



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia.

Autores:

Ing. Ante Timbila Cristian Fernando

Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio

Tutor:

Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

LATACUNGA – ECUADOR

2022

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA”** presentado por: Ante Timbila Cristian Fernando y Ruiz Osorio Cristian Mauricio, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, mayo, 10, 2022



.....
M.Sc. Carlos Iván Quinatoa Caiza
C.C. 0503287864

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: "ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA" ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, mayo, 10, 2022

.....
M.Sc. Marco Anibal León Segovia
C.C. 0502305402
Presidente del tribunal

.....
M.Sc. Franklin Hernán Vasquez Teneda
C.C. 1710434497
Lector 2

.....
M.Sc. Pacheco Mena Carlos Francisco
C.C. 0503072902
Lector 3

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a nuestras familias que nos han enseñado que cada esfuerzo tiene su recompensa y nos han inculcado valores que nos dignifiquen mediante el ejemplo y sus consejos desinteresados, que han apoyado a nuestra ferviente voluntad de avanzar profesionalmente en nuestras carreras.

Ing. Ante Timbila Cristian Fernando

Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio

AGRADECIMIENTO

El trabajo de un docente no siempre es bien reconocido. Las arduas horas de labor que hay detrás de cada cátedra, la paciencia, los valores, los conocimientos y la inigualable perseverancia. En esta oportunidad queremos dejar en alto su ardua labor al brindarnos sus conocimientos y guía para lograr cumplir con una meta más en nuestro campo profesional.

Ing. Ante Timbila Cristian Fernando

Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio

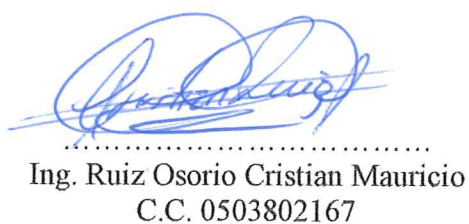
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quienes suscribimos, declaramos que asumimos la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, mayo, 10, 2022



.....
Ing. Ante Timbila Cristian Fernando
C.C. 0503375206

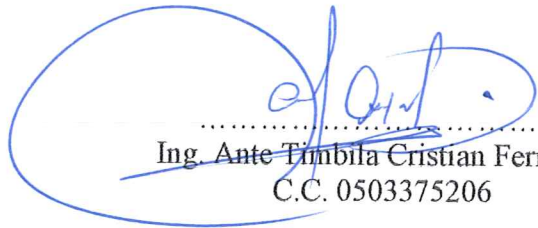


.....
Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio
C.C. 0503802167


RENUNCIA DE DERECHOS

Quienes suscribimos, cedemos los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, mayo, 10, 2022



.....
Ing. Ante Timbila Cristian Fernando
C.C. 0503375206



.....
Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio
C.C. 0503802167

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADAS PARA DETERMINAR LOS THDV Y THDI EN LOS NODOS DEL SISTEMA.”** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, mayo, 10, 2022

.....
M.Sc. Marco Anibal León Segovia
C.C. 0502305402

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: “Análisis de flujo Armónico en Redes de Distribución Desbalanceadas para Determinar los THD_v y THD_i en los Nodos del Sistema.”

Autores: Ing. Ante Timbila Cristian Fernando
 Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio

Tutor: Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

RESUMEN

Los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica se originan por diferentes causas, como por ejemplo la masiva utilización de cargas no lineales, cargas inductivas considerables, cargas desequilibradas, conexión y desconexión de transformadores, bancos de capacitores, entre otros. Para analizar estos flujos, la red de estudio se modela a partir de un conjunto de nodos conectados entre sí mediante líneas o transformadores, y se cuenta con una fuente de alimentación que representa la subestación. Para este análisis también es necesario conocer las cargas que están conectadas en los nodos del sistema, estas cargas generalmente consumen o inyectan potencia compleja. Gracias a este estudio se obtiene las potencias reales y reactivas presentes en cada elemento del sistema estudiado, magnitud y ángulo de fase de cada nodo, así como las perdidas tanto de cada elemento como las totales. El desarrollo de este proyecto, permitirá hacer un estudio de distorsión armónica y desbalances en un sistema de distribución. Para ello, se analizarán diferentes escenarios de carga sobre un sistema de prueba, finalmente se comprobará el algoritmo propuesto con otro software del mercado.

PALABRAS CLAVE: Armónicos, flujo de carga armónico, barrido iterativo, penetración armónica, cargas no-lineales.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Title: “HARMONIC FLOW ANALYSIS IN UNBALANCED DISTRIBUTION NETWORKS, TO DETERMINE THE THD_v and THD_i IN THE NODES OF THE SYSTEM”

Authors: Ing. Ante Timbila Cristian Fernando

Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio

Tutor: Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

ABSTRACT

The problems that affect the quality of electrical energy are originated from different causes, such as the massive use of non-linear loads, considerable inductive loads, unbalanced loads, transformers' connection and disconnection, capacitor banks, among others. To analyze these flows, the study network is modeled from a set of nodes connected to each other by lines or transformers, and there is a power supply representing the substation. For this analysis, it is also necessary to know the loads that are connected to the system nodes, these loads generally consume or inject complex power. Thanks to this study, the real and reactive powers present in each element of the studied system, magnitude and phase angle of each node, as well as the losses of both each element and the total are obtained. The development of this project will allow a study of harmonic distortion and imbalances in a distribution system. Thus, different load scenarios will be analyzed on a test system; finally, the proposed algorithm will be verified with other software on the market.

KEY WORDS: Harmonics, harmonic load flow, iterative sweep, harmonic penetration, non-linear loads.

Chiluisa Chiluisa Marcia Janeth con cédula de identidad número: 0502214307
Licenciada en: EN CIENCIAS DE LA EDUCACION ESPECIALIZACION INGLES
con número de registro de la SENESCYT: 1020-05-575335; **CERTIFICO** haber
revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de
investigación con el Título: **“Análisis de flujo Armónico en Redes de Distribución
Desbalanceadas para Determinar los THDv y THDi en los Nodos del Sistema”**. De
los: Ing. Ante Timbila Cristian Fernando, e Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio,
aspirantes a magíster en **ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Latacunga, mayo, 10, 2022



.....
M.Sc. Marcia Janeth Chiluisa Chiluisa
C.C. 0502214307

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AVAL DEL TUTOR	I
AVAL DEL TRIBUNAL.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	V
RENUNCIA DE DERECHOS.....	VI
AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema. –.....	2
Formulación del problema	3
Objetivo General.	3
Objetivos Específicos.....	3
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos.	3
Justificación.	5
Hipótesis.	5

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA	6
1.1. FUNDAMENTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE. –	6
1.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	10
1.2.1. Armónicos.	10
1.2.2. Fourier.	17
1.2.3. Convertidores estáticos de potencia.	19
1.2.4. Rectificadores trifásicos controlados.	19
1.2.5. Banco de Capacitores en análisis de armónicos.	20
1.2.6. Convertidores.	20
1.3. CONCLUSIONES CAPÍTULO I:	21
CAPÍTULO II. PROPUESTA	23
2.1.- TÍTULO DEL PROYECTO.....	23
2.2.-OBJETIVO DEL PROYECTO.....	23
2.3.-DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.	23
2.4.- METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	23
2.4.1. Ingreso de los datos iniciales del sistema.....	25
2.4.2. Alimentador de prueba de 13 barras de la IEE:	25
2.4.3 Alimentador de prueba de 37 barras de la IEE	26
2.4.5. Flujos de potencia a frecuencia fundamental	26
2.4.6. Barrido de frecuencias	28
2.4.7. Elementos pasivos:	29
2.4.8. Líneas aéreas y cables:.....	29
2.4.9. Generadores:	29

2.4.10. Transformadores:	30
2.4.11. Bancos de capacitores:	30
2.4.12. Cargas lineales:	30
2.4.13. Cargas no lineales:	31
2.4.14. Cálculo de las corrientes armónicas de inyección	31
2.4.15. Penetración armónica simple	32
2.4.16. Distorsión armónica total.....	33
2.4.17. Distorsión total de la demanda.....	33
2.4.18 Diseño del programa.....	34
2.4.19. Desarrollo del algoritmo propuesto para el análisis de carga armónica en alimentador de 13 y 37 nodos	36
2.4.20. Topología del diagrama de trece nodos	36
2.4.21. Configuración de conductores de trece nodos	37
2.4.22. Modelamiento de las cargas para el alimentador de trece nodos.....	39
2.4.23. Capacitores para el alimentador de trece nodos.....	40
2.4.24. Cálculo para alimentador de treinta y siete nodos.	40
2.4.25. Topología del diagrama de treinta y siete nodos	41
2.4.26. Configuración de conductores de trece nodos	42
2.4.27. Modelamiento de las cargas para el alimentador de treinta y siete nodos.....	45
2.5. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	47
2.6. CONCLUSIONES CAPÍTULO II.	47
CAPÍTULO III APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA	48
3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS:	48

3.2. RESULTADOS DEL ALGORITMO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICO EN EL ALIMENTADOR DE 13 NODOS	48
3.3. ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICO EN EL ALIMENTADOR DE 37 NODOS.....	52
3.4. DISEÑO DE FILTRO DE ARMONICOS EN REDES DE PRUEBA.....	56
3.4.1. Red de prueba 13 nodos.....	58
3.4.2. Red de prueba 37 nodos.....	61
3.5. CORRIENTE DEL NEUTRO PARA EL FLUJO DE POTENCIA (13 y 37 NODOS).....	64
3.6. VALIDACIÓN TÉCNICA -ECONÓMICA DE LOS RESULTADOS:	66
3.7. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III.....	66
CONCLUSIONES GENERALES.....	66
RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	70
<i>ANEXO 1: INFORME DE VERIFICADORES DEL TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.</i>	70
<i>ANEXO 2: CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL VERIFICADOR</i>	73
<i>ANEXO 3: INFORME DEL TUTOR</i>	74
<i>ANEXO 4: AVAL DEL TUTOR</i>	80
<i>ANEXO 5: ALIMENTADOR DE PRUEBA DE 13 NODOS IEEE</i>	81
<i>ANEXO 6: ALIMENTADOR DE PRUEBA DE 37 NODOS IEEE</i>	86
<i>ANEXO 7: Diagrama del sistema de 13 nodos</i>	90
<i>ANEXO 8: Diagrama del sistema de 37 nodos</i>	91
<i>ANEXO 9: Código del programa PHYTON SIN FILTRO</i>	92

ANEXO 10: CÓDIGO DEL PROGRAMA PHYTON CON FILTRO 119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Rectificador de media onda	11
Figura 2 Equivalencia de una señal.....	11
Figura 3 Armónicos de corriente.....	15
Figura 4 Cargas no lineales	15
Figura 5 Función periódica fuente	18
Figura 6 Circuito básico de un rectificador monofásico	20
Figura 7. Banco de capacitores para armónicos.....	20
Figura 8. Características del sistema de convertidores que afectan a la contribución de armónicos	21
Figura 9 Alimentador de prueba 13 barras IEEE	25
Figura 10 Alimentador de prueba 13 barras IEEE	26
Figura 11 Diseño del programa.....	35
Figura 12 Alimentador de prueba de 13 nodos con carga no lineal.....	36
Figura 13 modelo de segmento de línea trifásico.....	39
Figura 14 Diagrama Test Freeder IEEE 37 nodos	40
Figura 15 Porcentaje de distorsión armónica THDv(%) 13 nodos	49
Figura 16 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 13 nodos	50
Figura 17 Porcentaje de distorsión armónica THDv (%) 37 nodos	53
Figura 18 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 37 nodos	54
Figura 19 Porcentaje de distorsión armónica THDv(%) 13 nodos	59
Figura 20 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 13 nodos	60
Figura 21 Porcentaje de distorsión armónica THDv (%) 37 nodos	62
Figura 22 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 37 nodos	64

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I TOPOLOGÍA DE RED DE 13 BARRAS.....	37
TABLA II TOPOLOGÍA DE RED DE 13 BARRAS	37
TABLA III DATOS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS (REACTANCIA)	38
TABLA IV DATOS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS (SUSCEPTANCIA)	38
TABLA V DATOS DE CARGAS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS	39
TABLA VI DATOS DE CAPACITORES DEL SISTEMA DE 13 BARRAS	40
TABLA VII DATOS DEL SISTEMA DE 37 BARRAS (RESISTENCIA)	42
TABLA VIII DATOS DEL SISTEMA DE 37 BARRAS (SUSCEPTANCIA).....	44
TABLA IX DATOS DE CARGAS DEL SISTEMA DE 37 NODOS	46
TABLA X RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT).....	48
TABLA XI RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT).....	50
TABLA XII DATOS DEL ERRO THDV %.....	51
TABLA XIII DATOS DEL ERROR THDI %	51
TABLA XIV RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT).....	52
TABLA XV RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT).....	53
TABLA XVI RESULTADOS DEL PORCENTAJE PROMEDIO DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT)	55
TABLA XVII RESULTADOS DEL PORCENTAJE PROMEDIO DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT)	56
TABLA XVIII RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV APLICANDO FILTRO DE ARMÒNICOS	58
TABLA XIX RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI APLICANDO FILTRO PARA ARMÒNICOS	60

TABLA XX RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV APLICANDO FILTRO PARA ARMÒNICOS	61
TABLA XXI RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI APLICANDO FILTRO PARA ARMÒNICOS	62
TABLA XXII RESULTADOS DE CORRIENTES POR EL NEUTRO 13 NODOS	64
TABLA XXIII RESULTADOS DE CORRIENTES POR EL NEUTRO 37 NODOS	65

INTRODUCCIÓN

La calidad de servicio eléctrico constituye, hoy en día, una problemática de vital importancia, tanto para los usuarios como para las empresas que lo suministran. Las redes de distribución de energía eléctrica alimentan cargas de diversas características, que hacen que se presenten perturbaciones tanto en las señales de corriente como en las señales de tensión de la red. Estas perturbaciones afectan directamente la calidad de la energía eléctrica suministrada a los usuarios y reducen considerablemente la capacidad de transporte de energía. Los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica se originan por diferentes causas, como por ejemplo la masiva utilización de cargas no lineales, cargas inductivas considerables, cargas desequilibradas, conexión y desconexión de transformadores, bancos de capacitores, entre otros.

Para analizar estos flujos, la red de estudio se modela a partir de un conjunto de nodos conectados entre sí mediante líneas o transformadores, y se cuenta con una fuente de alimentación que representa la subestación. Para este análisis también es necesario conocer las cargas que están conectadas en los nodos del sistema, estas cargas generalmente consumen o inyectan potencia compleja. Gracias a este estudio se obtiene las potencias reales y reactivas presentes en cada elemento del sistema estudiado, magnitud y ángulo de fase de cada nodo, así como las pérdidas tanto de cada elemento como las totales.

El desarrollo de este proyecto, permitirá hacer un estudio de distorsión armónica y desbalances en un sistema de distribución. Para ello, se analizarán diferentes escenarios de carga sobre un sistema de prueba, finalmente se comprobará el algoritmo propuesto con otro software del mercado.

Antecedentes.

El tema se enmarca dentro de la línea de investigación de la maestría de la Universidad Técnica de Cotopaxi: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, y esta corresponde a la sub línea de Explotación y diseño de

sistemas de potencia, cuyo eje de temática se atribuye a las redes de transmisión y distribución también con una pertenecía a la calidad de energía.

Es más común encontrarse con estudios en redes de distribución balanceados por su menor complejidad, pero en la distribución real de potencia las fases no están equilibradas ya que la demanda de potencia no es igual en cada una de ellas, surgiendo así la necesidad del estudio de flujos de carga desequilibrada.

Dentro de un sistema eléctrico de potencia, existen diferentes fenómenos electromagnéticos, que producen señales sinusoidal o analógica produciendo corrientes o tensiones armónicas, por lo tanto, en esta investigación se realiza el análisis de flujos de armónicos para mantener un sistema confiable entre la transmisión, distribución y finalmente a los usuarios finales.

