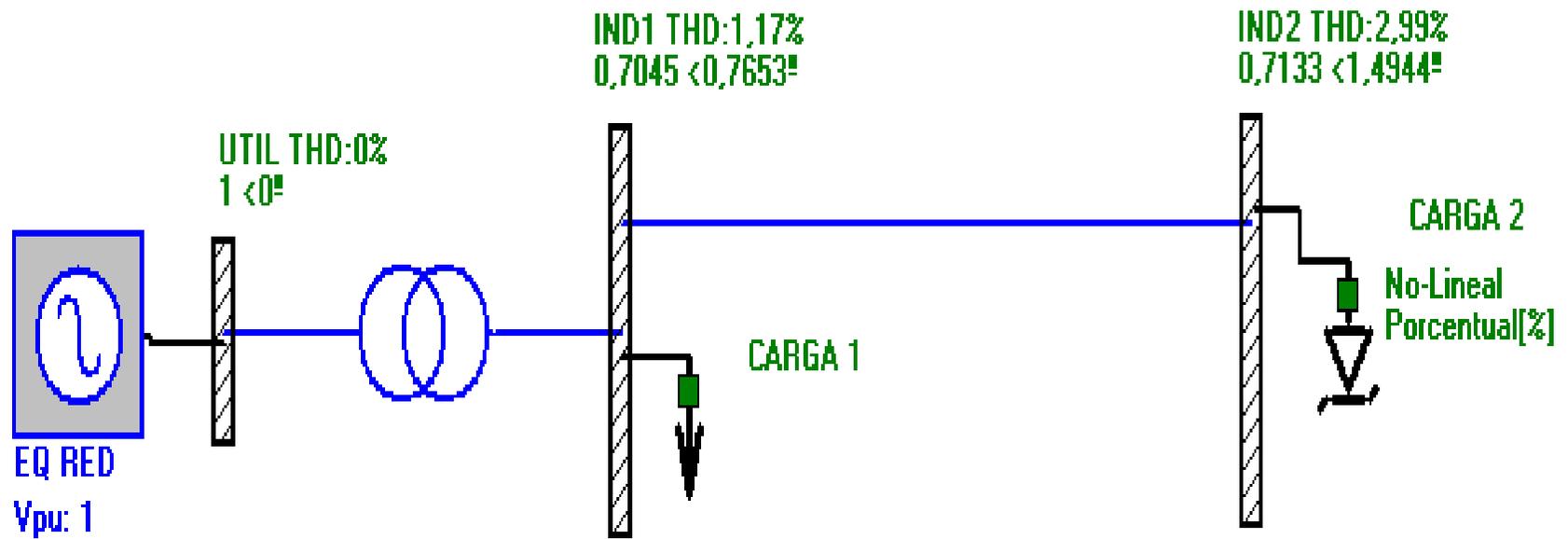
2. EDUCACIÓN

<ul style="list-style-type: none">• 2016-2018 <i>Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia / Universidad Nacional de San Juan-Argentina</i>, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Magister en Ingeniería Eléctrica.
<ul style="list-style-type: none">• 2014-2018 <i>Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina</i>, Instituto de Energía Eléctrica, Estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica.
<ul style="list-style-type: none">• 2007-2013 <i>Universidad Técnica de Cotopaxi</i>, Latacunga-Cotopaxi-Ecuador, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.
<ul style="list-style-type: none">• 2000-2006 <i>Colegio. Gral." Marco Aurelio Subía"</i>, Tanicuchi-Latacunga-Ecuador, Bachiller, Técnico en Electricidad.
<ul style="list-style-type: none">• 1994-2000 <i>Escuela Mixta" Zamora"</i>, Tanicuchi-Latacunga-Ecuador.

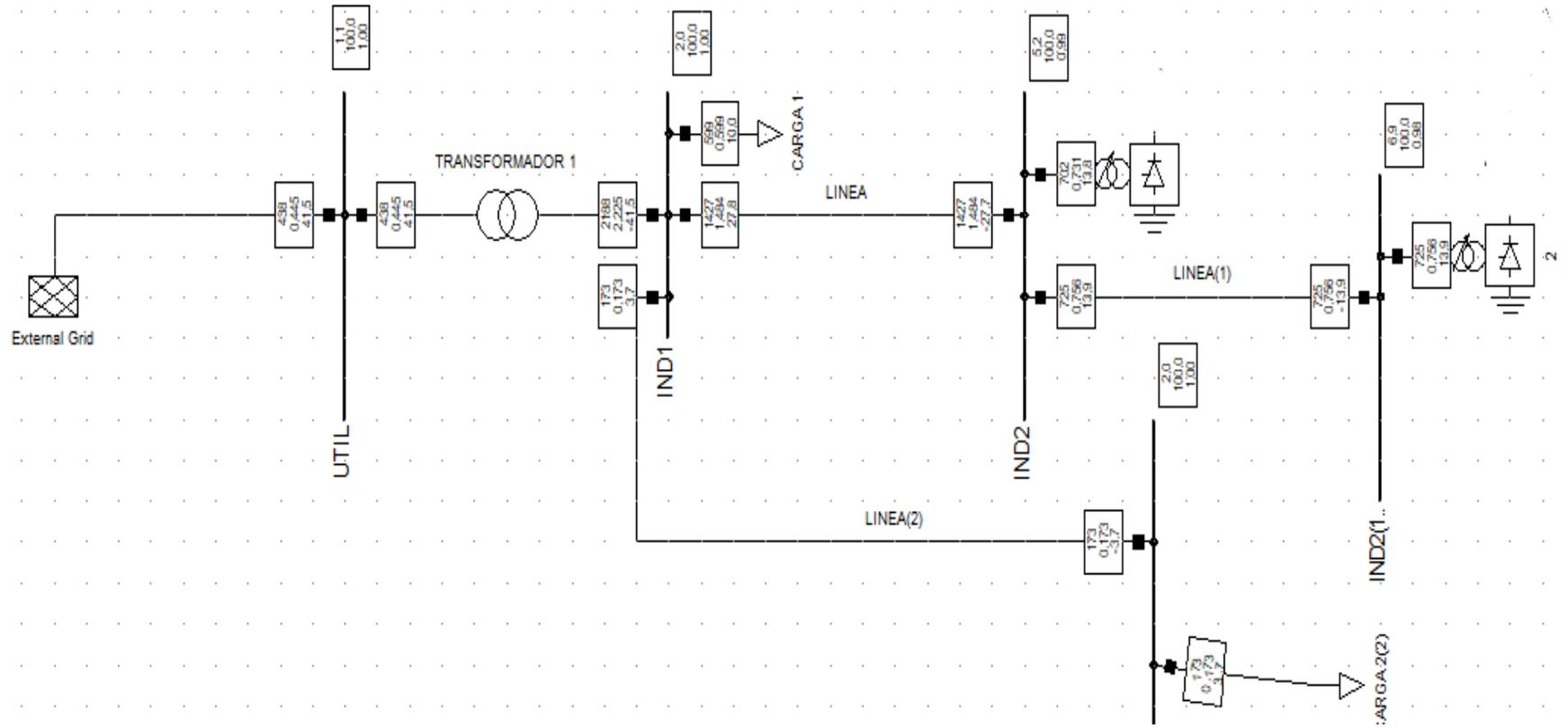
Anexo IX. Sistema de tres barras modelado en DIgSILENT.