Planteamiento del problema. –

En una red eléctrica existente diferentes factores electromagnéticos, por el uso de equipos electrónicos de cargas no lineales las cuales afectan al sistema eléctrico debido a las perturbaciones de onda que producen estos elementos, son frecuencias enteras o múltiples que dan origen a los armónicos provocando la distorsión de onda de voltaje o corriente denominado (THDv y THDi). Frente a los problemas causados por las cargas no lineales este proyecto se propone realizar un análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceados para determinar la distorsión armónica total del voltaje y corriente en los nodos del sistema eléctrico, determinando pérdidas de energía. La influencia de los armónicos en el sistema eléctrico es perjudicial para los elementos que componen una subestación eléctrica en la misma que se encuentra elementos que pueden dañarse por las perturbaciones que se producen, la finalidad para este problema es desarrollar una simulación en Python que indique la influencia de armónicos que más frecuencia producen las cargas no lineales para determinar los THDv y THDi en redes desbalanceadas.

La distorsión armónica da una malformación de la corriente eléctrica que llega a nuestros hogares y empresas donde se requiere del consumo de energía para un

beneficio común. Esta “malformación” está originada por los equipos que consumen energía eléctrica de una forma “no lineal”, es decir, de una forma no continua en el tiempo. El uso al consumir de este tipo de energía, provoca que la forma de onda senoidal de la corriente eléctrica se distorsione. Esta distorsión se puede descomponer en diferentes componentes, conocidas como armónicos. La mayor o menor presencia de armónicos se mide con una magnitud conocida como Tasa de Distorsión Armónica (THD) tanto para voltaje y corriente.

Formulación del problema.

¿Cómo influye las cargas no lineales en los índices armónicos de voltaje y corriente en el sistema eléctrico de distribución desbalanceadas?

Objetivo General.

Realizar un análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceados mediante un algoritmo de programación para determinar los THDv y THDi en los nodos del sistema eléctrico.

Objetivos Específicos.

1. Realizar el estado del arte para el flujo de armónico en redes de distribución desbalanceadas.
2. Modelar los diferentes componentes del sistema de distribución, para realizar un algoritmo y simular un flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas, utilizando el software Python.
3. Analizar los resultados obtenidos del algoritmo propuesto con el software PowerFactory.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos.

Para complementar los objetivos específicos se plantean las siguientes tareas:

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1. Realizar el estado del arte para el flujo de armónico en redes de distribución desbalanceadas.	Revisión de manuales, libros, escritos físicos y digitales tanto públicos como privados. Investigación en la web.	Obtener el nivel de influencia armónica en la red. Conocer las normas estipuladas por el directorio de la Agencia de regulación y control de electricidad (ARCONEL).	Consultar libros y folletos de fabricantes de todos los elementos utilizados para detectar armónicos en un sistema eléctrico de potencia.
2. Modelar los diferentes componentes del sistema de distribución, para realizar un algoritmo y simular un flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas, utilizando el software Python.	Revisión de los datos de un sistema de distribución para cargas desbalanceadas, basadas en la IEEE. Diseño de un algoritmo con la base de datos obtenidos de la medición y datos históricos encontrados en la IEEE.	Obtención de datos numéricos de armónicos en sus respectivos nodos. Programa que indique el comportamiento de la red eléctrica desbalanceada determinado los THDv y THDi.	Consulta a entidades de regulación y distribuidoras del sistema eléctrico público. Desarrollo de un programa en Python que ayude a conocer el comportamiento del flujo de potencia armónica en redes desbalanceadas detallando los THDi y THDV.
3. Analizar los resultados obtenidos del algoritmo propuesto, con el software PowerFactory.	Revisión de la información obtenida anteriormente. Comparar los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado en Python, con PowerFactory	Disponer de un programa que muestre el comportamiento de la red eléctrica desbalanceada determinando los THDv y THDi.	Diseño de alternativas adecuadas para mejorar el flujo de armónicos en el programa computacional de Python.

Elaborado por: Ante, Ruiz, 2022

Justificación.

Con la finalidad de tener un nivel de voltaje adecuado dentro de un sistema eléctrico, se realiza el estudio para conocer nivel de flujo de armónicos y la incidencia que tiene con respecto a la calidad de energía, para lo cual es importante contar con un equipo de alta precisión que mida las cargas que se encuentran conectadas en el alimentador y así obtener datos exactos para el diseño en el software Python. La importancia del estudio radica que este tipo de factores se obtienen en zona que tienen cargas industriales, en la cual se encuentran conectadas una gran cantidad de cargas no lineales que afectan al sistema eléctrico, por lo que es necesario desarrollar el estudio para mitigar la influencia armónica en este sector.

Hipótesis.

Si se incrementa nuevas cargas no lineales a un alimentador se verá afectado los niveles de calidad del THDv y THDi (voltaje y corriente), así como también el análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceados permitirá dar soluciones para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA

1.1. FUNDAMENTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE. –

Los sistemas eléctricos de potencia son necesarios para el desarrollo de la humanidad en todos los aspectos en que el ser humano ha demostrado su interés de implementar nuevas formas de mejorar su estilo de vida, es así que dentro de esta investigación se va a tomar como estudio una parte del sistema eléctrico, como es el análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas mantenimiento. Siendo de importancia para el correcto funcionamiento del sistema y que implica en la calidad del servicio manteniendo los índices establecidos en las regulaciones y la continuidad en el suministro, para ello se ha recopilado trabajos anteriores que poseen variables de acuerdo a nuestro tema en donde se detallan a continuación los estudios internacionales y nacionales realizados.

En este artículo los autores explican de forma general cuales son los efectos de armónicos en los sistemas y para ello Xia y Heydt explican que “Los armónicos son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental”. A partir de este concepto analizaron los efectos que son provocados por los armónicos en los sistemas eléctricos y para concluir determinaron “el conocimiento de los aspectos generales de sus causas y consecuencias nos ayudan a prevenir y tomar las medidas tendientes a minimizar sus efectos en aras de una operación efectiva y segura de los sistemas eléctricos actuales” [1].

En este trabajo el grupo de investigación realizó su indagación con el fin de implementar, “un módulo que facilita generar armónicos mediante el uso de una bomba de agua y un regulador de velocidad que modifica el control de fase (cruce por cero)”. Con este análisis procuran tener futuras solución sobre la distorsión armónica que se pueden generar y para ello lo analizaron mediante el software Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW), dos sensores ZMPT101B, una data acquisition (DAQ) 6008, y de esta manera Ray y Sengupta dieron a conocer y comprender los “datos de los armónicos presentes en una carga eléctrica mediante minería de datos en el programa LabVIEW y contrastación con los registros obtenidos en un analizador de red” [2].

Feng Guihong hace referencia el algoritmo y las características fundamentales de un programa para análisis y simulación de armónicos en instalaciones industriales y desarrolladas en MATLAB, y a partir de esta investigación da a conocer la matriz de una tención armónica en los nodos ya que “con estas se pueden determinar las corrientes armónicas por las ramas que conectan los diferentes nodos”. De esta manera generan nuevas respuestas sobre la simulación de armónicos. El investigador concluyo que la creación del programa demostró ser confiable en la información de salida [3].

A partir de la investigación del modelamiento de cargas no lineales para análisis armónico Layth mencionan que: Las cargas no lineales son las fuentes de emisión de armónicos en un sistema de energía eléctrica. El modelamiento de estas cargas requiere considerar la distorsión en la forma de onda para lograr una mejor descripción de la interacción con la red. En este artículo los autores describen la metodología de modelamiento sobre las cargas no-lineales y a su vez proponen técnicas para solucionar la distorsión armónica, donde llegaron a la conclusión que “para el caso sinusoidal y, en general, para condiciones de baja distorsión, se aproxima a las simulaciones en el dominio del tiempo realizadas en Matlab/Simulink y con un tiempo de cálculo mucho menor” [4].

En este proyecto sus autores creyeron pertinente la realización de un estudio de flujo armónico de cargas en sistemas eléctricos utilizando el paquete informático matpower,

el mismo que ayuda para dar a conocer nuevas ilustraciones sobre los límites de cargas no lineales los cuales emiten armónicos generando perturbaciones eléctricas a la red. Grotzbach, Dirnberger y Redmann utilizaron un método llamado penetración armónica ya que “el incremento de las cargas no lineales que emiten armónicos a la red ha hecho más importante analizar y calcular el rendimiento de una red eléctrica con dichas cargas”. Y a través de este trabajo poder crear nuevas líneas de investigación que ayuden al crecimiento de la sociedad en todos sus aspectos [5].

Este estudio realizado por Cenasin y Oliveira quienes, a través de esta investigación, ayudan a conocer sobre “el incremento de las cargas no lineales que emiten armónicos a la red ha hecho más importante analizar y calcular el rendimiento de una red eléctrica con dichas cargas”. Los autores coinciden que es necesario indagar estas problemáticas que también causan efectos en la sociedad debido a que la luz eléctrica es un insumo relevante para el bien estar de la comunidad y sus fuentes de trabajo, porque si existe alguna interrupción o mala calidad de los suministros de energía pueden causar alguna pérdida de producción o materia prima, siendo importante “que se entiendan los problemas causados por estas interrupciones, así como los costos asociados a estas” [6].

Las características de los sistemas eléctricos de potencia son determinadas también por el método híbrido tiempo-frecuencia para el análisis de sistemas eléctricos con elementos no lineales, el autor determina que es de vital importancia implementar un programa por medio de una Interface Gráfica con el Usuario (GUI), y por medio de este esquema Oliveira explica que “simular redes eléctricas con elementos no lineales (principalmente convertidores de potencia), tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia”. Y de esta manera lograr analizar estudios de análisis de propagación de armónicos en las redes eléctricas [7].

A través del análisis en este proyecto se muestra la caracterización de estudios de análisis de propagación de armónicos en las redes eléctricas, Huang informa que para el desarrolló se generó “estudios de análisis de propagación de armónicos en las redes eléctricas”. Y con esta investigación determinaron que el aporte fundamenta es permitir

la entrada de funciones de necesidad de probabilidad asociadas con fuentes corrientes de los usuarios y permitir determinar las funciones de densidad de probabilidad de lo TDHv sobre los nodos de un círculo y TDHi sobre las ramas del mismo, de tal manera que concluyo que el trabajo “ha encontrado dominantes de los armónicos de corriente y voltaje hasta el orden 11 en circuitos industriales de media tensión. Esto confirma lo encontrado por quien encontró comportamientos dominantes solo hasta el orden 13, en armónicos en circuitos de distribución” [8].

Los problemas armónicos han atraído más atención en los sistemas de ingeniería. En este estudio se presenta un algoritmo de programación rápido, preciso y simple para la estimación de la distorsión armónica total y el análisis de los componentes armónicos en las señales. El algoritmo propuesto se basa en el análisis de la serie de Fourier. El cálculo de diferentes ejemplos de prueba se lleva a cabo utilizando lenguaje C ++ y mostró resultados satisfactorios [9].

El desarrollo que de esta investigación sus autores dan a conocer por medio de un análisis de la compensación de potencia reactiva en sistemas contaminados con armónicos, resultados que se obtuvo promedio de una evolución de red industrial con presencia de “contaminación armónica”, Ganhare y Patil mencionan que: Los armónicos típicos generados por estas cargas y ello permitió determinar los niveles de distorsión armónica de tensión y corriente para analizar su influencia en la selección del banco de condensadores durante la compensación de la potencia reactiva atendiendo al comportamiento del sistema ante diferentes estados de carga. Con esta investigación el grupo permitió “determinar los niveles de distorsión armónica de tensión y corriente para analizar su influencia en la selección del banco de condensadores durante la compensación de la potencia reactiva atendiendo al comportamiento del sistema ante diferentes estados de carga” [10].

1.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

En este tema se redacta las diferentes investigaciones recopiladas de las fuentes bibliográficas de un sistema eléctrico de potencia, específicamente de las distribuidoras de energía eléctrica de donde surgen los fenómenos que causan la distorsión y molestias al sistema, también la etapa de su transmisión que es aquella que transporta la energía eléctrica a las diferentes subestaciones de nuestro país.

1.2.1. Armónicos.

En primera instancia se requiere definir lo siguiente: dada la existencia de una gran distancia entre los centros de generación de energía y los centros de consumo residencial, la planta generadora es equipada con una subestación elevadora diseñada para proporcionar alimentación a las líneas principales de transmisión. Estas líneas a su vez transmiten la energía a las subestaciones receptoras primarias instaladas en las zonas cercanas a las ciudades donde el voltaje es reducido a parámetros adecuados para la transmisión secundaria y es aquí donde nacen las líneas de subtransmisión [11].

1.2.1.1. Fuentes de armónicos. -

Hoy en día, los elementos semiconductores están presentes habitualmente en todos los hogares e industrias. Para mejorar la producción es indispensable contar con elementos como: controladores de velocidad, rectificadores, computadores y otros que se encuentran cada día en mayor cantidad en los centros de consumo. Las ventajas de esta tecnología son innegables y van desde la facilidad para regular la luminosidad de una bombilla hasta el control flexible de máquinas rotatorias.

La limitación de los dispositivos antes mencionados es la contaminación que crean en el sistema energético, ya que los elementos semiconductores deforman la naturaleza de la onda sinusoidal original y la convierten en una señal distorsionada, no sinusoidal. Sus características no siempre son fáciles de entender. Por ende, los conceptos que se suelen aplicar al estudio del comportamiento de un sistema lineal, carecen de validez, del mismo modo que los elementos de protección y medición ven reducida su eficacia ante señales distorsionadas [14].

1.2.1.2. Como se producen los armónicos. Una señal periódica no sinusoidal se puede convertir aplicando una serie de Fourier a la suma de funciones sinusoidales. El sistema no lineal se puede analizar realizando los cálculos individuales de cada componente y generando así la respuesta total de la señal distorsionada [15].

Las componentes armónicas se presentan cada vez que una señal senoidal es distorsionada. Tomemos el ejemplo un rectificador de media onda:

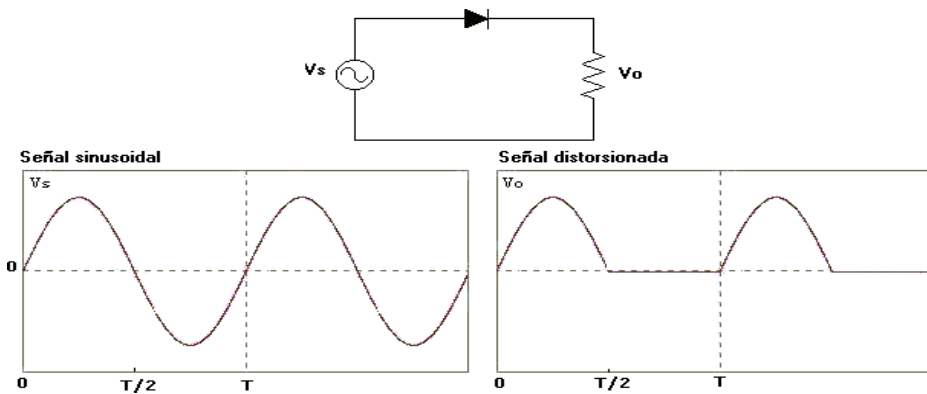


Figura 1 Rectificador de media onda

Energizar una carga con una onda distorsionada equivale a alimentarla con varias fuentes sinusoidales de diferentes frecuencias y tamaños, pero correlacionadas armónicamente, es decir, frecuencias cuyos valores son múltiplos entre sí de la frecuencia fundamental.