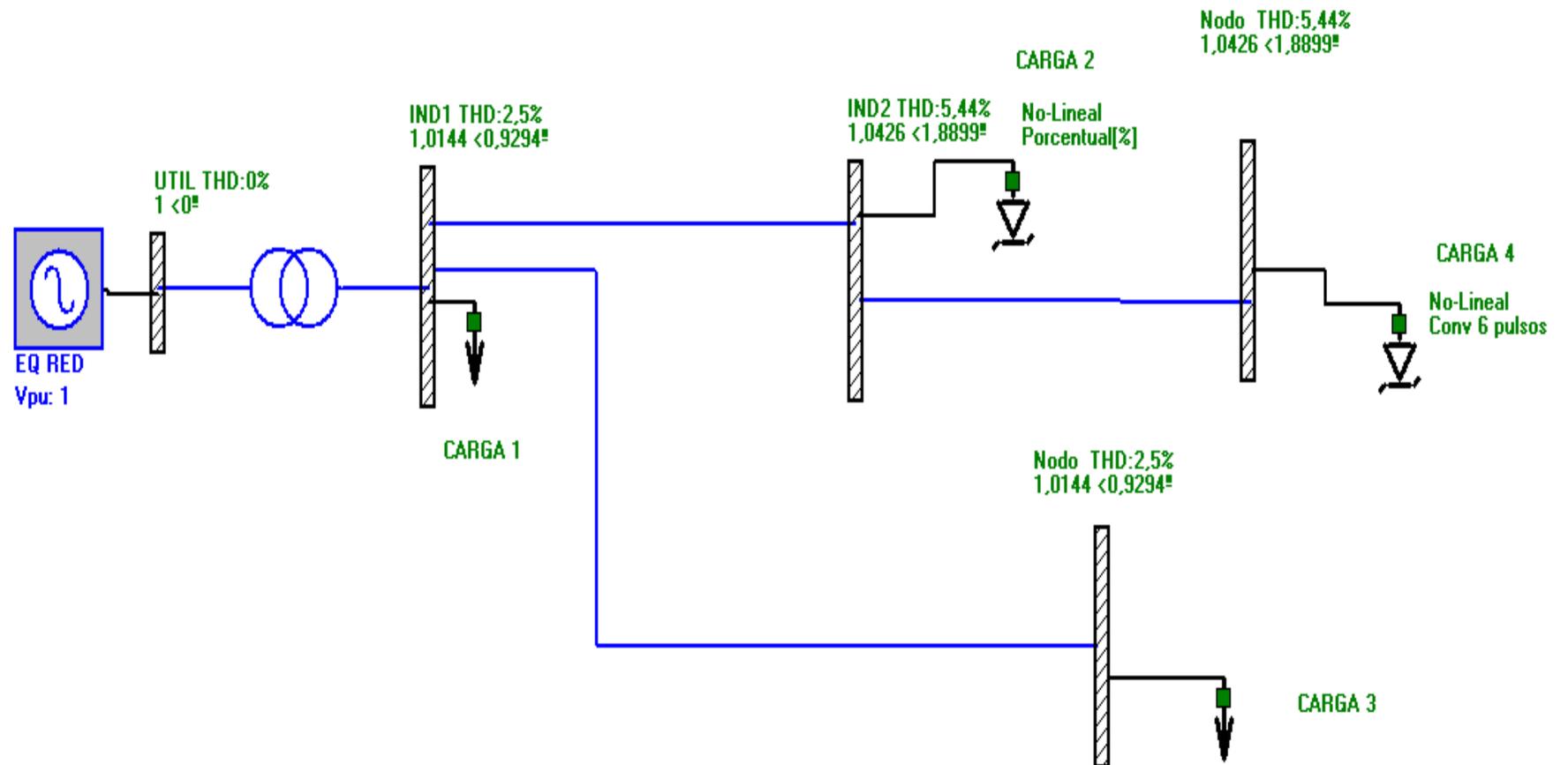
Anexo X. Sistema de tres barras modelado en SimulAr_SR.



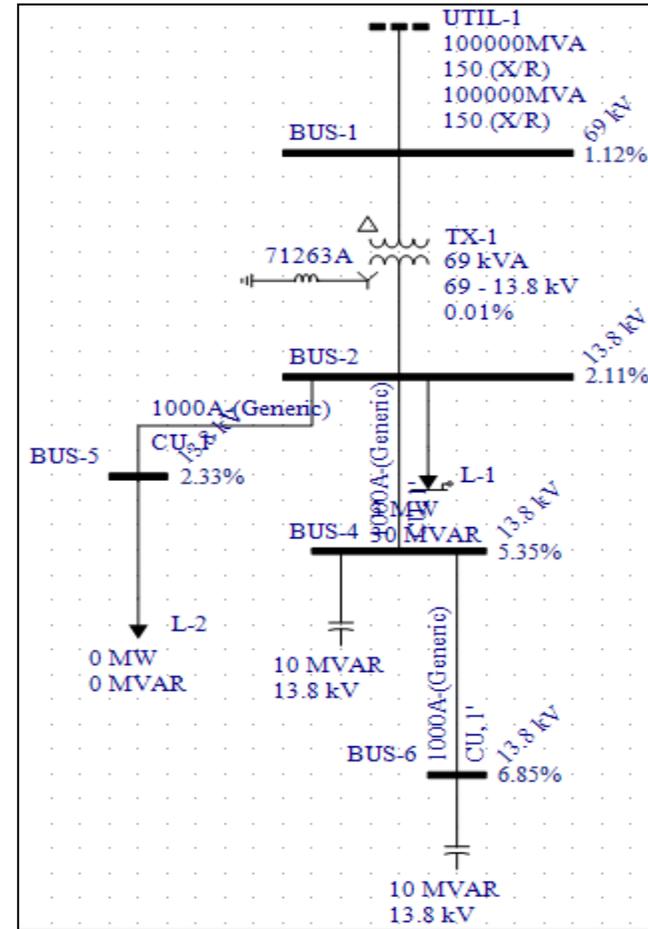
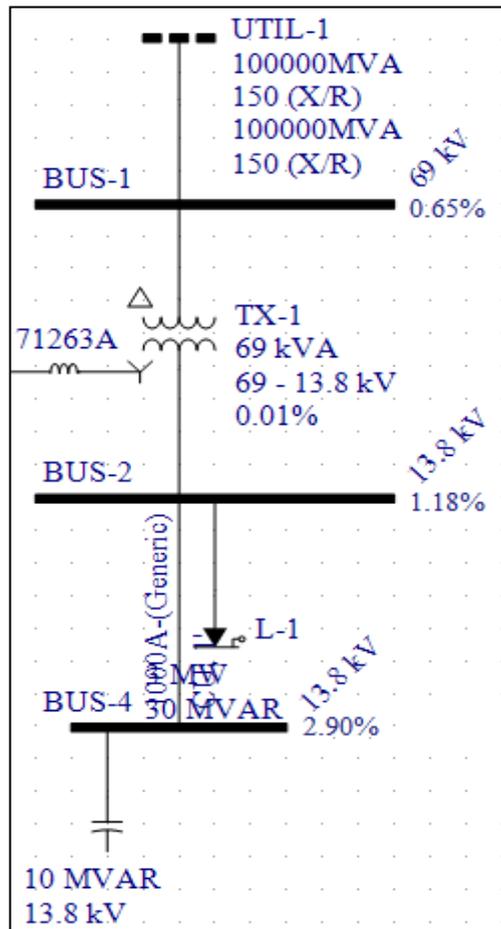
Anexo XI. Sistema de cinco barras modelado en SimulAr_SR.



Anexo XII. Sistema de cinco barras modelado en SimulAr_SR.



Anexo XIII. Sistema de cinco y tres barras modelado en EasyPower.



Anexo XIV. Guía Práctica

GUÍA PRÁCTICA ALUMNO					
FACULTAD:	CIYA	CARRERA:	INGENIRIA ELÉCTRICA		
ASIGNATURA:	DISTRIBUCIÓN	PERÍODO ACADÉMICO		NIVEL	
DOCENTE:		FECHA:		PRÁCTICA N°:	
INTEGRANTES					
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLARÁ LA PRÁCTICA:					
TEMA DE LA PRÁCTICA:	DISTRORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN				
INTRODUCCIÓN:					
<p>Distorsión</p> <p>En el sistema de energía eléctrica, las cargas instaladas en su totalidad no son lineales, hay presencia de cargas no lineales, el aumento de la demanda de energía y la electrónica de potencia en los sistemas eléctricos ha provocado el aumento de las distorsiones en la red en los últimos años los cuales ha llevado a recomendaciones más estrictas en la IEEE Std. 519 y límites impuestos por las empresas públicas de distribución eléctrica, los efectos de las cargas no lineales causan que el sistema eléctrico tenga problemas de funcionamiento en estado estable, fallas en equipos de medición y protección</p> <p>Distorsiones armónicas</p> <p>Las distorsiones armónicas son básicamente señales de tensión o corriente con una frecuencia, que es un múltiplo entero de la fundamental; estas se suman a la onda fundamental y la distorsionan generando con ello una “distorsión armónica”</p> <p>Causas de distorsión armónica</p> <p>Las distorsión armónica suele producirse al accionar equipos con núcleo magnético saturado y ciertos convertidores estáticos como; rectificadores, fuentes conmutadas y cargas no lineales</p>					

específicamente electrónicos, incluso algunos equipos de protección eléctrica pueden contribuir a la generación de armónicos en la red.

Consecuencias de distorsión armónica

La presencia de armónicos en una instalación, o red de distribución eléctrica puede acarrear innumerables problemas, tales como:

- Sobrecalentamiento de los conductores debido al efecto pelicular.
- Disparos intempestivos de interruptores automáticos y diferenciales.
- Disminución del factor de potencia de una instalación y envejecimiento.
- Deterioro de la forma de onda fundamental de la tensión, mal funcionamiento de los aparatos eléctricos.
- Calentamiento, degradaciones en los aislamientos, embalamientos y frenados en motores asíncronos.
- Degradaciones del aislamiento de los transformadores, pérdida de suministro de potencia.

Efectos que acarrea la distorsión armónica

Todos los efectos acarrear pérdidas económicas importantes debido a:

- Necesidad de sobredimensionamiento de los conductores y de las potencias contratadas en una instalación.
- Necesidad de suministro con mayor frecuencia de los aparatos y máquinas dañadas.
- Paradas de producción debido a los disparos intempestivos de los elementos de protección y mando.

Soluciones para contrarrestar los armónicos

Sobredimensionamiento de conductores, usos de un neutro para cada fase.

- Uso de transformadores de aislamientos estrella triángulo, con secundario en zigzag o con doble secundario.
- Filtros pasivos como impedancias anti armónicas o los llamados “shunt resonantes”, filtros activos convertidores limpios.
- Utilización de elementos diferenciales que soportan altas tasas de THD.
- Separación de los elementos no lineales de las cargas limpias en una instalación eléctrica.

OBJETIVOS:

GENERAL

- Comprender el funcionamiento de los sistemas de distribución frente a la presencia de armónicos.

ESPECÍFICOS

- Investigar las definiciones de las distorsiones armónicas.
- Realizar ensayos mediante la inyección de corriente en diferentes nodos de un sistema de distribución.
- Verificación y evaluación de resultados obtenidos tras la simulación.

LISTADO DE EQUIPOS, MATERIALES, RECURSOS:

MATERIALES:

- Computadora
- Datos del sistema de distribución; nodos, resistencias, impedancias, potencia activa, potencia reactiva, ángulo de desfase.
- Datos de las cargas a inyectarse al sistema; potencia activa, potencia reactiva, ubicación de los nodos.

INSTRUCCIONES:

Advertencia: ¡se debe tomar en cuenta que todos los datos a ingresar deben ser en pu. Caso contrario el algoritmo no podrá realizar sus operaciones!

- Identificar con exactitud el número de líneas del sistema con el que se va a trabajar.
- Llenar todos los datos con números, si se introduce alguna letra saldrá error.
- Realizar el ingreso de datos de forma ordenada caso contrario no se puede inicializar el algoritmo.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

Calculo de corrientes aguas arriba aplicando la primera ley de Kirchhoff.

Calculo de voltajes aguas abajo aplicando la segunda ley de Kirchhoff.

Determinación de corrientes armónicas.

Determinación de voltajes armónicos.

Linealización de las cargas no lineales inyectadas al sistema.

Calculo del porcentaje de distorsión armónica en cada nodo.

Obtención de grafica total (THDi) del sistema analizado.

RESULTADOS OBTENIDOS:

➤ **Datos corrientes y voltajes en frecuencia nominal**

Tabla 1.- Voltajes y corrientes a frecuencia fundamental

Barras	Voltaje (pu)	Corriente (pu)
1		
2		
3		
4		
5		

➤ **Datos corrientes y voltajes en frecuencia armónica 3,5,7.....n**

Tabla 2.- Voltajes y corrientes a frecuencia armónica

Barras	Voltaje (pu) armónico 3	Corriente (pu) armónico 3
1		
2		
3		
4		
5		

Grafico 1.- Corrientes armónicas

➤ **Datos de las distorsiones armónicas en cada barra (THD).**

Tabla 3.- Porcentaje de distorsión armónica

Barra	THD (%)
1	
2	
3	
4	
5	

Grafico 2.- Distorsiones armónicas producidas en cada barra.

➤ **Análisis de los resultados obtenidos**

CONCLUSIONES:

-
-
-
-

RECOMENDACIONES:

-
-

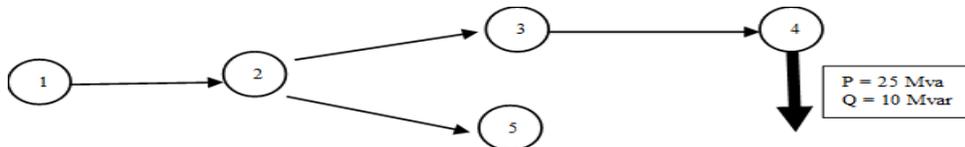
BIBLIOGRAFÍA

[1] G. CONSTANTE, «FLUJO DE POTENCIA DE ARMÓNICOS UTILIZANDO MATLAB», ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2014.

ANEXOS:

➤ Resolución del flujo de carga armónico

Sistema de 5 barras que contiene una carga conectada a la barra 4 con una potencia de carga no lineal de P: 25Mva y Q: 10Mvar con una influencia del armónico 5 que afecta a la carga.



NODO1	NODO2	Rkm(pu)	Xkm(pu)	Bkm/2(pu)	P(pu)	Q (pu.)	alpha
1	2	0.005	0.0014	0.0001	0.126	0.06	0
2	3	0.002	0.0016	0.0001	0	0	0
3	4	0.0037	0.0008	0.0001	0	0	0
2	5	0.0027	0.0022	0.0001	0	0	0

1. Valores iniciales

- $V = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

- $P_n = P * V^{\alpha}$ $Q_n = Q * V^{\alpha} * j$:

$$P_n = \begin{pmatrix} 0.126 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1^0 \\ 1^0 \\ 1^0 \\ 1^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.126 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Q_n = \begin{pmatrix} 0.06 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1^0 \\ 1^0 \\ 1^0 \\ 1^0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} j \\ j \\ j \\ j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.06j \\ 0j \\ 0j \\ 0j \end{pmatrix}$$

- $S = P_n + Q_n$

$$S = \begin{pmatrix} 0.126 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.06j \\ 0j \\ 0j \\ 0j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.126 + 0.06j \\ 0 + 0j \\ 0 + 0j \\ 0 + 0j \end{pmatrix}$$

- $I = \left(\frac{S}{V}\right)^*$

$$I = \begin{pmatrix} 0.126 - 0.06j \\ 0 - 0j \\ 0 - 0j \\ 0 - 0j \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.126 - 0.06j \\ 0 - 0j \\ 0 - 0j \\ 0 - 0j \end{pmatrix}$$

Corrientes

$$N1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad N2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix} \quad BKM/2 = \begin{pmatrix} 0.0001 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \end{pmatrix}$$

- $I[N1 - 1] = I[N1 - 1] + ([BKM/2] * V[N1 - 1]) * \text{armonico} * 1j$
- $I[N2 - 1] = I[N2 - 1] + ([BKM/2] * V[N2 - 1]) * \text{armonico} * 1j$
- $I[N1 - 1] = I[N1 - 1] + I[N2 - 1]$

Fundamental

- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 1 * 1 * j) = 0 - 0.0001j$
- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 1 * 1) * j = 0 - 0.0001j$
- $I[N1 - 1] = (0 - 0.0001j) + (0 + 0.0001j) = 0.0001j$

5 armónico

- $I[N1 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001) * 1 * 5 * j = 0 + 0.0005j$
- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 5 * 1) * j = 0 + 0.0005j$
- $I[N1 - 1] = (0 + 0.0005j) + (0 + 0.0005j) = 0 + 0.0010j$

Fundamental

- $I[N1 - 1] = (0 - 0.0002j) + (0.0001 * 1 * 1 * j) = 0 + 0.001j$
- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 1 * 1) * j = 0 - 0.001j$
- $I[N1 - 1] = (0 - 0.0001j) + (0 - 0.0001j) = 0.0001j$

5 armónico

- $I[N1 - 1] = (0 + 0.00010j) + (0.0001 * 1 * 5 * j) = 0 + 0.00015j$
- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 5 * 1) * j = 0 + 0.0005j$
- $I[N1 - 1] = (0 + 0.00015j) + (0 + 0.0005j) = 0 + 0.00065j$

Fundamental

- $I[N1 - 1] = (0 - 0.0003j) + (0.0001 * 1 * 1 * j) = 0 + 0.0003j$

- $I[N2 - 1] = (0 + 0j) + (0.0001 * 1 * 1) * j = 0 + 0.001j$
- $I[N1 - 1] = (0 + 0.0003j) + (0 + 0.0001j) = 0 + 0.0004j$

5 armónico

- $I[N1 - 1] = (0 + 0.00020j) + (0.0001 * 5 * 1 * j) = 0 + 0.00025j$
- $I[N2 - 1] = (0 - 0j) + (0.0001 * 5 * 1) * j = 0 + 0.005j$
- $I[N1 - 1] = (0 + 0.00020j) + (0 + 0.0005j) = 0 + 0.00025j$

Fundamental

- $I[N1 - 1] = (0 + 0.00025j) + (0.0001 * 5 * 1 * j) = 0 + 0.00030j$
- $I[N2 - 1] = (0.126 + 0.06j) + (0.0001 * 1 * 1) * j = 0.126 + 0.06001j$
- $I[N1 - 1] = (0.126 + 0.0601j) + (0 + 0.0007j) = 0.126 + 0.06001j$