En el caso de una señal cuadrada después de obtener la serie de Fourier se puede sumar en gráficamente los componentes obtenidos:

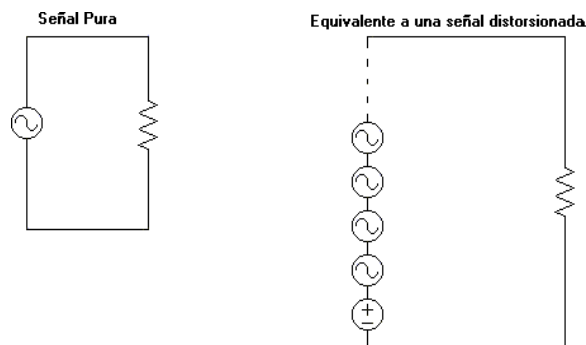


Figura 2 Equivalencia de una señal

1.2.1.3. Efectos y soluciones para el problema de los armónicos.

En el sistema de distribución es posible localizar cargas no lineales en redes monofásicas y trifásicas. En redes monofásicas, la distorsión armónica se encuentra comúnmente en edificios de oficinas donde hay redes informáticas y elementos calefactores regulables. En los sistemas trifásicos, las plantas industriales cuentan con una gran cantidad de elementos eléctricos/electrónicos que generan distorsión armónica.

1.2.1.3.1. Efectos de armónicos en los instrumentos de medición.

Si las medidas se realizan en un sistema con cargas no lineales, es necesario utilizar instrumentos capaces de registrar las magnitudes reales del sistema, teniendo en cuenta la presencia de armónicos. Un medidor multiseñal (multitester) que mida la respuesta media no sirve para obtener valores reales de la señal distorsionada y los análisis realizados no tendrán validez. Un dispositivo diseñado solo para medir señales sinusoidales dará lecturas inexactas (generalmente más bajas), lo que "engañará" al analista.

Una señal distorsionada puede poseer un valor rms bajo, pero los picos grandes y repentinos, que ni siquiera son registrados por un dispositivo convencional, se puede analizar cuando se utilizan multímetros modernos que proporcionan valores rms reales, de formas de onda y armónicos de la señal que se mide [16].

1.2.1.3.2. Efecto sobre dispositivos de protección.

Los disyuntores térmicos magnéticos utilizan bimetales para operar su mecanismo en respuesta al calentamiento generado por las corrientes circulantes. El aumento de temperatura depende del valor de la corriente real que circula por el dispositivo, por lo que la protección podrá funcionar correctamente ante sobrecalentamientos provocados por componentes armónicos.

Es posible que los dispositivos de protección electrónicos que responden con sensibilidad a los valores pico de corriente no respondan adecuadamente. Por lo general, el valor máximo de corriente es más alto de lo normal y la operación se activará prematuramente, incluso si la corriente real es baja. Si el valor máximo es más bajo de lo normal, es posible que el interruptor no funcione incluso si la corriente rms es alta.

1.2.1.3.3. Efecto de armónicos en redes de telecomunicaciones.

Los sistemas de comunicación son afectados por la distorsión armónica y son quizás el primer indicio de la existencia de armónicos. Los cables telefónicos suelen estar cerca de conductores que transportan energía eléctrica. El cable neutro es el más cercano al conductor de telecomunicaciones, si existe una corriente armónica que pasa por el cable neutro, se producen interferencias que afectarán a la línea telefónica y podrán ser reconocidas de forma audible por el usuario de la red.

1.2.1.3.4. Armónicos en el conductor neutro.

Se conoce que en un sistema en estrella trifásico equilibrado, las corrientes son anuladas y la corriente es cero a través del conductor neutro, en un sistema desequilibrado, el vector resultante es el resultado de tres corrientes de magnitud distinta de cero que se mueven a través del conductor neutro. Cuando se alimenta cargas no lineales, la corriente de neutro obtiene la suma de todos los componentes armónicos de orden cero, que es un múltiplo impar de tres (3a, 9a, 15a, etc.), lo que también ocurre en un sistema balanceado. Esto sucede porque los armónicos que son múltiplos de tres están en fase y sus magnitudes se suman directamente, mientras que para la frecuencia fundamental se suprime la corriente de neutro porque son tres vectores de igual magnitud y desfasados 120°.

1.2.1.3.5. Reducción de carga en transformadores.

Cuando un transformador alimenta una carga no lineal, pierde eficiencia debido a que la máquina sufre pérdidas adicionales causadas por componentes armónicos. Están relacionados con las corrientes de parásitas y la histéresis en el núcleo, así como con las pérdidas por efecto Skin en la bobina debido a los armónicos de alta frecuencia. El

resultado de esto es el sobrecalentamiento y la pérdida de aislamiento en las bobinas. Para solucionar el problema causado por los armónicos, el transformador puede operar a una potencia inferior a su valor nominal. Los expertos estiman que un transformador que funcione al 60% de su potencia nominal reducirá la influencia de cualquier corriente en los armónicos. Si no es posible reducir la carga del transformador, se puede instalar otro transformador en paralelo o simplemente cambiar a un transformador de mayor capacidad [16].

1.2.1.3.6. Transformadores con factor K.

Estos transformadores tienen algunas cualidades especiales, debido a que su construcción es distinta de los transformadores convencionales. Están diseñados para trabajar con señales contaminadas y a plena potencia. Algunas de las características estructurales son: Devanado primario con conductor expandido, para soportar corrientes armónicas, conductor neutro de doble sección en secundario para soportar armónicos de orden cero. Diseño de núcleo con menor densidad de flujo mediante el uso de grados ferrosos más altos, además, se utilizan conductores con mejor aislamiento en el secundario y se colocan en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento [16].

1.2.1.4. Armónicos en redes de distribución.

En un sistema de distribución es posible identificar varios tipos de consumo, cargas lineales y no lineales. Cuando el transformador suministra energía a cargas no lineales, la perturbación de la tensión de alimentación también daña las cargas no contaminantes [17].

La corriente armónica requerida por la carga da como resultado una tensión armónica en la impedancia del transformador o del conductor de alimentación. Si se conecta una corriente armónica de 5 (A) a una resistencia total de 0,1 Ω , habrá una diferencia de potencial armónico de 0,5 (v). Estos voltajes armónicos afectan la calidad del servicio en el sistema de distribución.

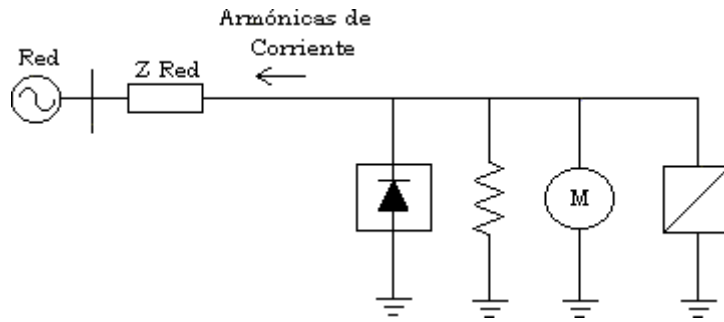


Figura 3 Armónicas de corriente.

Alguna influencia en el voltaje de suministro puede ser que la señal original use una forma de onda sinusoidal con "punta plana", lo que causa problemas en los circuitos que alimentan la red computacional, en algunos casos se produce un mal funcionamiento, debido a que el dispositivo está conectado a la fuente de alimentación del sistema rectificador del tipo diodo-capacitor depende del valor máximo de la señal de entrada.

A continuación, se muestran algunas irregularidades en el voltaje provocadas por cargas no lineales.

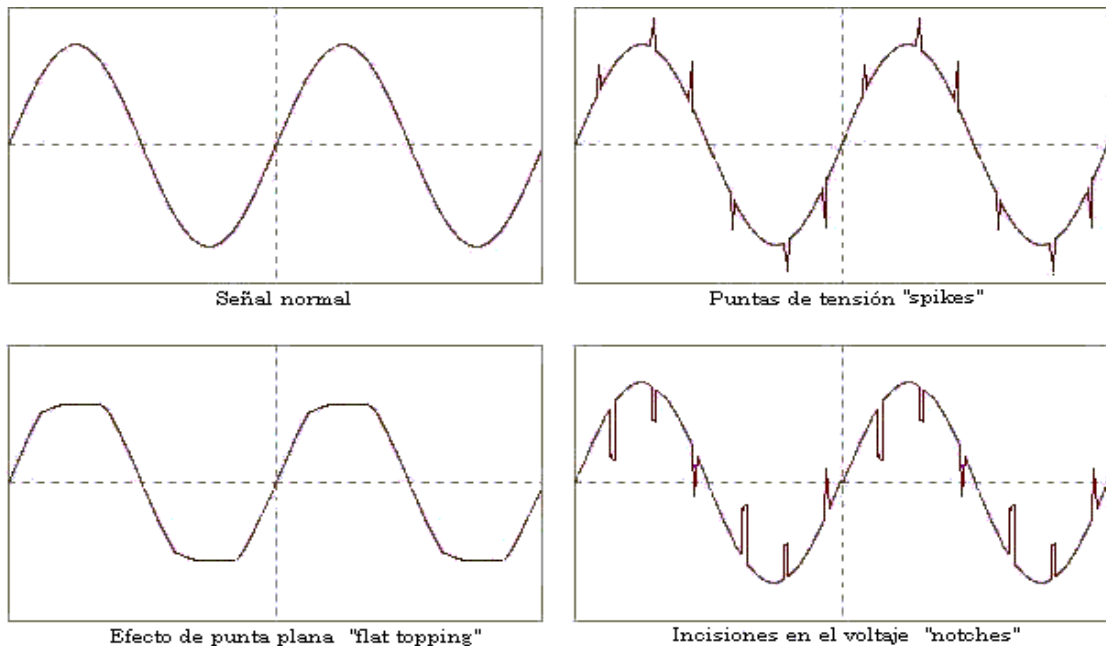


Figura 4 Cargas no lineales

1.2.1.5. Tasas de distorsión armónica.

La distorsión armónica en la red eléctrica se muestra en la representación matemática de la señal eléctrica en el dominio del tiempo [17].

Se considera como armónica a la frecuencia múltiplo de una frecuencia fundamental que opera en la red de distribución eléctrica (para este caso 60 Hz).

$$v(t) = V \cdot \cos. \omega t \quad (1)$$

$$i(t) = I \cdot \cos. \omega t \quad (2)$$

En los sistemas eléctricos, estas señales pueden tener la presencia de armónicos de corriente y voltaje, por lo que el voltaje y la corriente se pueden expresar como:

$$v(t) = \sum_{n=1}^k V_n \cdot \cos (n\omega t + \theta_n) \quad (3)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^k I_n \cdot \cos (n\omega t + \theta_n) \quad (4)$$

Donde:

V_n : Se le define como la armónica de voltaje de orden n

I_n : Se le define como la armónica de corriente de orden n

θ_n : Ángulo de la armónica n

El valor de distorsión se define como un porcentaje (%) de magnitudes eléctricas, estos valores son muy utilizados para conocer el grado de contaminación de la red eléctrica.

1.2.1.6. Distorsión armónica total.

THD significa distorsión armónica total (tasa de distorsión armónica global). La relación de distorsión armónica se usa a menudo para determinar la magnitud del contenido armónico de una señal alternativa.

Para una señal $y(t)$, la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I^{(h)})^2}}{I_{especifica}} \quad (5)$$

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

$$THDv = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\% \quad (6)$$

Si el voltaje y la corriente en una red eléctrica están definidos por:

$$THDi = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\% \quad (7)$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THDi = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\% \quad (8)$$

Para armónicas individuales:

$$THD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\% \quad (9)$$

1.2.2. Fourier.

En la teoría de sistemas lineales, es fundamental representar la señal como una senoide o exponenciales complejas. Esto debido a que la exponencial compleja es una función automática de cualquier sistema lineal invariable en el tiempo, y la respuesta a una onda sinusoidal es otra onda sinusoidal de la misma frecuencia cuya fase y magnitud están determinadas por el sistema. Entonces, la representación frecuencial de la señal, a través de la transformada de Fourier, es fundamental para el análisis de señales y sistemas eléctricos.

1.2.2.1. Series de Fourier.

El estudio de las series de Fourier es aplicable a señales eléctricas siempre que sean funciones periódicas. Una función periódica se puede definir como:

$$f(t) = f(t + T) \quad (10)$$

Donde T se llama el periodo de la función, la figura muestra un ejemplo de función periódica.

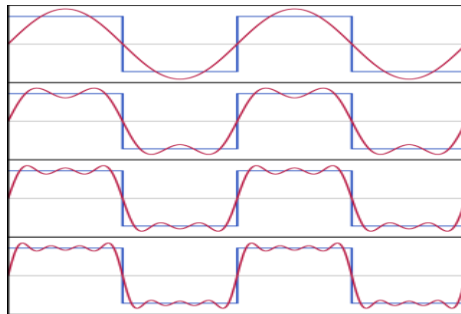


Figura 5 Función periódica fuente

La siguiente función periódica $f(t)$ corresponde a una señal eléctrica sinusoidal con sus correspondientes armónicos:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^a [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] + \varepsilon_k(t) \quad (11)$$

Donde $\varepsilon_k(t)$ determina un margen de error mediante la serie de Fourier de K términos.

La componente D.C de la señal a_0 más la sumatoria de las componentes trigonométricas de la señal y sus armónicos, desde $n=1$ el armónico fundamental, hasta infinito.

$$\omega_0 = 2\pi T \quad (12)$$

Dónde: ω_0 Frecuencia angular expresada en rad/seg.

El primer armónico a menudo se denomina componente fundamental porque tiene el mismo período de la función $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi/T$ y se denomina frecuencia angular

fundamental. Los coeficientes a_0 , a_n y b_n se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_T f(t) dt \quad (13)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (15)$$

La serie trigonométrica de Fourier es una superposición de señales sobre una señal sinusoidal pura, y estas señales tienen la característica única de tener una frecuencia, que es un múltiplo entero de la fundamental, que para la mayoría de los casos es posible calcular a partir de la transformada de Fourier, el coeficiente es 0.

1.2.3. Convertidores estáticos de potencia.

Se entenderá por convertidores estáticos de potencia los dispositivos basados en electrónica de estado sólido (diodos y tiristores) que pueden ser dispositivos rectificadores, convertidores de frecuencia, inversores, convertidores de ciclo y compensadores estáticos de potencia reactiva.

1.2.4. Rectificadores trifásicos controlados.

El principio de funcionamiento de un rectificador controlado es básicamente el mismo que el de un circuito rectificador de diodo convencional, por lo que la configuración del circuito es la misma, la principal diferencia es que el encendido de los SCR se puede retrasar a voluntad para el punto de encendido natural. Es decir, por el tiempo de inicio de la conducción de los diodos equivalentes. Obviamente, el campo de conducción del SCR, en el caso de los diodos, dependerá de que se mantengan las condiciones de polarización directa [17].

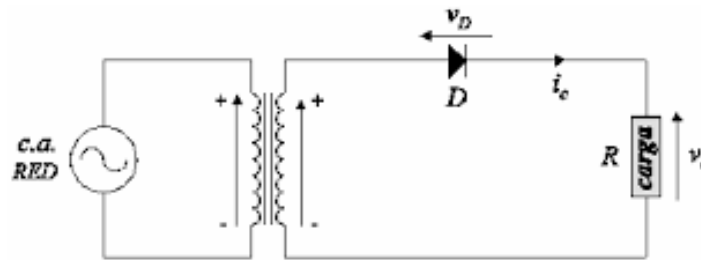


Figura 6 Circuito básico de un rectificador monofásico

1.2.5. Banco de Capacitores en análisis de armónicos.

Cuando las ondas de voltaje y corriente son sinusoidales y la carga es lineal, como un motor de inducción o una resistencia, el factor de potencia se denomina factor de cambio de fase (DPF). Sin embargo, los sistemas eléctricos modernos tienen una gran cantidad de cargas pulsantes o no lineales, como la electrónica, y en ellos, la potencia.



Figura 7. Banco de capacitores para armónicos

1.2.6. Convertidores.

El convertidor cambia la forma de la energía eléctrica de una a otra utilizando un semiconductor como elemento activo en la transición. Este tipo de carga produce armónicos en funcionamiento normal. La mayoría de los convertidores de potencia electrónicos utilizados en varios sistemas pueden aumentar el ruido armónico al suministrar corrientes armónicas directamente a la red eléctrica.

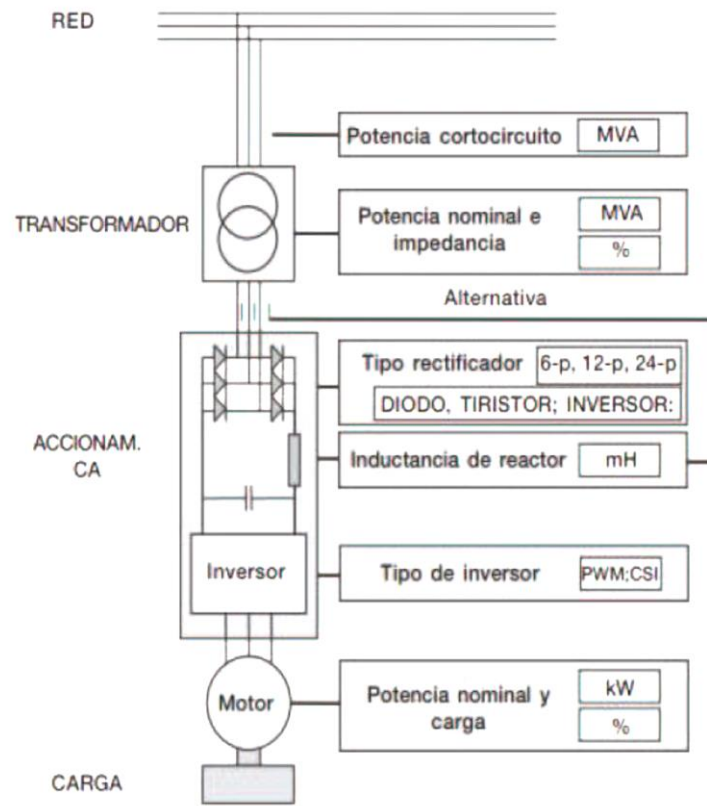


Figura 8. Características del sistema de convertidores que afectan a la contribución de armónicos

1.3. CONCLUSIONES CAPÍTULO I:

- Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos, libros y tesis universitarias, donde se organizó un marco teórico integrado con los fundamentos teóricos relacionados con el tema.
- Como parte de la investigación, se habría informado que el sistema eléctrico ecuatoriano contiene el ARCONEL 005/18 emitido por la Autoridad de Regulación y Control Eléctrico, el cual fija indicadores y limita la calidad de la energía que deben realizar las empresas, al no cumplir con los parámetros estipulados la empresa distribuidora puede ser penalizada por el ente regulador.
- Se aplicó investigación bibliográfica con la contribución de páginas web en donde es posible acceder a la mayoría de la información debidamente

sustentada para el tema propuesto, obteniendo una parte trascendental para la fundamentación teórica y metodológica, lo que cual es imprescindible para el desarrollo los siguientes capítulos.

CAPÍTULO II. PROPUESTA

2.1.- TÍTULO DEL PROYECTO.

Análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceados para determinar los THDv y THDi en los nodos del sistema.

2.2.-OBJETIVO DEL PROYECTO.

Modelar los diferentes componentes del sistema de distribución, para realizar un algoritmo y simular un flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas, utilizando el software Python.

2.3.-DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.

Este estudio permitirá definir un tema conceptual relacionado con la operación del sistema de potencia con contenido armónico, tanto sus causas como sus efectos en la operación cotidiana, determinando así su calidad de energía eléctrica en la red de distribución. El presente trabajo propone desarrollar un algoritmo de programación para calcular el flujo de potencia en una red de distribución desbalanceada para determinar la presencia de armónicos.

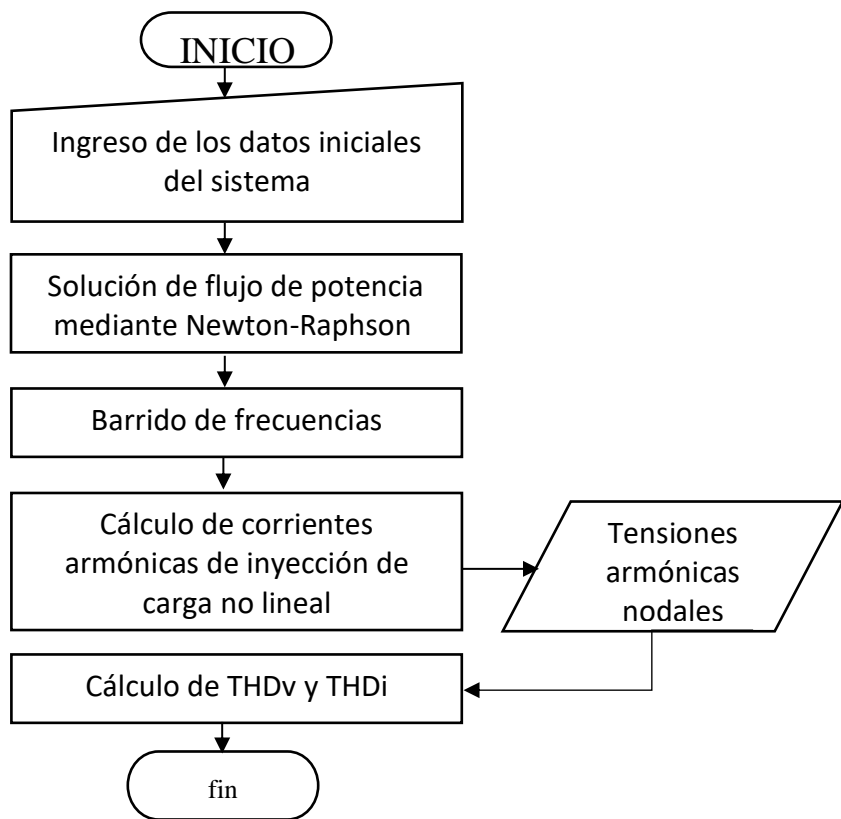
Para este tipo de proceso se propone simular un sistema eléctrico en el que se detallan los diversos componentes de un (SEP), donde se determina tanto el voltaje como la corriente, con cargas lineales, no lineales las cuales forman una señal analógica sinusoidal donde la potencia actúa como una onda rectificadora, a diferencia de las cargas inductivas, la corriente tiende a retrasar la tensión en 90° , produciendo cambios de impedancia o resistencia, proporcionando una carga no lineal provocando armónicos en el sistema.

2.4.- METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

La investigación realizada sobre el análisis de armónicos con diferentes métodos de flujos de potencia a frecuencia fundamental e inyección armónica determina las tensiones armónicas que existen en una red contaminada por una carga no lineal, de

forma resumida, el proceso de análisis de armónicos en una red se determina con los siguientes pasos:

- Ingreso de los datos iniciales del sistema
- Aplicación del método de flujos de potencia.
- Ejecutar el barrido de frecuencias.
- Ejecutar la penetración armónica.
- Evaluación de la solución.



Se presenta un análisis simple para estudiar el efecto del impacto de cargas no lineales sobre el sistema y su comportamiento. Para resolver corrientes, barridos de frecuencia y penetración de armónicos, se utilizó Python un software donde se desarrolló herramientas de cálculo y procesamiento, los resultados obtenidos se comparan con DIGSILENT para comprobar la validez del algoritmo propuesto. Además, se utilizó Excel para generar datos en forma de tablas y gráficos, donde se tomaron valores de

impedancia de línea, generador, voltaje nodal, potencia de carga y generación, y espectro armónico de la carga no lineal.

2.4.1. Ingreso de los datos iniciales del sistema

En este nivel de desarrollo es de vital importancia obtener los datos que contiene la red, estos valores pueden ser impedancia, resistencia, reactancia y admitancia en la derivación de líneas, cargas reales y reactivas, estando acopladas a cada nodo respectivamente en MW y MVar, la generación de potencia activa y reactiva, el módulo y amplitud de tensión de cada nodo y su tipo de nodo (Carga, Generación, Tensión controlada, compensación o Slack). Estos datos son indispensables para formar la matriz del sistema YBus, además, los datos de tensión de nodo se utilizan como valor inicial para resolver el flujo de potencia. Es importante recalcar que los datos deben estar agrupados y ordenados como tablas para que el programa pueda leerlos correctamente. Para el desarrollo del algoritmo se ha tomado los modelos de orden reducido de un circuito de distribución real, tomando como referencia los siguientes alimentadores.

2.4.2. Alimentador de prueba de 13 barras de la IEE:

En la figura 9 se presenta un modelo de circuito el cual es utilizado para pruebas de características generales del programa de análisis de distribución, que opera a 4,16 kV.

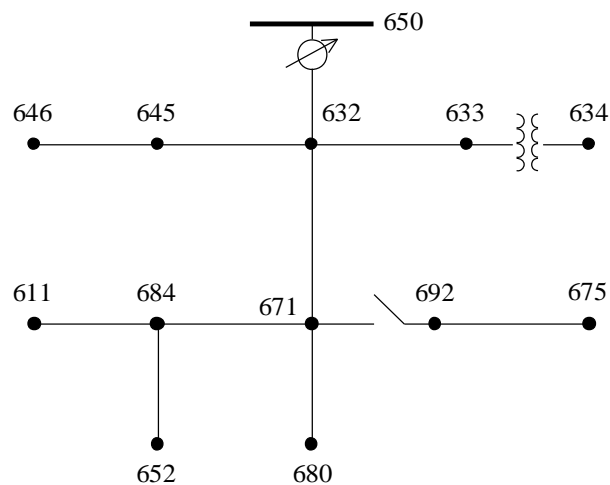


Figura 9 Alimentador de prueba 13 barras IEEE

Cuenta con reguladores de subvoltaje relativamente cortos y cargados, líneas aéreas y subterráneas, condensadores de derivación, transformadores en línea y cargas desequilibradas.

2.4.3 Alimentador de prueba de 37 barras de la IEE

Este alimentador de prueba tiene una tensión de funcionamiento de 4,8 kV. En la figura 10 se muestra que presenta una configuración triangular, líneas soterradas y regulación de tensión de la subestación mediante dos reguladores monofásicos abiertos, cargas puntualmente y altamente desequilibradas. Esta configuración de circuito es poco común. [19]

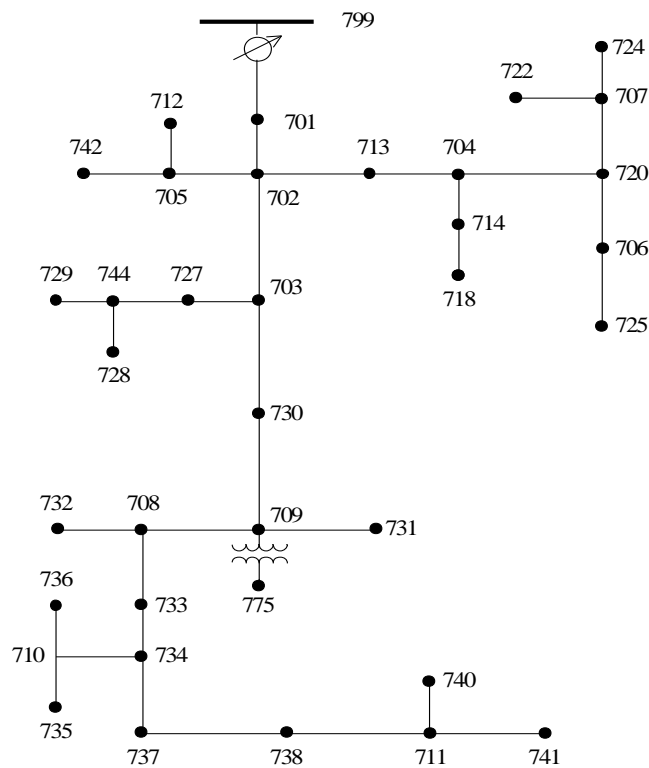


Figura 10 Alimentador de prueba 13 barras IEE

2.4.5. Flujos de potencia a frecuencia fundamental

Una vez determinados los parámetros de la red eléctrica se inicia la solución del presente estudio de flujos de potencia que consiste principalmente en resolver un

sistema de ecuaciones no lineales $n=1$ donde n es el número de nodos del sistema. Hay muchas soluciones para estas ecuaciones, pero el software se ha desarrollado utilizando el método de Newton-Raphson, que suele incluir los siguientes pasos que se describen a continuación, para realizar el procedimiento:

2.4.5.1. Establecer la YBus a frecuencia fundamental

Las diferencias de potencia activa y reactiva son calculadas para definir el vector:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.4.5.2. Composición de los elementos de la matriz Jacobiana: J1, J2, J3 y J4.

Una por una, son calculadas las submatrices J1 a J4. Una vez obtenidos, se conforma la matriz Jacobiana completa:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.4.5.3. Inversión de la matriz Jacobiana.

Se calcula la inversión numérica de la matriz Jacobiana.

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (18)$$

2.4.5.4. Cálculo de los incrementos de tensión.

El vector de diferencias de potencia se multiplica por la matriz Jacobiana invertida para generar los incrementos de voltaje (módulos y argumentos).

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.4.5.5. Actualización de valores.

Los valores de voltaje se actualizan añadiendo incrementos a los valores anteriores, de esta forma en la siguiente iteración se toman los valores de voltaje como los valores recién actualizados.

$$\left[\frac{\delta'}{V'} \right] = \left[\frac{\Delta\delta}{\Delta V} \right] + \left[\frac{\delta}{V} \right] \quad (20)$$

Las iteraciones se extienden hasta que las diferencias de P y Q son cercanas a cero. De esta manera los voltajes nodales son obtenidos de la red, además de información adicional como son los flujos de potencia en las líneas.

2.4.6. Barrido de frecuencias

Se debe realizó un análisis del barrido de frecuencia para detectar resonancia potencial. La resonancia en los sistemas de potencia ocurre cuando la amplitud de impedancia del sistema es considerable. La resonancia paralela ocurre cuando los elementos inductivos y capacitivos están conectados en paralelo y el valor de la impedancia es máxima. Para la condición de resonancia en serie, los elementos inductivos y capacitivos se conectan en serie y la magnitud de la impedancia se reduce al mínimo. Por lo tanto, encontrar el estado de resonancia en un nodo es equivalente a encontrar los puntos extremos de la cantidad de resistencia para su punto de operación $Z(\omega)$. Existen dos métodos básicos que determinan estos extremos y sus correspondientes frecuencias resonantes para sistemas de potencia: barrido de frecuencia y barrido de capacitancia.

El escaneo de frecuencia es el método más simple y más utilizado para realizar análisis de armónicos, determinar la frecuencia de resonancia de un sistema y diseñar filtros de sintonización. El barrido de frecuencia es el cálculo, utilizando herramientas aritméticas y gráficas, de la amplitud de una impedancia de punto de operación en un nodo para un conjunto de frecuencias. También es posible acceder a la fase de la impedancia del punto de operación y ver el corte cero (donde la impedancia es puramente una resistencia). La frecuencia resonante es la frecuencia que provoca el valor mínimo o máximo de la amplitud de la impedancia.

El método propuesto tiene en cuenta el barrido de frecuencias ya que de esta manera es posible identificar las frecuencias armónicas que pueden representar un peligro para el sistema.

De esta forma, el siguiente paso es formar una matriz YBus en función de la frecuencia para cada armónico que genera la carga contaminante. Cada matriz YBus(f) se invierte

para obtener $Z_{Bus}(f)$.