5 armónico

- $I[N2 - 1] = (0 + 0.00025j) + (0.0001 * 5 * 1) * j = 0 + 0.00030j$
- $I[N2 - 1] = (0.126 - 0.06j) + (0.0001 * 5 * 1) * j = 0.126 - 0.06051j$
- $I[N1 - 1] = (0.126 + 0.0601j) + (0 + 0.00030j) = 0.126 - 0.06003j$

$$I = \begin{pmatrix} 0.126 - 0.06001j \\ -0.0004j \\ -0.0001j \\ -0.0001j \end{pmatrix}$$

$$I^5 = \begin{pmatrix} 0.126 - 0.06001j \\ 0 + 0.00025j \\ 0 + 0.00020j \\ 0 + 0.00010j \end{pmatrix}$$

Voltajes

$$N1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad N2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

- $N1 = NOD01$
- $N2 = NOD02$
- $Z = [RKM] + (XKM) * \text{armónico} * 1j$
- $V[N2 - 1] = V[N1 - 1] - Z * I[N2 - 1]$

$$\begin{aligned}
Z &= \begin{pmatrix} 0.005 \\ 0.002 \\ 0.0037 \\ 0.0027 \end{pmatrix} + \left[\begin{pmatrix} 0.0014 \\ 0.0016 \\ 0.0008 \\ 0.0022 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} j \\ j \\ j \\ j \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 0.005 + 0.0014j \\ 0.002 + 0.0016j \\ 0.0037 + 0.0008j \\ 0.0027 + 0.0022j \end{pmatrix} \\
V &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \left[\begin{pmatrix} 0.005 + 0.0014j \\ 0.002 + 0.0016j \\ 0.0037 + 0.0008j \\ 0.0027 + 0.0022j \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.126 + 0.06001j \\ 0 + 0.0004j \\ 0 + 0.0003j \\ 0 + 0.0002j \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} j \\ j \\ j \\ j \end{pmatrix} \right] \\
&= \begin{pmatrix} 0.99928698 + 0.00012004j \\ 0.99928746 + 0.000119494j \\ 0.99928754 + 0.0001129j \\ 0.9992872 + 0.0001194j \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Linealización de la carga

$$P_4^{(1)} = V_4^{(1)} I_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})$$

$$Q_4^{(1)} = V_4^{(1)} I_4^{(1)} \sen(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})$$

$$V = \begin{pmatrix} 0.99928698 + 0.00012004j \\ 0.99928746 + 0.000119494j \\ 0.99928754 + 0.0001129j \\ 0.9992872 + 0.0001194j \end{pmatrix}$$

$$V^5 = \begin{pmatrix} 0.998973 - 0.00059974j \\ 0.998985 - 0.00060274j \\ 0.998987 - 0.0006045j \\ 0.998979 - 0.0006019j \end{pmatrix}$$

$$U_o = (\delta_2^{(1)} V_2^{(1)}, \delta_3^{(1)} V_3^{(1)}, \delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_1^{(5)} V_1^{(5)}, \delta_2^{(5)} V_2^{(5)}, \delta_3^{(5)} V_3^{(5)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)}, \alpha_m, \beta_m) \quad (16.22)$$

Para la liberalización utilizamos

$$U_o = (\delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)}) \quad (16.23)$$

$$U_o = (\delta_4^{(1)} V_4^{(1)}, \delta_4^{(5)} V_4^{(5)}, \alpha_m, \beta_m) \quad (16.24)$$

$$U_o = (0.98 \text{ pu. } -0.00523313 \text{ rad}, 0.1V \text{ } 0 \text{ rad}, 0, 0)$$

Tenga en cuenta que se supone que las variables de dispositivo no lineales α_m, β_m son cero porque no hay variables de dispositivo definidas en este ejemplo para la carga no lineal en el bus 4.

Con $P_4^{(1)}: 250W$ correspondiente a 0.25 pu., $Q_4^{(1)} = 100 VAr$ correspondiente a 0.100 pu, $V_4^{(1)} = 0.9872$ pu, $\delta_4^{(1)} = 0.005233$ *radianes*, uno obtiene:

$$\varepsilon_4^{(1)} = \tan^{-1} \left(\frac{Q_4^{(1)}}{P_4^{(1)}} \right) = 0.3805 \text{ rad}$$

Angulo real de la carga con respecto a la barra en la iteración fundamental

$$\gamma_4^{(1)} = \delta_4^{(1)} - \varepsilon_4^{(1)} = -0.38391 \text{ rad}$$

Suponiendo que la barra 1 sea el bus oscilante ($\delta_1^{(1)} = 0$ *radianes* y $V_1^{(1)}$) se halla la componente real de la corriente.

$$G_{r,4}^{(1)} = \frac{P_4^{(1)} \cos(\gamma_4^{(1)})}{V_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})} = 0.2514 \text{ pu}$$

$$G_{i,4}^{(1)} = \frac{P_4^{(1)} \sen(\gamma_4^{(1)})}{V_4^{(1)} \cos(\delta_4^{(1)} - \gamma_4^{(1)})} = -0.1015 \text{ pu}$$

Corriente no lineal fundamental

$$I_4^{(1)} = \sqrt{(G_{r,4}^{(1)})^2 + (G_{i,4}^{(1)})^2} = 0.2711 \text{ pu}$$

$$I_4^{(1)} = 0.2711 \text{ pu.} \quad \gamma_4^{(1)} = -0.38391 \text{ radianes}$$

Los componentes de la corriente del quinto armónico de la corriente de carga no lineal en la barra 4 son:

$$g_{r,4}^{(1)} = 0.3(V_4^{(1)})^3 \cos(3\delta_4^{(1)}) + 0.3(V_4^{(5)})^2 \cos(3\delta_4^{(5)})$$

$$g_{r,4}^{(1)} = 0.2994 \text{ pu}$$

$$g_{i,4}^{(1)} = 0.3(V_4^{(1)})^3 \sen(3\delta_4^{(1)}) + 0.3(V_4^{(5)})^2 \sen(3\delta_4^{(5)})$$

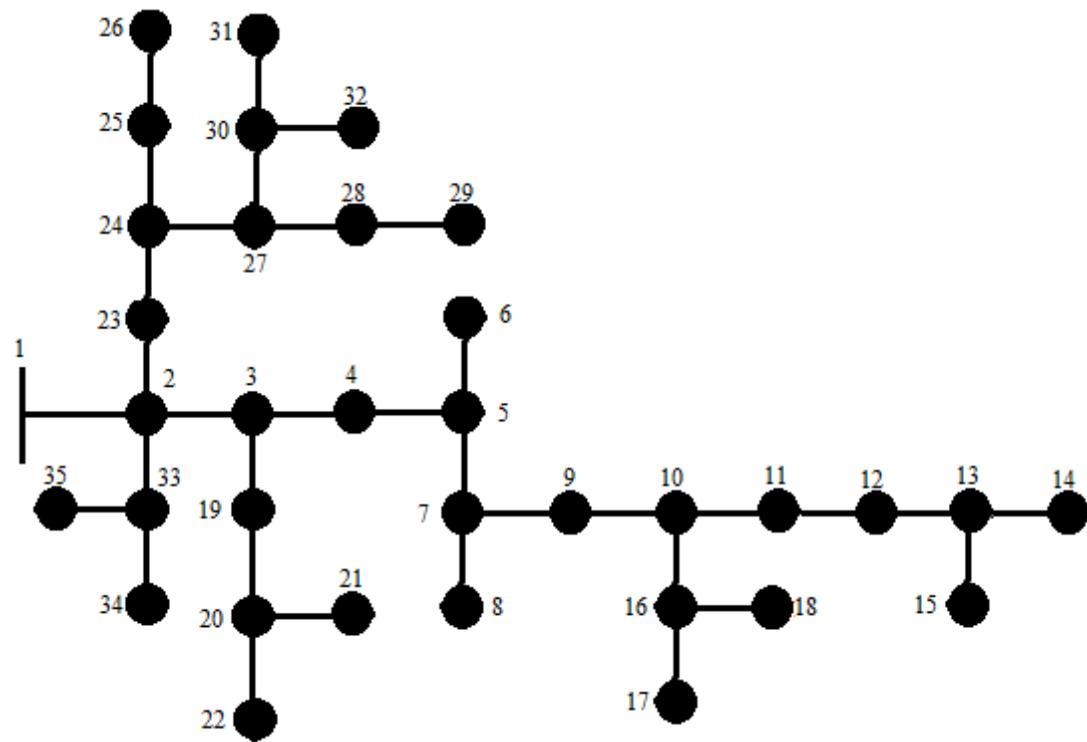
$$g_{i,4}^{(1)} = -0.003036 \text{ pu}$$

$$I_4^{(5)} = \sqrt{\left(g_{r,4}^{(5)}\right)^2 + \left(g_{i,4}^{(5)}\right)^2} = 0.2994 \text{ pu}$$