Para hacer el modelado de las cargas se deben considerar los siguientes puntos:

2.4.7. Elementos pasivos:

Todos los elementos pasivos son considerados con comportamiento lineal con la frecuencia, ejemplo de ellos son los resistores, inductores y capacitores. Las siguientes características son consideradas por estos elementos:

$$R = \text{Constante} \quad (21)$$

$$X_L(h) = jhX_L \quad (22)$$

$$X_C(h) = -j\frac{X_C}{h} \quad (23)$$

Donde X_L y X_C son la reactancia inductiva y capacitiva, respectivamente.

2.4.8. Líneas aéreas y cables:

Se representan por su circuito pi equivalente a diferentes frecuencias, donde se deben considerar los efectos de larga distancia, desbalance y desplazamiento. Un circuito pi nominal afectado por armónicos sólo se utilizará en el caso de líneas de transmisión muy cortas con armónicos bajos.

2.4.9. Generadores:

Se considera como elementos lineales con la misma impedancia armónica adquirida de forma similar a los elementos pasivos utilizando las siguientes impedancias:

$$Z_g = R\sqrt{h} + jX_d''h \quad (24)$$

Donde R se obtiene de las pérdidas del generador y X_d'' es la reactancia subtransitoria del generador. De requerirse, la saturación del generador y los efectos de conversión de frecuencia es posible representarlos a través de fuentes de inyección de corrientes y voltajes respectivamente.

2.4.10. Transformadores:

Se consideran como elementos lineales en el cual su impedancia armónica se obtiene de manera similar a los elementos pasivos aplicando:

$$Z_t = R\sqrt{h} + jX_L h \quad (25)$$

Donde R se determina por las pérdidas del transformador y X_L es la reactancia de corto circuito. Las conexiones del transformador se toman en consideración cuando los armónicos de secuencia cero se presentan en la red. El resultado de la saturación es posible representarlo a través de una fuente de inyección de corriente armónica.

2.4.11. Bancos de capacitores:

Se consideran como elementos pasivos de tal manera que:

$$X_C(h) = -j \frac{V_{LL}^2}{hQ_{3\phi}} \quad (26)$$

2.4.12. Cargas lineales:

Éstas cargas se determinan por tres modelos diferentes:

$R - X_L$ equivalente en paralelo:

$$R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} \quad (27)$$

$$X_L(h) = j \frac{hV_{LL}^2}{Q_{3\phi}} \quad (28)$$

$R - X_L$ en paralelo con $R(h)$:

$$R(h) = \frac{V_{LL}^2}{kP_{3\phi}} \quad (29)$$

$$X_L(h) = j \frac{V_{LL}^2}{kQ_{3\phi}} \quad (30)$$

$$k = 0.1h + 0.9 \quad (31)$$

$R - X_L$ en paralelo con X_S :

$$R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} \quad (32)$$

$$X_L(h) = j \frac{hR}{6.7 \left(\frac{Q_{3\phi}}{P_{3\phi}} - 0.74 \right)} \quad (33)$$

$$X_S(h) = j0.073hR \quad (34)$$

2.4.13. Cargas no lineales:

Se representa mediante inyección de corriente armónica o fuente de tensión armónica: La fuente de inyección de corriente armónica se utiliza para representar la entrada armónica de un compensador de VAR estático (SVC), hornos de arco y de inducción, rectificadores y dispositivos electrónicos.

La fuente de voltaje armónico se considera: hornos de arco y moduladores de ancho de pulso (PWM). Por ejemplo, un transformador PWM se puede representar mediante el equivalente de Thevenin dado por la reactancia de dispersión del transformador y la fuente de tensión armónica.

2.4.14. Cálculo de las corrientes armónicas de inyección

Es necesario calcular la magnitud y el ángulo de las corrientes de la carga no lineal analizada, ya que estas son las corrientes que se introducirán en el proceso de ruptura armónica simple.

La información sobre el espectro armónico de una carga no lineal suele dar la cantidad

de corriente (o voltaje) en un armónico dado como un porcentaje de la corriente a la frecuencia fundamental, además de proporcionar el valor angular de dicha corriente. Cabe señalar que estos valores son aproximaciones generales de los armónicos que naturalmente produce una determinada carga, por lo que el resultado obtenido a partir de esta información será también una aproximación a las condiciones que existen en el sistema real.

La frecuencia fundamental de una carga no lineal debe calcularse primero utilizando los valores de voltaje dados por el estudio de flujos de potencia. Una vez calculado, se determina la magnitud de la corriente correspondiente a cada armónico en base al espectro suministrado.

2.4.15. Penetración armónica simple

Para obtener la magnitud y el ángulo del voltaje armónico producido por la corriente armónica producida por la carga contaminante, es necesario introducir corriente en el sistema.

Para establecer la tensión armónica es necesario multiplicar la matriz $I^h Z_{BUS}^h$, definida por el vector de voltajes para el armónico h en cada nodo de la red. I^h se define como un vector de dimensión n , es aquí donde todos los valores son cero a excepción de el o los nodos que estén vinculados a una fuente contaminante, por lo tanto estos valores son un porcentaje de la corriente calculada a través de las tensiones generadas de los flujos de potencia a frecuencia fundamental, este porcentaje se obtiene del espectro armónico de la fuente contaminante.

$$V_n^h = Z_{Bus}^h I_n^h \quad (35)$$

Por lo tanto, el resultado será un conjunto de valores de voltaje armónico para cada nodo de la red. Usando estos valores, se puede calcular la distorsión de voltaje armónico total (THDv) para cada nodo, que generalmente indica el nivel de distorsión de voltaje actual.

2.4.16. Distorsión armónica total

El índice armónico más utilizado para indicar el contenido armónico de una onda distorsionada con un número simple es la distorsión armónica total (THD). Es una medida del valor rms de las componentes armónicas de una onda distorsionada, definida como el valor rms de la armónica expresada como porcentaje de la componente fundamental:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I^{(h)})^2}}{I^{(1)}} \quad (36)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V^{(h)})^2}}{V^{(1)}} \quad (37)$$

El valor común del 5% se usa a menudo para distinguir entre alta y baja distorsión. El estándar ANSI recomienda el truncamiento de la serie THD a 5 kHz, pero la mayoría de los dispositivos prácticos actualmente lo limitan a aproximadamente 1,6 kHz (debido al ancho de banda limitado de los transformadores de corriente y potencia).

Las principales ventajas del THD son:

- 1 Es usado frecuentemente para medición rápida de la distorsión.
- 2 Es fácil de calcular.

Algunas desventajas del THD son:

- 1 No genera información de las amplitudes
- 2 La información detallada del espectro se pierde

El THD se asocia con el valor rms de la onda de corriente como se muestra:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I^h)^2} = I^{(1)} \sqrt{1 + THD_i^2} \quad (38)$$

2.4.17. Distorsión total de la demanda

Considerando las desventajas mencionadas de THD, varios estándares (IEEE 519)

definen coeficientes de distorsión de la demanda agregada. El término es similar a THD excepto que la distorsión se expresa como un porcentaje de un valor máximo o especificado (como la potencia de carga) y como un porcentaje de la corriente primaria:

$$THDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I^{(h)})^2}}{I_{específica}} \quad (39)$$

Los valores de THD obtenidos con anterioridad se someten a comparación con valores máximos permitidos en el estándar.

2.4.18 Diseño del programa.

El diseño para el programa de cálculo se realiza utilizando las herramientas del software PYTHON, siguiendo el diagrama de flujo presentado en la figura 11 donde consta sus respectivas subrutinas.

1. Lectura de los datos característicos de entrada de los alimentadores de prueba de 13 y 37 barras de la IEEE.
2. Calcular la matriz de secuencia Z012 de esta manera se obtiene las matrices de resistencia, reactancia y susceptancia.
3. Crear matrices de barras, líneas y cargas por cada fase con el fin de analizar la dimensión que tiene cada matriz.
4. Calcular matriz de admitancia por cada fase para desarrollar el flujo de potencia.
5. Calcular balance de potencia en nodos para determinar en qué barra están conectados los generadores del sistema.
6. Calcular flujo de potencia mediante el método de Newton Raphson esto se realiza para cada fase del sistema.
7. Calcular la matriz de barrido de frecuencia para cada fase, se crea un lazo iterativo para calcular la admitancia de cada línea en función del orden de cada armónico.

8. Cálculo de voltajes y corrientes armónicas para cada carga no lineal en función al número de armónico que se analiza.
9. Impresión de resultados finales donde indica el valor de THDv y THDi en cada nodo del sistema

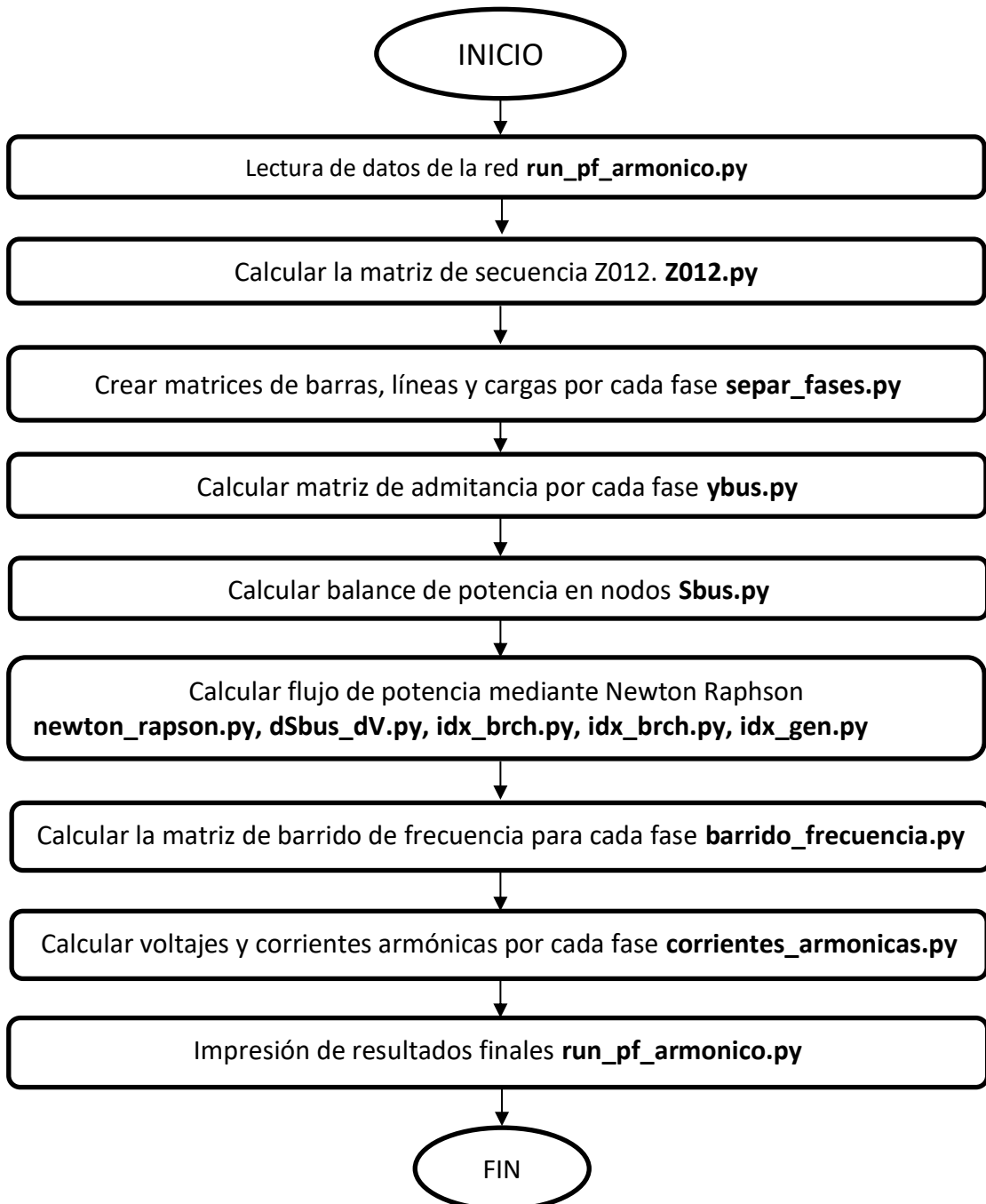


Figura 11 Diseño del programa

2.4.19. Desarrollo del algoritmo propuesto para el análisis de carga armónica en alimentador de 13 y 37 nodos

En la figura 12 se muestra el alimentador de prueba de 13 nodos, en el cual se conecta la carga no lineal a la barra 680, además de conectarse una fuente de generación en la barra 650.

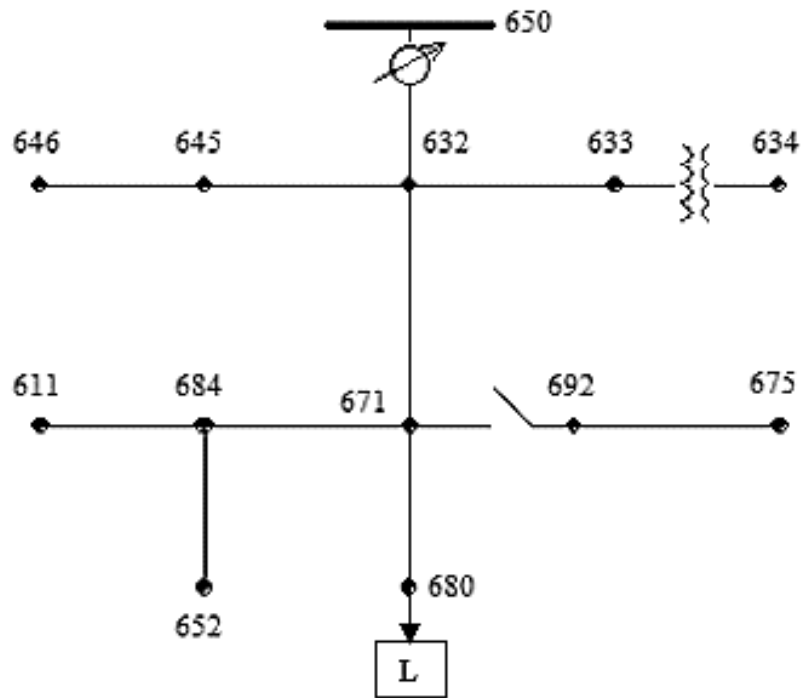


Figura 12 Alimentador de prueba de 13 nodos con carga no lineal

2.4.20. Topología del diagrama de trece nodos

En la tabla I se muestra la interconexión que se dispone entre nodos, detallando la longitud entre el nodo A y el Nodo B.

TABLA I
TOPOLOGÍA DE RED DE 13 BARRAS

Nodo A	Nodo B	Length (ft.)	Config.
632	645	500	3
632	633	500	2
645	646	300	3
684	652	800	7
632	671	2000	1
671	684	300	4
Nodo A	Nodo B	Length (ft.)	Config.
671	680	1000	1
684	611	300	5
671	675	500	6
633	634	5280	8

2.4.21. Configuración de conductores de trece nodos

En la tabla II se determina cual es la disposición de los conductores entre nodos, donde se ve reflejado la matriz de impedancia Z_{abc} , para cada una de la configuración de acuerdo a la disposición de los conductores en diferentes tramos, estos son trifásicas bifásicas y monofásicas.

TABLA II
TOPOLOGÍA DE RED DE 13 BARRAS

Node A	Node B	Length (ft.)	R11	R12	R13	R22	R23	R33
632	645	500	0,00	0,00	0,00	1,33	0,21	1,32
632	633	500	0,75	0,16	0,16	0,75	0,15	0,74
645	646	300	0,00	0,00	0,00	1,33	0,21	1,32
684	652	800	1,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
632	671	2000	0,35	0,16	0,16	0,34	0,15	0,34
671	684	300	1,32	0,00	0,21	0,00	0,00	1,33
671	680	1000	0,35	0,16	0,16	0,34	0,15	0,34
684	611	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33
671	675	500	0,80	0,32	0,28	0,79	0,32	0,80
633	634	5280	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En la tabla III, se representan las líneas de las barras que se extiende en el sistema en reactancia.

TABLA III
DATOS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS (REACTANCIA)

Node A	Node B	Length (ft.)	X11	X12	X13	X22	X23	X33
632	645	500	0,00	0,00	0,00	1,35	0,46	1,36
632	633	500	1,18	0,42	0,50	1,20	0,38	1,21
645	646	300	0,00	0,00	0,00	1,35	0,46	1,36
684	652	800	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Node A	Node B	Length (ft.)	X11	X12	X13	X22	X23	X33
632	671	2000	1,02	0,50	0,42	1,05	0,38	1,03
671	684	300	1,36	0,00	0,46	0,00	0,00	1,35
671	680	1000	1,02	0,50	0,42	1,05	0,38	1,03
684	611	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,35
671	675	500	0,45	0,03	-0,01	0,40	0,03	0,45
633	634	5280	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En la tabla IV, se representan las líneas de las barras que se extiende en el sistema en susceptancias.

TABLA IV
DATOS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS (SUSCEPTANCIA)

Node A	Node B	Length (ft.)	B11	B12	B13	B22	B23	B33
632	645	500	0,00	0,00	0,00	4,71	-0,90	4,67
632	633	500	5,70	-1,08	-1,69	5,18	-0,66	5,42
645	646	300	0,00	0,00	0,00	4,71	-0,90	4,67
684	652	800	88,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
632	671	2000	6,30	-2,00	-1,26	5,96	-0,74	5,64
671	684	300	4,67	0,00	-0,90	0,00	0,00	4,71
671	680	1000	6,30	-2,00	-1,26	5,96	-0,74	5,64
684	611	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,52
671	675	500	96,89	0,00	0,00	96,89	0,00	96,89
633	634	5280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En la tabla II, III y IV se presentan datos en por unidad de; Rkm(pu) resistencia en kilómetros, Xkm(pu) reactancia en kilómetros, Bkm/2(pu) susceptancia en kilómetros.

Lo que representa cada uno de las tablas:

$$R_{11} = Z_{aa}$$

$$R_{22} = Z_{bb}$$

$$R_{33} = Z_{cc}$$

Son las resistencias, reactancias y susceptancias propias de la línea.

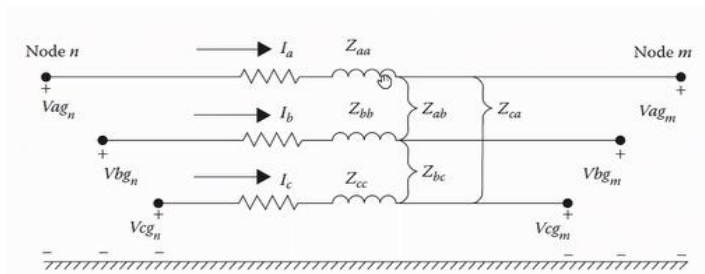


Figura 13 modelo de segmento de línea trifásico

Para el análisis de propagación de armónicos es necesario solventar primero el flujo de carga a frecuencia fundamental, inyectando la corriente de cada una de las cargas, según las tablas II, III y IV. Existe una carga no lineal que afecta al sistema, de tal modo que se aplica el orden armónico 1, 3, 5 y 7 que fueron sujetos para este estudio.

2.4.22. Modelamiento de las cargas para el alimentador de trece nodos

En la tabla V se aprecia las cargas que van por cada fase, demostrando también al nodo que está conectado cada carga, el modelamiento de la carga en algunas se toma como potencia constante (PQ=0), impedancia constante (Z=2) y corriente constante (I=1), tomando en cuenta que todas las cargas son modeladas como potencia constante en sistemas de transmisión.

TABLA V
DATOS DE CARGAS DEL SISTEMA DE 13 BARRAS

Nodo	Y=1, D=0	Alfa (PQ=0, I=1, Z=2)	Ph-1 (kW)	Ph-1 (kVAr)	Ph-2 (kW)	Ph-2 (kVAr)	Ph-3 (KW)	Ph-3 (kVAr)	Tipo l/nl	Tipo
634	1	0	160	110	120	90	120	90	0	0
645	1	0	0	0	170	125	0	0	0	0
646	1	2	0	0	152,8118	1,159829	77,18816	133,1598	0	0
652	1	2	128	86	0	0	0	0	0	0
671	1	0	537	306	451	258	637	634	0	0
675	1	0	485	190	68	60	290	212	0	0
611	1	1	0	0	0	0	170	80	0	0
680	1	0	181,6387	105,9559	201,8377	117,7387	162,5326	94,81069	1	1

2.4.23. Capacitores para el alimentador de trece nodos

Para la presente modelación del algoritmo se dispone dos tipos de capacitores, para el nodo 675, para las tres fases con una capacidad 200 KVAR y para el nodo 611 para la fase C con una capacidad de 100 KVAR.

TABLA VI

DATOS DE CAPACITORES DEL SISTEMA DE 13 BARRAS			
Nodo	CAP A kVAr	CAP B kVAr	CAP C kVAr
675	200	200	200
611	0	0	100

2.4.24. Cálculo para alimentador de treinta y siete nodos.

Para el desarrollo de del algoritmo de programación de 37 nodos, se realizó la misma rutina del alimentador de 13 nodos, extrayendo los datos del alimentador de prueba de la IEEE, donde nos muestra la matriz de impedancia Z_{abc} y las configuraciones dispuestas para la modelación del sistema.

La figura 14, muestra el circuito de distribución analizado el cual consta de 37 nodos con dos cargas no lineales conectadas a las barras 708 y 711.

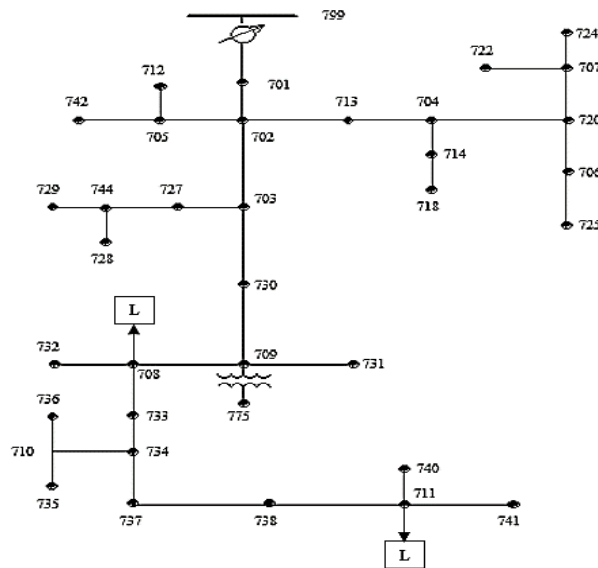


Figura 14 Diagrama Test Freeder IEEE 37 nodos

2.4.25. Topología del diagrama de treinta y siete nodos

Dentro de los parámetros ingresado se determina las diferentes conexiones de las líneas entre los nodos del sistema, detallando la longitud entre el nodo A y el Nodo B.

TABLA VII
TOPOLOGÍA DE LA RED DE 37 NODOS

Node A	Node B	Length	Config.
701	702	960	2
702	705	400	4
702	713	360	3
702	703	1320	2
703	727	240	4
703	730	600	3
704	714	80	4
704	720	800	3
705	742	320	4
705	712	240	4
706	725	280	4
707	724	760	4
707	722	120	4
708	733	320	3
708	732	320	4
709	731	600	3
709	708	320	3
710	735	200	4
710	736	1280	4
711	741	400	3
711	740	200	4
713	704	520	3
714	718	520	4
720	707	920	4
720	706	600	3
727	744	280	3

Node A	Node B	Length	Config.
730	709	200	3
733	734	560	3
734	737	640	3
734	710	520	4
737	738	400	3
738	711	400	3
744	728	200	4
744	729	280	4
709	775	5280	5

2.4.26. Configuración de conductores de trece nodos

En el presente se observan los valores ingresados al simulador para la obtención de los datos correspondientes a los THDv y THDi en el sistema de 37 nodos donde existe dos cargas no lineales en las barras 711 y 708.

TABLA VII
DATOS DEL SISTEMA DE 37 BARRAS (RESISTENCIA)

Nodo A	Nodo B	Longitud	R11	R12	R13	R22	R23	R33
701	702	960	0,475	0,1629	0,1234	0,449	0,1629	0,475
702	705	400	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
702	713	360	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
702	703	1320	0,475	0,1629	0,1234	0,449	0,1629	0,475
703	727	240	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
703	730	600	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
704	714	80	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
704	720	800	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
705	742	320	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
705	712	240	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
706	725	280	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
707	724	760	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
707	722	120	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
708	733	320	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
708	732	320	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
709	731	600	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
709	708	320	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
710	735	200	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095

Nodo A	Nodo B	Longitud	R11	R12	R13	R22	R23	R33
710	736	1280	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
711	741	400	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
711	740	200	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
713	704	520	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
714	718	520	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
720	707	920	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
720	706	600	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
727	744	280	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
730	709	200	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
733	734	560	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
734	737	640	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
734	710	520	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
737	738	400	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
738	711	400	1,294	0,4871	0,4585	1,302	0,4871	1,294
744	728	200	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
744	729	280	2,095	0,5204	0,4926	2,107	0,5204	2,095
709	775	5280	0,041	0	0	0	0	0

En la tabla IX, se representan las líneas de las barras que se extiende en el sistema en reactancia.

TABLA IX
DATOS DEL SISTEMA DE 37 BARRAS (REACTANCIA)

Nodo A	Nodo B	Longitud	X11	X12	X13	X22	X23	X33
701	702	960	0,297	-0,0326	-0,061	0,268	-0,033	0,297
702	705	400	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
702	713	360	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
702	703	1320	0,297	-0,0326	-0,061	0,268	-0,033	0,297
703	727	240	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
703	730	600	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
704	714	80	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
704	720	800	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
705	742	320	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
705	712	240	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
706	725	280	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
707	724	760	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
707	722	120	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
708	733	320	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
708	732	320	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
709	731	600	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671

Nodo A	Nodo B	Longitud	X11	X12	X13	X22	X23	X33
709	708	320	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
710	735	200	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
710	736	1280	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
711	741	400	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
711	740	200	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
713	704	520	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
714	718	520	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
720	707	920	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
720	706	600	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
727	744	280	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
730	709	200	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
733	734	560	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
734	737	640	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
734	710	520	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
737	738	400	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
738	711	400	0,671	0,2111	0,1521	0,633	0,2111	0,671
744	728	200	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
744	729	280	0,776	0,2738	0,2123	0,74	0,2738	0,776
709	775	5280	0,834	0	0	0	0	0

En la tabla X, se representan las líneas de las barras que se extiende en el sistema en susceptancias.

TABLA VIII
DATOS DEL SISTEMA DE 37 BARRAS (SUSCEPTANCIA).

Nodo A	Nodo B	Longitud	B11	B12	B13	B22	B23	B33
701	702	960	127,8	0	0	127,8	0	127,8
702	705	400	60,25	0	0	60,25	0	60,25
702	713	360	74,84	0	0	74,84	0	74,84
702	703	1320	127,8	0	0	127,8	0	127,8
703	727	240	60,25	0	0	60,25	0	60,25
703	730	600	74,84	0	0	74,84	0	74,84
704	714	80	60,25	0	0	60,25	0	60,25
704	720	800	74,84	0	0	74,84	0	74,84
705	742	320	60,25	0	0	60,25	0	60,25
705	712	240	60,25	0	0	60,25	0	60,25
706	725	280	60,25	0	0	60,25	0	60,25
707	724	760	60,25	0	0	60,25	0	60,25
707	722	120	60,25	0	0	60,25	0	60,25
708	733	320	74,84	0	0	74,84	0	74,84

Nodo A	Nodo B	Longitud	B11	B12	B13	B22	B23	B33
708	732	320	60,25	0	0	60,25	0	60,25
709	731	600	74,84	0	0	74,84	0	74,84
709	708	320	74,84	0	0	74,84	0	74,84
710	735	200	60,25	0	0	60,25	0	60,25
710	736	1280	60,25	0	0	60,25	0	60,25
711	741	400	74,84	0	0	74,84	0	74,84
711	740	200	60,25	0	0	60,25	0	60,25
713	704	520	74,84	0	0	74,84	0	74,84
714	718	520	60,25	0	0	60,25	0	60,25
720	707	920	60,25	0	0	60,25	0	60,25
720	706	600	74,84	0	0	74,84	0	74,84
727	744	280	74,84	0	0	74,84	0	74,84
730	709	200	74,84	0	0	74,84	0	74,84
733	734	560	74,84	0	0	74,84	0	74,84
734	737	640	74,84	0	0	74,84	0	74,84
734	710	520	60,25	0	0	60,25	0	60,25
737	738	400	74,84	0	0	74,84	0	74,84
738	711	400	74,84	0	0	74,84	0	74,84
744	728	200	60,25	0	0	60,25	0	60,25
744	729	280	60,25	0	0	60,25	0	60,25
709	775	5280	1E-04	0	0	0	0	0

En la tabla 12. 13. y 14 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.

2.4.27. Modelamiento de las cargas para el alimentador de treinta y siete nodos

En la presenta tabla se aprecia las cargas que van por cada fase, demostrando también al nodo que está conectado a cada carga, el modelamiento de la carga en algunas se toma como potencia constante (PQ=0), impedancia contante(Z=2) y corriente constante (I=1), en la tabla XI se puede apreciar que existe dos cargas no lineales en los nodos 711 y 708.

TABLA IX
DATOS DE CARGAS DEL SISTEMA DE 37 NODOS

Nodo	Y=1, D=0	Alfa (PQ=0 , I=1, Z=2)	Ph-1 (kW)	Ph-1 (kVAr)	Ph-2 (kW)	Ph-2 (kVAr)	Ph-3 (KW)	Ph-3 (kVAr)	l/nl	Tipo
701	1	0	245,00	122,50	140,00	70,00	245,00	122,50	0	0
712	1	0	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
713	1	0	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
714	1	1	8,50	4,00	19,00	9,00	10,50	5,00	0	0
718	1	2	42,50	20,00	42,50	20,00	0,00	0,00	0	0
720	1	0	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
722	1	1	10,50	5,00	70,00	35,00	80,50	40,00	0	0
724	1	2	0,00	0,00	21,00	10,50	21,00	10,50	0	0
725	1	0	0,00	0,00	21,00	10,50	21,00	10,50	0	0
727	1	0	21,00	10,50	0,00	0,00	21,00	10,50	0	0
728	1	0	42,00	21,00	42,00	21,00	42,00	21,00	0	0
729	1	1	21,00	10,50	21,00	10,50	0,00	0,00	0	0
730	1	2	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
731	1	2	0,00	0,00	42,50	20,00	42,50	20,00	0	0
732	1	0	21,00	10,50	0,00	0,00	21,00	10,50	0	0
733	1	1	42,50	20,00	42,50	20,00	0,00	0,00	0	0
734	1	0	21,00	10,50	0,00	0,00	21,00	10,50	0	0
735	1	0	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
736	1	2	0,00	0,00	21,00	10,50	21,00	10,50	0	0
737	1	1	70,00	35,00	70,00	35,00	0,00	0,00	0	0
738	1	0	63,00	21,00	63,00	21,00	0,00	0,00	0	0
740	1	0	42,50	20,00	0,00	0,00	42,50	20,00	0	0
741	1	1	21,00	10,50	0,00	0,00	21,00	10,50	0	0
742	1	2	4,00	2,00	46,50	22,00	42,50	20,00	0	0
744	1	0	21,00	10,50	21,00	10,50	0,00	0,00	0	0
711	1	0	100	48,5	100	48,5	100	48,5	1	1
708	1	0	100	48,5	100	48,5	100	48,5	1	1

2.5. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Debido a la complejidad que implica el estudio de armónicos, se han propuesto diferentes métodos analíticos, junto con diferentes modelos matemáticos para comprender de mejor manera el problema que causan los armónicos en diferentes sistemas eléctricos. A pesar de numerosas investigaciones, aún no se ha establecido un modelo estándar para estudiarlo.