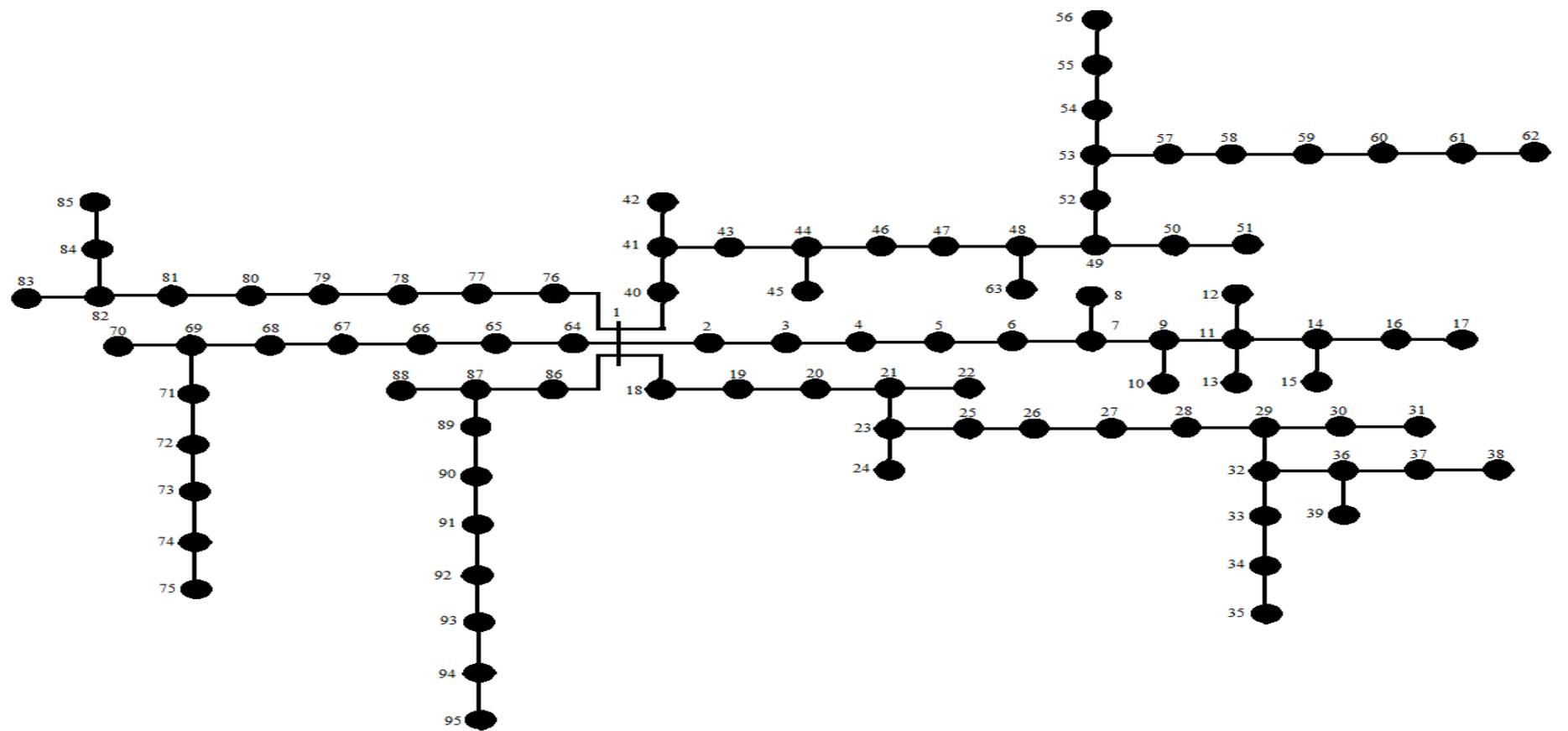
$$\varepsilon_4^{(5)} = \tan^{-1} \left(\frac{\left|g_{i,4}^{(5)}\right|}{\left|g_{r,4}^{(5)}\right|} \right) = 0.01014 \text{ rad}$$

$$\gamma_4^{(5)} = \delta_4^{(5)} - \varepsilon_4^{(5)} = -0.01014 \text{ rad}$$

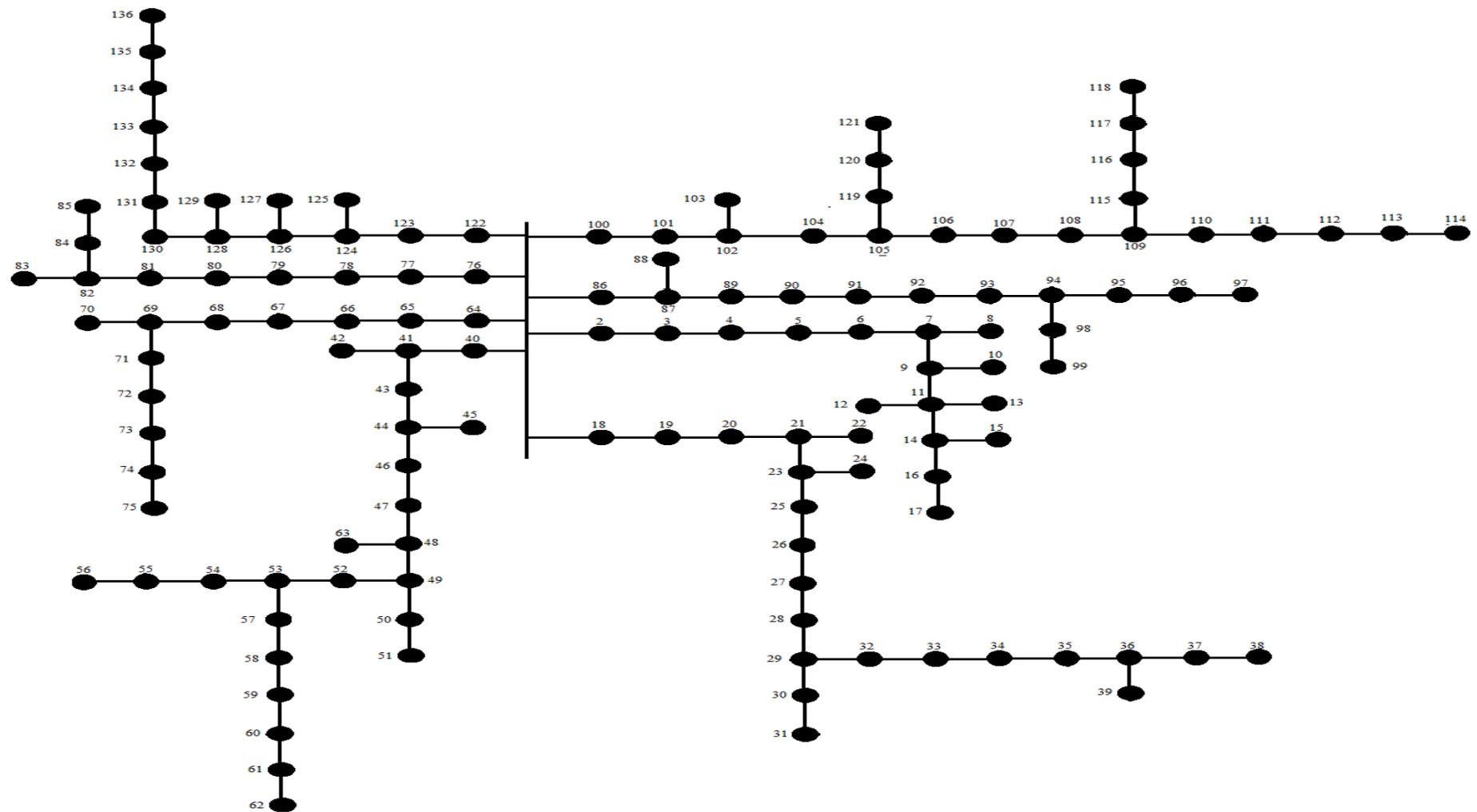
$$I_4^{(5)} = 0.2994 \text{ pu} \quad \gamma_4^{(5)} = -0.01014 \text{ radianes}$$



➤ Ejemplo de 35 barras.



➤ Ejemplo de 95 barras.



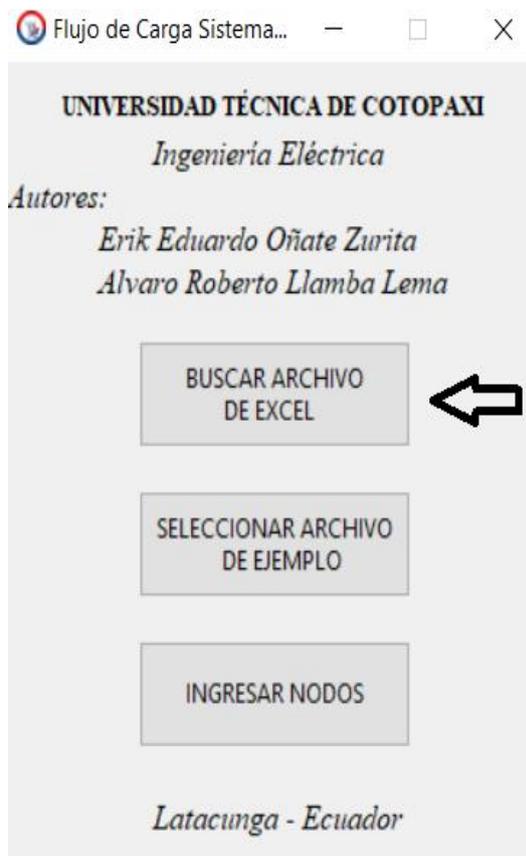
➤ Ejemplo de 136 barras.

1. Interpretación y resultados mostrados en la interfaz de Python.

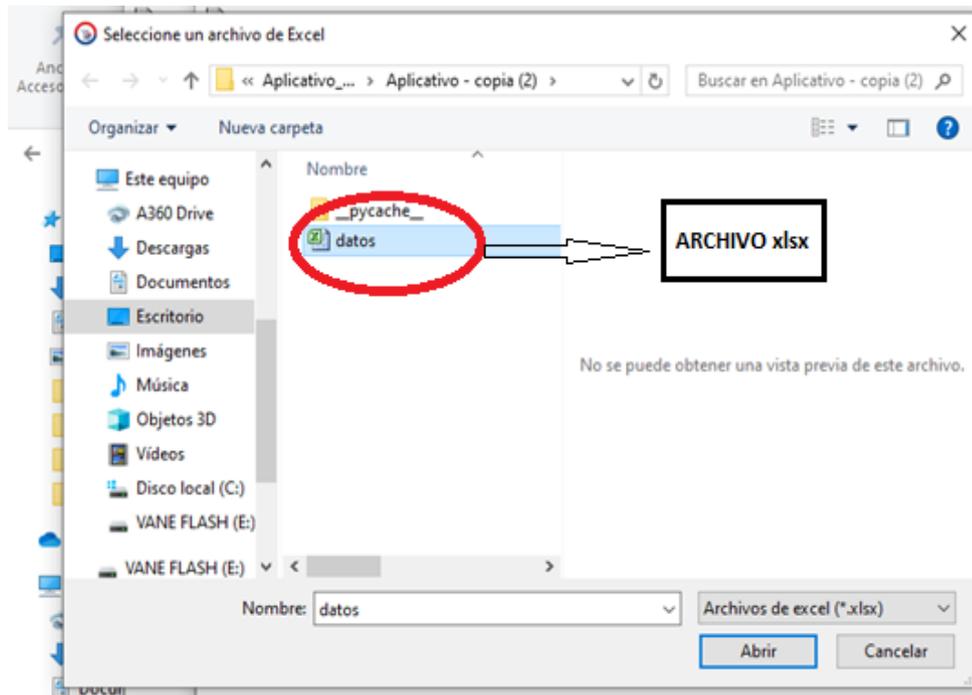
1.1. Selecciona en la pantalla de inicio la opción que desea



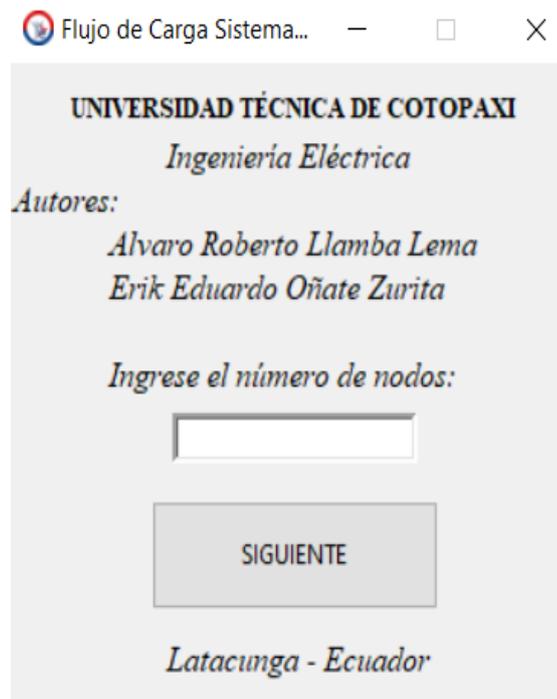
2. Selección de archivo xlsx.



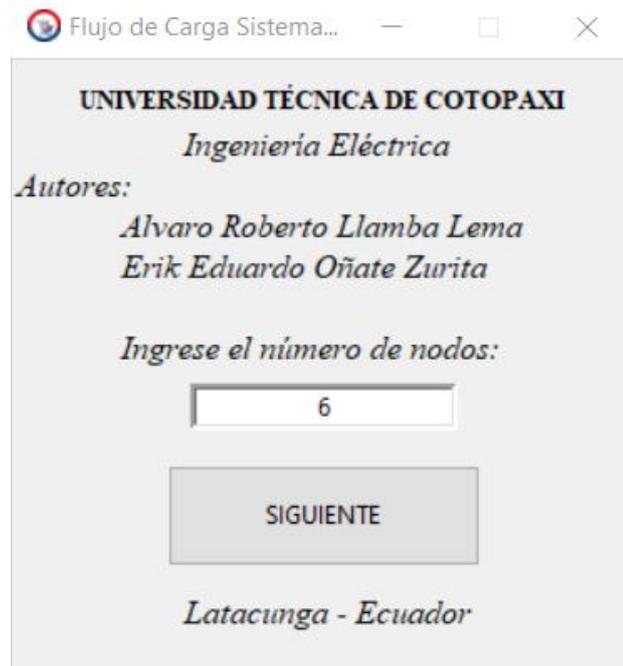
Dar clic derecho en Aplicativo, edit with IDLE, edit with IDEL 3.6.5 (64 bits), se abre nuestra programación y después de ello se despliega una ventana donde dice seleccione un archivo de Excel de cualquier sitio, el archivo debe contener la siguiente estructura de manera obligatoria NODO1, NODO2, RKM, XKM, BKM/2, P, Q, ALPA, puesto que el algoritmo lee archivos con este tipo de estructura y el archivo debe estar en p.u., dar doble click sobre el archivo.



3. Pantalla de inicio inicialización de la interfaz



En la venta principal tenemos los nombres de los autores, nombre de la institución, y nos indica que ingrese el número de barras que contiene el sistema de distribución una vez ingresado el número de barras (el numero debe ser real entero, no un carácter o decimal), lo cual proseguimos a dar click en el botón siguiente siguen el paso número 2.



Flujo de Carga Sistema...

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
Ingeniería Eléctrica

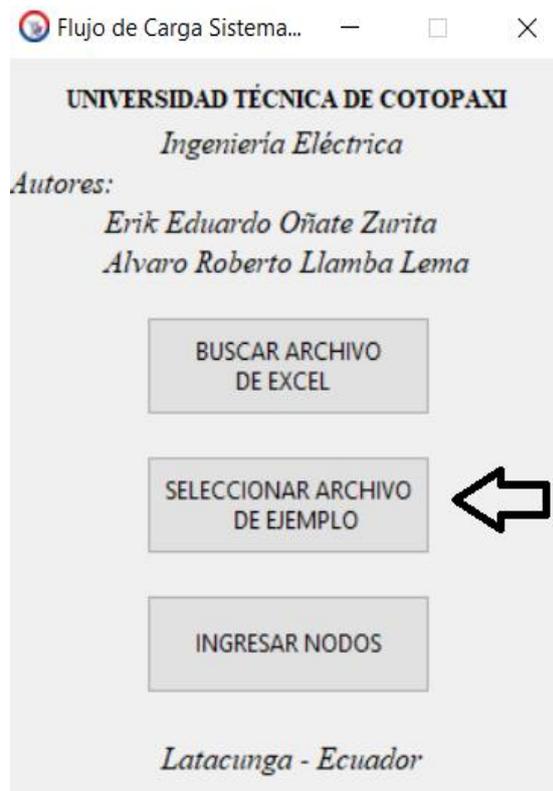
Autores:
Alvaro Roberto Llamba Lema
Erik Eduardo Oñate Zurita

Ingrese el número de nodos:

SIGUIENTE

Latacunga - Ecuador

4. Segunda opción



Flujo de Carga Sistema...