En esta investigación se utilizaron herramientas apropiadas para desarrollar modelos matemáticos con similitudes entre software comerciales para el cálculo y monitoreo de armónicos en sistemas de distribución de energía.

Para desarrollar la propuesta se utilizó un algoritmo matemático que nos permite analizar sistemas de 13 y 37 nodos.

2.6. CONCLUSIONES CAPÍTULO II.

Existen diferentes tipos de métodos para el estudio de armónicos siendo estos: el método directo, penetración armónica, penetración armónica iterativa y el barrido iterativo el cual se utiliza con frecuencia para el estudio de sistemas radiales, ya que permite la obtención de corrientes y voltajes en conjunto con la matriz primitiva de admitancias, lo que facilita su resolución.

CAPÍTULO III APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

En el proceso de la aplicación de la propuesta para el cálculo de THDv y THDi se realizó la comparación del programa desarrollado en Python con respecto a el programa comercial DIgSILENT, en sistemas de pruebas de trece y treinta y siete nodos propuestos por la IEEE.

3.2. RESULTADOS DEL ALGORITMO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICO EN EL ALIMENTADOR DE 13 NODOS

Por medio del programa PYTHON se obtuvo los resultados, mediante la modelación de un sistema desbalanceado de 13 nodos con ocho cargas, tomando en cuenta que se parte del nodo de generación 632 que nos representa como barra Slak.

Una vez procesado el algoritmo propuesto obtenemos los resultados en el programa Python, los valores calculados de THDv y THDi son analizados y comparados en DIgSILENT, para validar el algoritmo propuesto.

En la tabla X y XI, se muestran los resultados de la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente (THDv y THDi) correspondiente al sistema de 13 nodos.

TABLA X
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	PYTHON	PYTHON	PYTHON	DIgSILENT	DIgSILENT	DIgSILENT
	$THD_{VA}[\%]$	$THD_{VB}[\%]$	$THD_{VC}[\%]$	$THD_{VA}[\%]$	$THD_{VB}[\%]$	$THD_{VC}[\%]$
671	3,57552	4,06775	3,33689	3,51953	4,39217	3,72722
680*	5,58236	6,21198	5,18214	5,57339	6,70720	5,82907
645	0	0,01206	0,00957	0	0,01131	0,01002
646	0	0,01207	0,00957	0	0,01131	0,01001
NODOS	PYTHON	PYTHON	PYTHON	DIgSILENT	DIgSILENT	DIgSILENT

	$THD_{VA}[\%]$	$THD_{VB}[\%]$	$THD_{VC}[\%]$	$THD_{VA}[\%]$	$THD_{VB}[\%]$	$THD_{VC}[\%]$
652	3,58175	0	0	3,53406	0	0
611	0	0	3,32442	0	0	3,71317
675	3,56092	4,06784	3,33557	3,522167	4,37441	3,72736
634	0,01021	0,01193	0,00945	0,01020	0,01120	0,00992

En la tabla X se muestra los datos obtenidos de porcentajes de distorsión armónica correspondientes a cada nodo del sistema, estos valores representan cada uno de los de los nodos que contienen cargas lineales y no lineales.

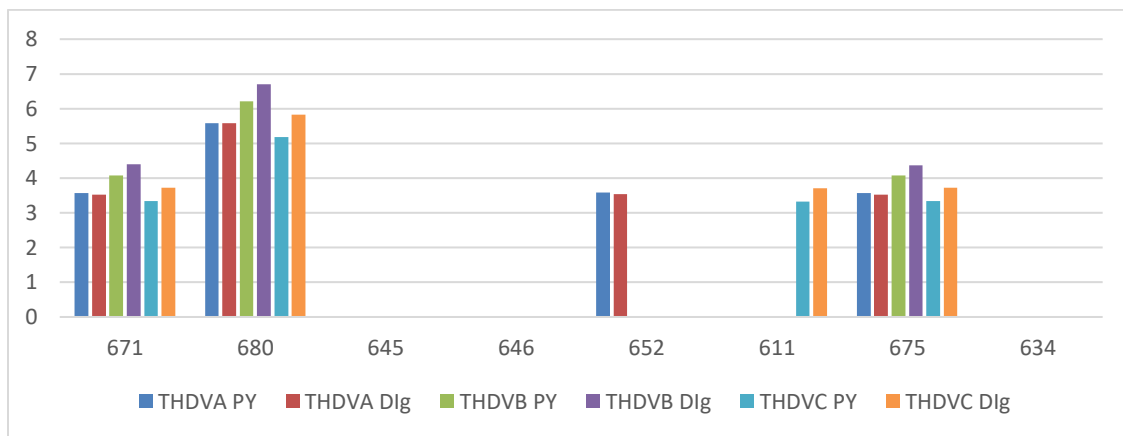


Figura 15 Porcentaje de distorsión armónica $THDv(\%)$ 13 nodos

La carga no lineal se encuentra conectada al nodo 680 donde se presenta un elevado porcentaje de distorsión armónica como se indica en la figura 15, por este motivo los nodos 671, 675, 652 y 611 son directamente afectados por esta carga.

TABLA XI
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	PYTHON $THD_{iA}[\%]$	PYTHON $THD_{iB}[\%]$	PYTHON $THD_{iC}[\%]$	DIGSILENT $THD_{iA}[\%]$	DIGSILENT $THD_{iB}[\%]$	DIGSILENT $THD_{iC}[\%]$
671	1,15333	1,43011	0,95648	1,19411	1,35376	0,807750
680*	75,91443	75,91443	75,91443	75,75065	75,75683	75,75065
645	0	0,00324		0	0,003430	0,00237
646	0	0,00350	0,00350	0	0,012060	0,00191
652	1,04271	0	0	1,076346	0	0
611	0	0	1,48192	0	0	1,26253
675	1,48672	1,10056	1,12418	1,53595	1,04504	0,95164
634	0,00305	0,00317	0,00272	0,00302	0,00335	0,00265

En la tabla XI se indican los porcentajes de THDi, donde se puede visualizar que el valor más alto se concentra en el nodo 680, cuando se tiene un THDi alto es indicativo de que en ese nodo del sistema está conectada una carga no lineal como se puede visualizar en la figura 16.

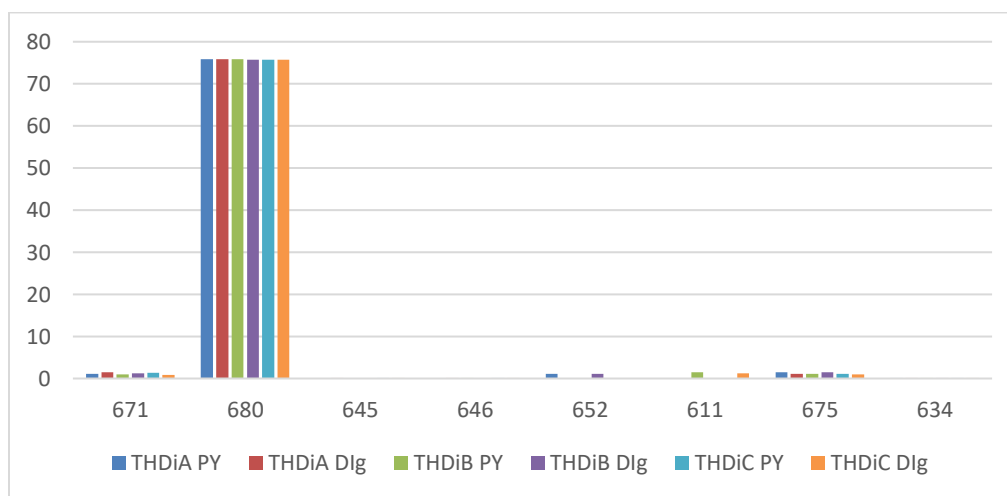


Figura 16 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 13 nodos

El análisis de los resultados de valores de distorsión armónica tanto del THD_v y THD_i, están representadas en las tablas XII y XIII, donde se determina el error promedio de 0,53% en la fase A, 5,21% en la fase B y 7,02% en la fase C para el TDH_v, los resultados obtenidos en el algoritmo planteado son semejantes a los resultados obtenidos en DIgSILENT.

TABLA XII
DATOS DEL ERRO THDV %

NODOS	Error $THD_{vA}[\%]$	Error $THD_{vB}[\%]$	Error $THD_{vC}[\%]$
671	1,59084	7,38633	10,47242
680	0,16094	7,38341	9,09834
645	0	6,63130	4,49102
646	0	6,71972	4,39560
652	1,34944	0	0
611	0	0	10,46949
675	1,10026	7,00826	10,51119
634	0,09804	6,51786	4,73790

En la tabla XIII se muestra un error promedio de 1,37% en la fase A, 3,75% en la fase B y 7.63% en la fase C para el THD_i y los resultados obtenidos son semejantes a los resultados obtenidos en DIgSILENT

TABLA XIII
DATOS DEL ERROR THDI %

NODOS	Error $THD_{iA}[\%]$	Error $THD_{iB}[\%]$	Error $THD_{iC}[\%]$
671	3,41510	5,63985	18,41288
680	0,21621	0,20803	0,21621
645	0	5,53936	16,03376
646	0	7,97844	8,24607
652	3,12502	0	0
611	0	0	7,37701
675	3,20518	5,31272	8,13081
634	0,99338	5,37313	2,64151

3.3. ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA ARMÓNICO EN EL ALIMENTADOR DE 37 NODOS

En el programa Python se obtienen los resultados de porcentaje de distorsión armónica, mediante la modelación de un sistema desbalanceado de 37 nodos con 27 cargas, tomando como referencia el nodo 701 como barra Slack, las cargas no lineales se encuentran conectadas el los nodos 711 y 708. En la tabla XIV se indica los valores calculados de porcentaje armónico.

TABLA XIV
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	PYTHON $THD_{VA}[\%]$	PYTHON $THD_{VB}[\%]$	PYTHON $THD_{VC}[\%]$	DIGSILENT $THD_{VA}[\%]$	DIGSILENT $THD_{VB}[\%]$	DIGSILENT $THD_{VC}[\%]$
701	0,570347	0,574089	0,573427	0,5781315	0,5802799	0,5801024
708*	3,79542	3,78484	3,7958	4,210069	4,18691	4,201634
711*	5,29412	5,25352	5,26965	5,790416	5,725259	5,744169
712	1,33387	1,33938	1,34057	1,352684	1,35571	1,3578
713	1,33323	1,3389	1,33964	1,352022	1,355263	1,356847
714	1,33308	1,33868	1,33935	1,351942	1,355106	1,356624
718	1,33341	1,339	1,33936	1,352277	1,35544	1,356632
720	1,33288	1,33836	1,33889	1,351808	1,354858	1,356219
722	1,33308	1,33995	1,34065	1,352165	1,357283	1,358937
724	1,33307	1,34009	1,34077	1,352027	1,356398	1,35792
725	1,3329	1,33843	1,33895	1,351831	1,354937	1,356299
727	2,41301	2,41715	2,42211	2,447583	2,447694	2,454097
728	2,41313	2,41727	2,4223	2,447715	2,447826	2,454302
729	2,41306	2,4172	2,42204	2,447639	2,44775	2,454045
730	3,146	3,14373	3,15182	3,191369	3,183877	3,193807
731	3,39445	3,38886	3,3981	3,4435	3,432396	3,443612
732	3,79576	3,78484	3,79613	4,210004	4,18692	4,20157
733	3,99738	3,98395	3,99618	4,456694	4,426438	4,44175
734	4,35484	4,33538	4,34934	4,824494	4,786192	4,803188
735	4,35649	4,33609	4,35157	4,826435	4,78707	4,805769
736	4,35613	4,33768	4,35276	4,826113	4,788931	4,807169
737	4,7688	4,74066	4,75673	5,250167	5,200717	5,219827

NODOS	PYTHON $THD_{VA}[\%]$	PYTHON $THD_{VB}[\%]$	PYTHON $THD_{VC}[\%]$	DIgSILENT $THD_{VA}[\%]$	DIgSILENT $THD_{VB}[\%]$	DIgSILENT $THD_{VC}[\%]$
738	5,03007	4,99594	5,01269	5,518808	5,461765	5,481508
740	5,29466	5,25352	5,27017	5,791015	5,725264	5,744744
741	5,29401	5,25353	5,26955	5,790302	5,725282	5,74406
742	1,33374	1,3396	1,34062	1,352499	1,355874	1,357749
744	2,41287	2,41702	2,42204	2,447452	2,447565	2,45404

Las cargas no lineales se encuentran conectadas a los nodos 708 y 711 donde se presentan un elevado porcentaje de distorsión armónica en diferentes nodos como se indica en la figura 17.

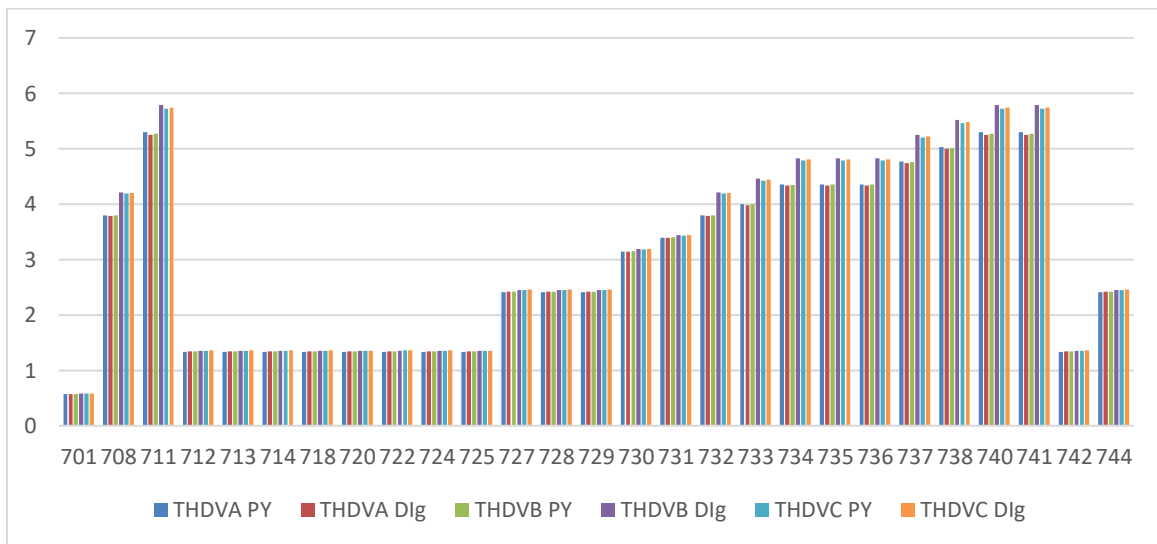


Figura 17 Porcentaje de distorsión armónica $THDv$ (%) 37 nodos

TABLA XV
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	PYTHON $THD_{iA}[\%]$	PYTHON $THD_{iB}[\%]$	PYTHON $THD_{iC}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iA}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iB}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iC}[\%]$
701	16,70773	19,68138	17,78657	16,02598	19,02362	17,21489
708	76,46431	76,45997	76,46242	75,91444	75,91444	75,91444
711	76,46596	76,45781	76,46004	75,91444	75,91444	75,91444
712	0,50671	0	0,50917	0,51337	0	0,51505
713	0,50646	0	0,50882	0,51312	0	0,51469
714	0,50641	0,50619	0,50460	0,51308	0,51203	0,51044
718	0,50653	0,50860	0	0,51320	0,51446	0
720	0,50633	0	0,50854	0,51302	0	0,51444
722	0,50231	0,48827	0,49058	0,50900	0,49419	0,49658

NODOS	PYTHON $THD_{iA}[\%]$	PYTHON $THD_{iB}[\%]$	PYTHON $THD_{iC}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iA}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iB}[\%]$	DIgSILENT $THD_{iC}[\%]$
724	0	0,48832	0,48855	0	0,49387	0,49411
725	0	0,48773	0,48790	0	0,49335	0,49354
727	0,87980	0	0,88296	0,89199	0	0,89404
728	0,87984	0,88125	0,88303	0,89204	0,89210	0,89411
729	0,87982	0,88123	0	0,89201	0,89207	0
730	1,19651	0	1,19851	1,21343	0	1,21396
731	0	1,28900	1,29243	0	1,30537	1,30924
732	1,38572	0	1,38557	1,53700	0	1,53347
733	1,52131	1,51599	0	1,69667	1,68509	0
734	1,59043	0	1,58804	1,76245	0	1,75416
735	1,65838	0	1,65611	1,83777	0	1,82937
736	0	1,58391	1,58929	0	1,74934	1,75556
737	1,74206	1,73148	0	1,91837	1,90020	0
738	2,42631	2,40942	0	2,66267	2,63502	0
740	2,01654	0	2,00665	2,20602	0	2,18777
741	1,93442	0	1,92495	2,11620	0	2,09868
742	0,48607	0,50696	0,50919	0,49243	0,51274	0,51503
744	0,87975	0,88116	0	0,89195	0,89201	0

En la tabla XV se indican los porcentajes de THDi, donde se puede visualizar que el valor más alto se concentra en los nodos 708 y 711, cuando se tiene un THDi alto es indicativo de que en ese nodo del sistema está conectada una carga no lineal como se puede visualizar en la figura 18.