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
Ingeniería Eléctrica

Autores:
Erik Eduardo Oñate Zurita
Alvaro Roberto Llamba Lema

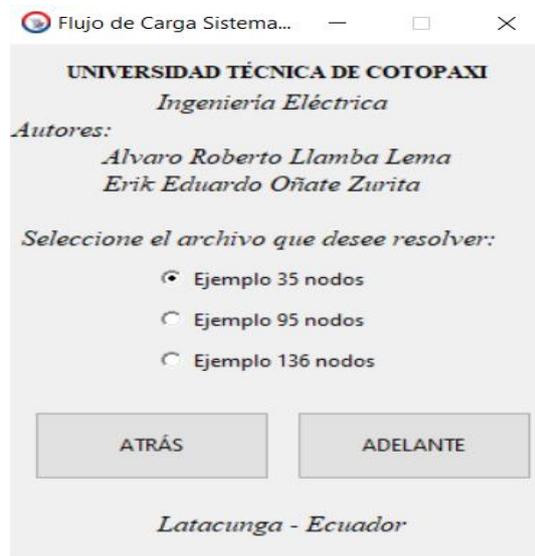
BUSCAR ARCHIVO DE EXCEL

SELECCIONAR ARCHIVO DE EJEMPLO

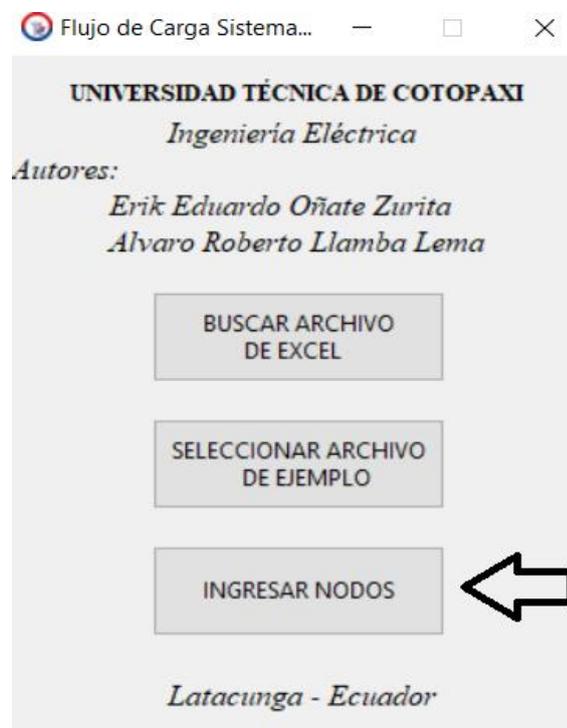
INGRESAR NODOS

Latacunga - Ecuador

Esta opción nos permitirá elegir ejemplos precargados en el algoritmo, de 35 nodos, 95 nodos y 136 nodos, ejemplos propuestos por la IEEE seleccionar un ejemplo y click en siguiente y si desea otra opción click atrás.



5. Tercera opción



Esta opción permite ingresar los datos de manera manual sin la necesidad de necesitar un archivo Excel, el usuario debe elegir el número de nodos que desea analizar e ingresar los datos de manera manual

6. Botón atrás



Nos permite regresar en el algoritmo para elegir otras opciones, o recesar en la operación que estamos realizando

7. Botón eliminar datos

ELIMINAR DATOS

Permite eliminar el campo de datos para tipiar los mismos de manera manual.

8. Boton de ayuda



Contiene cierta información importante para el análisis, estructura del archivo Excel y ayuda en la interpretación de resultados

9. Visualización de la interfaz gráfica del algoritmo

Flujo de Carga Sistemas de Distribución Radial Barrido

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
Ingeniería Eléctrica

INGRESE LOS DATOS EN LA SIGUIENTE TABLA

NOD1	NOD2	RKM	XKM	BKM/2	P	Q	ALPA
1	2	0.1743	0.4025	0	0.0	0.0	1.0
2	3	0.0009	0.0022	0	0.0004	0.0001	1.0
3	4	0.1172	0.2706	0	0.0004	0.0001	1.0
4	5	0.0522	0.1205	0	0.0008	0.0003	2.0
5	6	0.0817	0.1887	0	0.0031	0.0012	0.0
6	7	0.0857	0.1978	0	0.0014	0.0005	1.0
7	8	0.0600	0.1387	0	0.0023	0.0009	1.0

SELECCIONE EL ARMÓNICO QUE INFLUYE EN EL SISTEMA:

INGRESE CUANTAS BARRAS CONTIENEN CARGAS:

SELECCIONE EL NÚMERO DE BARRA:

EL VOLTAJE FUNDAMENTAL EN ESA BARRA ES:

VOLTAJE ARMÓNICO DE LA CARGA CON RESPECTO A LA BARRA ELEGIDA Y DETERMINADA POR EL BARRIDO DE VOLTAJES Y CORRIENES:

COMPLETE LA TABLA:

N° Barra	V. Armón	P. Activa	P. React
1			

ELIMINAR DATOS

CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS

RESULTADOS DE CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS

	C.Arm.1	C.Arm.3	C.Arm.5	C.Arm.7	C.Arm.11	C.Arm.13	C.Arm.17	C.Arm.19	C.Arm.23	C.Arm.25	V.Arm.1	V.Arm.3	V.Arm.5
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													

RESOLVER

GRAFICAR CORRIENTES

Se puede observar la interfaz que se tiene del algoritmo una interfaz en la cual tiene varias ventanas que a continuación se describirán los pasos a seguir la secuencialidad para obtener los resultados

9.1. Ingreso de datos desde el archivo xlsx.

INGRESE LOS DATOS EN LA SIGUIENTE TABLA

	NOD1	NOD2	RKM	XKM	BKM/2	P	Q	ALPA
1	1	2	0.005	0.0014	0.001	0.126	0.06	0
2	2	3	0.002	0.0016	0.001	0.0	0.0	0

Se deben tener datos en pu. Y absolutamente todas las casillas deben estar llenas se modificará según los valores que contiene el archivo de Excel o puede ser modificado manualmente luego de cargar los datos.

	NOD.	NOD.	RKM	XKM	BKM.	P	Q	ALPA
1	1	2	0.0014	0.0001	0.0001	0	0	0
2	2	3	0.0017	0.0001	0.0000	0	0	0
3	2	4	0.0019	0.0001	0.0001	0.85	0.33	2

9.2. Calculo de barrido de corriente y voltajes método programado Barrido Iterativo

Una vez ingresados los datos dar clic en el botón corrientes y voltajes armónicos

**CORRIENTES Y VOLTAJES
ARMÓNICOS**

9.3. Tabla para de visualización de corrientes y voltajes en cada armónico que se desea analizar

C.Arm.1	C.Arm.3	C.Arm.5	C.Arm.7	C.Arm.11	C.Arm.13	C.Arm.17	C.Arm.19	C.Arm.23	C.Arm.25	V.Arm.1	V.Arm.3	V.Arm.5	V.Arm.7	V.Arm.11

En esta ventana se mostrará el resultado obtenido con los datos ingresados, de corrientes y voltajes para cada armónico y en cada barra respectivamente.

	C.Arm.1	V.Arm.1
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

El campo de las tablas que contienen la variable C. Arm.1 y V. Arm.1 contendrán los resultados obtenidos en el Barrido Iterativo mencionado anteriormente en las comparaciones y análisis de resultados y descritos en el Anexo 1.

	C.Arm.3	C.Arm.5	C.Arm.7	C.Arm.11	C.Arm.13	C.Arm.17	C.Arm.19	C.Arm.23	C.Arm.25	10	V.Arm.3	V.Arm.5	V.Arm.7	V.Arm.11
1	0.9116594629	0.9113561266	0.9110534665	0.9107514845	0.9101495485	0.9098496085	0.9092517553	0.9089538687	0.9083601159	0.9080642908	0.9999930644	0.9999866440	0.9999812540	0.9999774098
2	0.9116956193	0.9114643830	0.9112335375	0.9110030832	0.9105433489	0.9103140697	0.9098566884	0.9096285870	0.9091735640	0.9089466430	1.0	1.0	1.0	1.0
3	1e-05	3.0000000000	5e-05	7.0000000000	0.00011	0.0001300000	0.00017	0.00019	0.00023	0.00025	1.0	1.0	1.0	1.0
4	0.9117751970	0.9117028518	0.9116305446	0.9115582757	0.9114138522	0.9113416977	0.9111975032	0.9111254633	0.9109814981	0.9109095728	1.0	1.0	1.0	1.0

	C.Arm.3	V.Arm.3
1	0.9116594629	0.9999930644
2	0.9116956193	1.0
3	1e-05	1.0
4	0.9117751970	1.0

10. Linealización de la carga y elección de las barras que contienen la carga

SELECCIONE EL ARMÓNICO QUE INFLUYE EN EL SISTEMA: 5

INGRESE CUANTAS BARRAS CONTIENEN CARGAS: 2

SELECCIONE EL NÚMERO DE BARRA: 1

EL VOLTAJE FUNDAMENTAL EN ESA BARRA ES: 0.9999930644009032

VOLTAJE ARMÓNICO DE LA CARGA CON RESPECTO A LA BARRA ELEGIDA Y DETERMINADA POR EL BARRIDO DE VOLTAJES Y CORRIENES: 0.9999812540731581

10.1. Seleccionar el armónico que afecta a la carga y por ende su afección al sistema

SELECCIONE EL ARMÓNICO QUE INFLUYE EN EL SISTEMA: 5

Los armónicos analizados son los siguientes: **3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25**

10.2. Ya obtenidos los resultados de corrientes y voltajes en cada barra del sistema procedemos a elegir el número de barras que contienen cargas

INGRESE CUANTAS BARRAS CONTIENEN CARGAS: 2

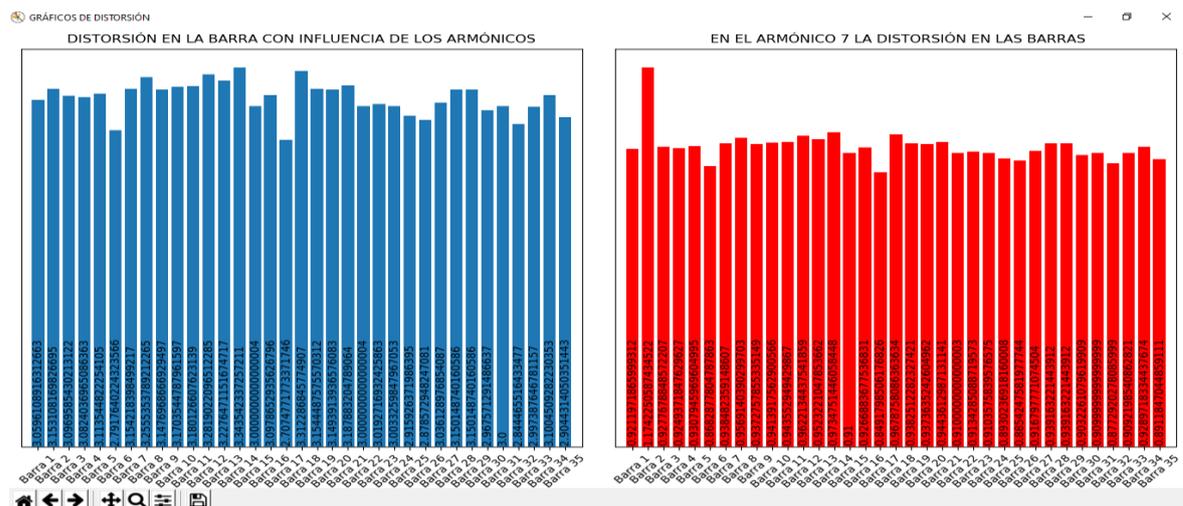
En la parte inferior se desplazará una tabla según el número de barras

Se desplegará las gráficas de todas las corrientes en dependencia de los armónicos analizados

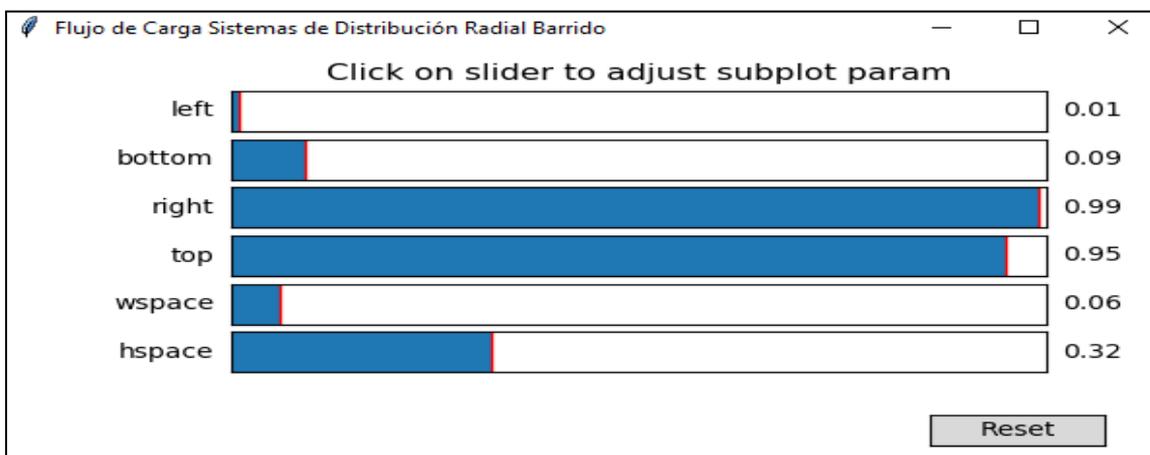
La ventana de plot se distingue por el nombre de gráficos de corrientes armónicas.

12. Gráficos de los resultados de porcentaje de distorsión armónica.

En la ventana de cálculo de porcentajes de distorsión armónica existe una opción que dice graficar dar click y automáticamente aparecerá las gráficas una de la barra con influencia de armónicos y otra del caso del armónico de estudio, las cuales se pueden regular en dependencia del tamaño de la gráfica que se desea observar.



El regulador de las gráficas aparecerá en la parte inferior de la ventana donde se encuentra el diagrama dar click y le aparecerá la opción que dice ajustar parámetros de gráfico.





**UNIVERSIDAD
TÉCNICA
DE COTOPAXI**

Número de Taps:

Tap Central:

Número de pasos:

Voltaje lado primario:

Voltaje lado secundario:

Constante porcentual de la placa real:

Valor de la potencia base en MW:

Frecuencia:

Voltaje del tap central= 69000.0
Relacion de transformacion del tap central= 2.886751
La reactancia en el tap: 0 es de: 0.008262

La tension en el tap: -10.0 tiene un valor de: 62100.0
La tension en el tap: -8.0 tiene un valor de: 63480.0
La tension en el tap: -6.0 tiene un valor de: 64860.0
La tension en el tap: -4.0 tiene un valor de: 66240.0
La tension en el tap: -2.0 tiene un valor de: 67620.0

La relacion de transforacio en el tap: -10.0 tiene un valor de: 2.598076
La relacion de transforacio en el tap: -8.0 tiene un valor de: 2.655811
La relacion de transforacio en el tap: -6.0 tiene un valor de: 2.713542

La reactancia en el tap: -10.0 tiene un valor de: 0.021466
La reactancia en el tap: -8.0 tiene un valor de: 0.021943
La reactancia en el tap: -6.0 tiene un valor de: 0.02242
La reactancia en el tap: -4.0 tiene un valor de: 0.022897
La reactancia en el tap: -2.0 tiene un valor de: 0.023375

El aplicativo diseñado para Linealizar un transformador nos permite encontrar la reactancia del transformador con taps e incluirlos al sistema analizar, este debe reemplazar al apartado **XKM** si necesario sería el caso y en la posición que está incluido el transformador, ya que para el análisis de los casos anteriores se considera un modelo lineal, que la resistencia y la reactancia son equiparables.

- a. Ingresar en el aplicativo del transformador
- b. Click en F5 y ejecutar el algoritmo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

Número de Taps: 5 (1)

Tap Central: 0 (2)

Número de pasos: 2.5 (3)

Voltaje lado primario: 69000 (4)

Voltaje lado secundario: 13800 (5)

Constante porcentual de la placa real: 1.875 (6)

Valor de la potencia base en MW: 150 (7)

Frecuencia: 60 (8)

Voltaje del tap central= 69000.0 (9)
 Relación de transformación del tap central= 2.886751
 La reactancia en el tap: 0 es de: 0.008262

La tensión en el tap: -10.0 tiene un valor de: 62100.0
 La tensión en el tap: -8.0 tiene un valor de: 63480.0 (10)
 La tensión en el tap: -6.0 tiene un valor de: 64860.0
 La tensión en el tap: -4.0 tiene un valor de: 66240.0
 La tensión en el tap: -2.0 tiene un valor de: 67620.0

La relación de transformación en el tap: -10.0 tiene un valor de: 2.598076 (11)
 La relación de transformación en el tap: -8.0 tiene un valor de: 2.655811
 La relación de transformación en el tap: -6.0 tiene un valor de: 2.713542

La reactancia en el tap: -10.0 tiene un valor de: 0.021466 (12)
 La reactancia en el tap: -8.0 tiene un valor de: 0.021943
 La reactancia en el tap: -6.0 tiene un valor de: 0.02242
 La reactancia en el tap: -4.0 tiene un valor de: 0.022897
 La reactancia en el tap: -2.0 tiene un valor de: 0.023375

Calcular Salir

1. Número de taps del transformador determinado por la construcción del mismo.
2. Tap central desde cual se comienza a calcular el voltaje el voltaje del tap
3. Número de pasos en el cual aumenta las espiras
4. Voltaje del lado primario en V
5. Voltaje del lado secundario en V
6. Contante porcentual de transformador dato real de la placa
7. Potencia del transformador en Mw
8. Frecuencia que trabaja el transformador (onda fundamental de 60Hz-50Hz)
9. Datos del tap central
10. Voltaje de tap calculado hacia arriba y hacia abajo del central
11. Relación de transformación
12. Reactancias del transformador