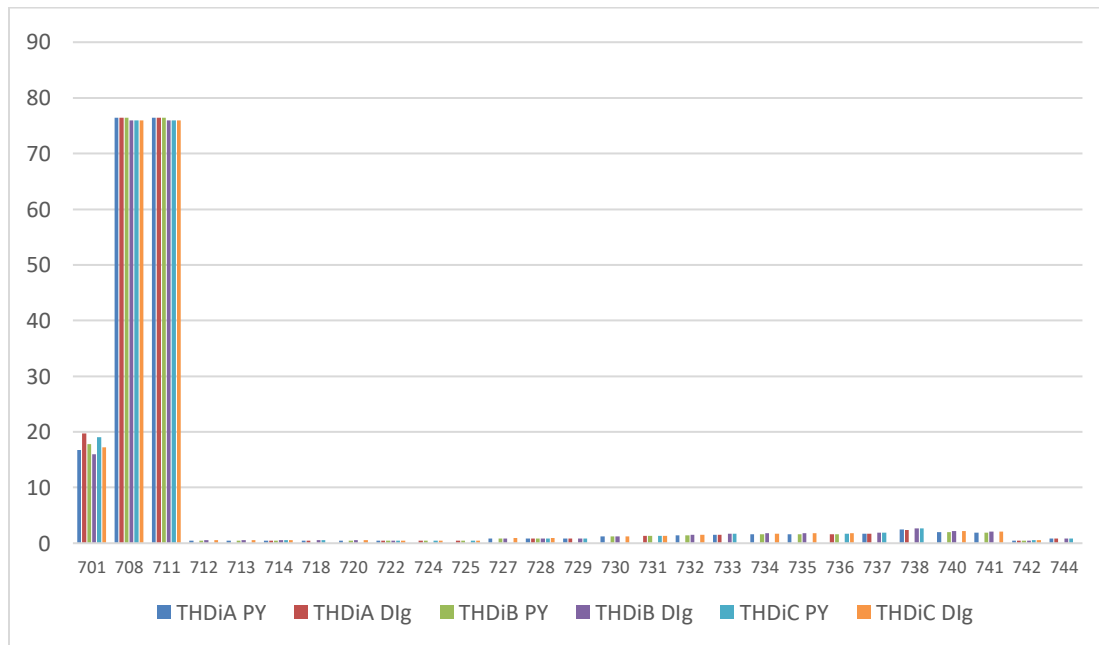


Figura 18 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 37 nodos

El análisis de los resultados de valores de distorsión armónica tanto del THD_v y THD_i, están representadas en las tablas XVI y XVII, donde se determina el error el error promedio es de 4,64% en la fase A, 4,41% en la fase B y 4,46% en la fase C para el TDH_v y los resultados obtenidos son semejantes a los resultados obtenidos en DIGSILENT.

TABLA XVI
RESULTADOS DEL PORCENTAJE PROMEDIO DE THDV (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	Error $THD_{vA}[\%]$	Error $THD_{vB}[\%]$	Error $THD_{vC}[\%]$
701	1,346	1,067	1,151
708	9,849	9,603	9,659
711	8,571	8,240	8,261
712	1,391	1,205	1,269
713	1,390	1,207	1,268
714	1,395	1,212	1,273
718	1,395	1,213	1,273
720	1,400	1,218	1,278
722	1,411	1,277	1,346
724	1,402	1,202	1,263
725	1,400	1,218	1,279
727	1,413	1,248	1,303
728	1,413	1,248	1,304
729	1,413	1,248	1,304
730	1,422	1,261	1,315
731	1,424	1,268	1,322
732	9,840	9,603	9,650
733	10,306	9,996	10,031
734	9,735	9,419	9,449
735	9,737	9,421	9,451
736	9,738	9,423	9,453
737	9,169	8,846	8,872
738	8,856	8,529	8,553
740	8,571	8,240	8,261
741	8,571	8,240	8,261
742	1,387	1,200	1,262
744	1,413	1,248	1,304

En la tabla XVII, se demuestra los valores del error de error promedio es de 3,57% en la fase A, 1,98% en la fase B y 2,72% en la fase C para el THD_i y los resultados obtenidos en nuestro algoritmo es semejante a los resultados obtenidos en DIGSILENT.

TABLA XVII

RESULTADOS DEL PORCENTAJE PROMEDIO DE THDI (PYTHON Y DIGSILENT)

NODOS	Error $THD_{iA}[\%]$	Error $THD_{iB}[\%]$	Error $THD_{iC}[\%]$
701	4,2540	3,4576	3,3209
708	0,7243	0,7186	0,7218
711	0,7265	0,7158	0,7187
712	1,2977	0	1,1408
713	1,2966	0	1,1394
714	1,3000	1,1394	1,1444
718	1,3006	1,1396	0
720	1,3047	0	1,1476
722	1,3146	1,1975	1,2082
724	0	1,1240	1,1267
725	0	1,1395	1,1442
727	1,3667	0	1,2389
728	1,3673	1,2160	1,2392
729	1,3673	1,2161	0
730	1,3943	0	1,2728
731	0	1,2544	1,2842
732	9,8427	0	9,6443
733	10,3352	10,0349	0
734	9,7606	0	9,4697
735	9,7612	0	9,4707
736	0	9,4566	9,4712
737	9,1903	8,8788	0
738	8,8768	8,5616	0
740	8,5894	0	8,2787
741	8,5896	0	8,2783
742	1,2916	1,1289	1,1341
744	1,3683	1,2164	0

3.4. DISEÑO DE FILTRO DE ARMONICOS EN REDES DE PRUEBA

La implementación de un filtro armónico en el sistema de 13 y 37 nodos nos permite obtener resultados moderados y establecidos en el ARCONEL.

Los filtros pasivos de segundo orden RLC, nos permiten el paso de frecuencias bajas y atenúa las frecuencias altas, este filtro está compuesto por tres elementos fundamentales

una resistencia, una bobina y un condensador, para este caso calculamos el capacitor y la bobina.

$$Z = \frac{V^2}{MVA} \quad (40)$$

$$r = \omega L - \frac{L}{\omega C} \quad (40)$$

$$34,61 = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi f \left(\frac{1}{2\pi(5f)L2\pi(5f)} \right)} \quad (41)$$

$$\frac{34,61}{2\pi f} = (1 - n^2)L \quad (42)$$

$$\frac{34,61}{2\pi f(1 - n^2)} = L \quad (43)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (44)$$

$$2\pi n f L = \frac{1}{2\pi n f C} \quad (45)$$

$$C = \frac{1}{2\pi n f L (2\pi n f)} \quad (46)$$

3.4.1. Red de prueba 13 nodos

Aplicando nuevamente la solución de flujos de potencia a la red con filtro se obtienen los siguientes resultados.

TABLA XVIII

RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV APLICANDO FILTRO DE ARMÒNICOS

NODOS	PYTHON	PYTHON	PYTHON
	$THD_{VA}[\%]$	$THD_{VB}[\%]$	$THD_{VC}[\%]$
671	1,80608	2,03077	1,68311
680*	2,82270	3,10207	2,61476
645	0	0,00603	0,00483
646	0	0,00603	0,00483
652	1,80933	0	0
611	0	0	1,67655
675	1,79829	2,03082	1,68243
634	0,00516	0,00596	0,00477

En la tabla XVII se muestra los datos obtenidos de porcentajes de distorsión armónica correspondientes a cada nodo del sistema, después de aplicar el filtro para armónicos. Estos resultados comparados con la tabla X, claramente muestra una disminución considerable de los armónicos tal es el caso del nodo 680 donde se encuentra conectada la carga no lineal el cual tenía un %THDv de 6,21198% bajo a 3,10207%, en la figura 19 se muestra los resultados obtenidos de forma gráfica.

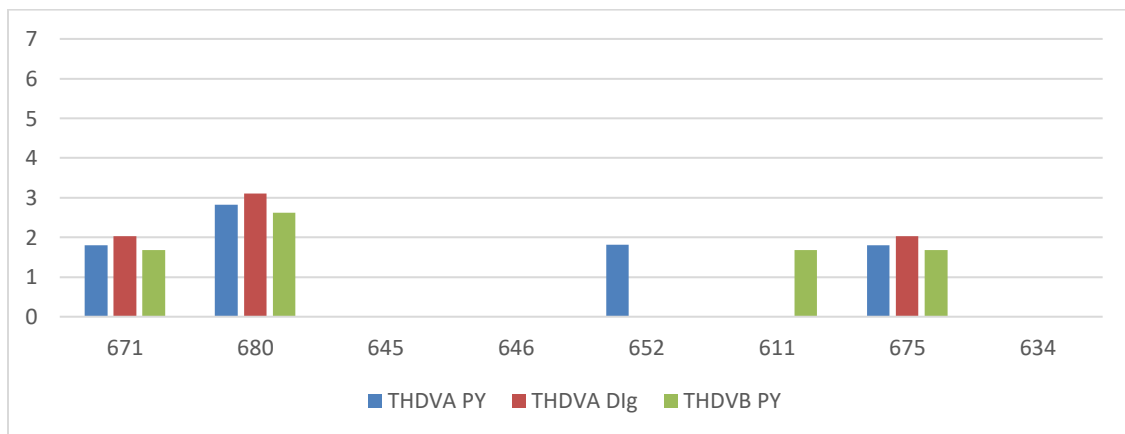


Figura 19 Porcentaje de distorsión armónica THDv(%) 13 nodos

De la misma manera sucede con el THDi (%) en cual disminuye considerablemente en el nodo 680 y en los demás nodos del sistema de prueba, como se indica en la tabla XIX.

TABLA XIX
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI APLICANDO FILTRO PARA ARMÒNICOS

NODOS	PYTHON THD_{iA} [%]	PYTHON THD_{iB} [%]	PYTHON THD_{iC} [%]
671	0,51758	0,57976	0,34775
680*	3,26701	3,22424	3,25684
645	0,00000	0,00147	0,00074
646	0,00000	0,00602	0,00082
652	0,46555	0	0
611	0	0	0,54829
675	0,67166	0,44565	0,41051
634	0,00131	0,00143	0,00115

En la figura 20 se muestra de forma gráfica como disminuyo el THDi (%), en el nodo 680 que se conectó la carga no lineal y a su vez en los demás nodos.

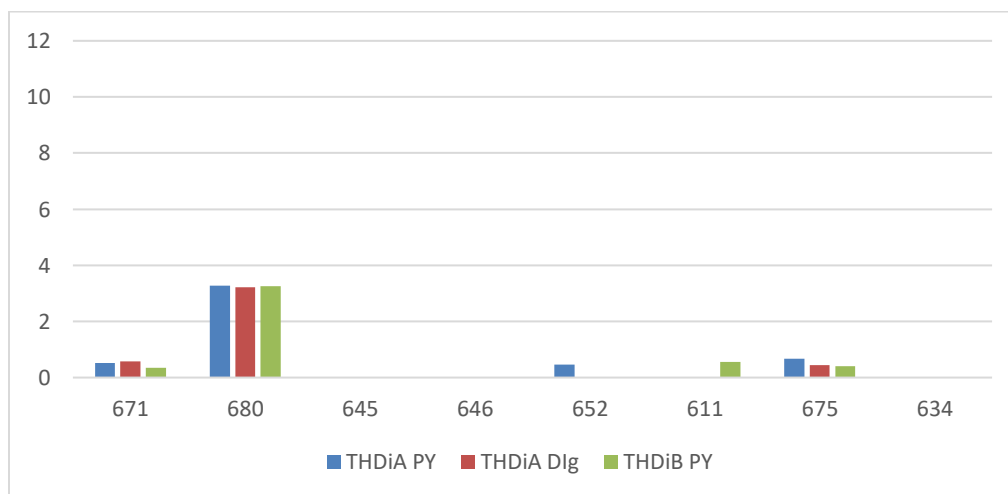


Figura 20 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 13 nodos

3.4.2. Red de prueba 37 nodos

En el sistema de 37 nodos existen dos cargas no lineales, razón por la cual existe un alto porcentaje de distorsión armónica, para mitigar este error se dispone de un filtro para armónicos obteniendo los siguientes resultados.

TABLA XX
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDV APLICANDO FILTRO PARA ARMÓNICOS

NODOS	PYTHON $THD_{VA}[\%]$	PYTHON $THD_{VB}[\%]$	PYTHON $THD_{VC}[\%]$
701	0,3016	0,3023	0,3018
708*	1,9980	1,9839	1,9888
711*	2,7188	2,6866	2,6936
712	0,7046	0,7045	0,7048
713	0,7042	0,7042	0,7043
714	0,7042	0,7041	0,7041
718	0,7044	0,7043	0,7041
720	0,7041	0,7040	0,7039
722	0,7042	0,7048	0,7049
724	0,7042	0,7049	0,7049
725	0,7041	0,7040	0,7039
727	1,2735	1,2703	1,2723
728	1,2736	1,2703	1,2724
729	1,2735	1,2703	1,2723
730	1,6578	1,6496	1,6531
731	1,7880	1,7774	1,7815
732	1,9982	1,9840	1,9890
733	2,0951	2,0792	2,0847
734	2,2671	2,2474	2,2536
735	2,2680	2,2478	2,2548
736	2,2678	2,2486	2,2555
737	2,4661	2,4412	2,4484
738	2,5917	2,5633	2,5708
740	2,7191	2,6866	2,6939
741	2,7187	2,6866	2,6936
742	0,7045	0,7046	0,7048
744	1,2734	1,2702	1,2723

En la tabla XIV se muestra los datos obtenidos de porcentajes de distorsión armónica correspondientes a cada nodo del sistema, una vez instalado el filtro se obtiene resultados favorables para el sistema.

Estos resultados comparados con la tabla XIV y la tabla XXI, claramente muestra una disminución considerable de los armónicos del 3,79542% al 1,9980% en el nodo 708 y del 5,29412% al 2,7188% en el nodo 711 donde se encuentran conectadas las cargas no lineales.

En la figura 21 se muestra de forma gráfica como disminuyo el THDv (%), en los nodos 708 y 711 que esta conecto la carga no lineal.

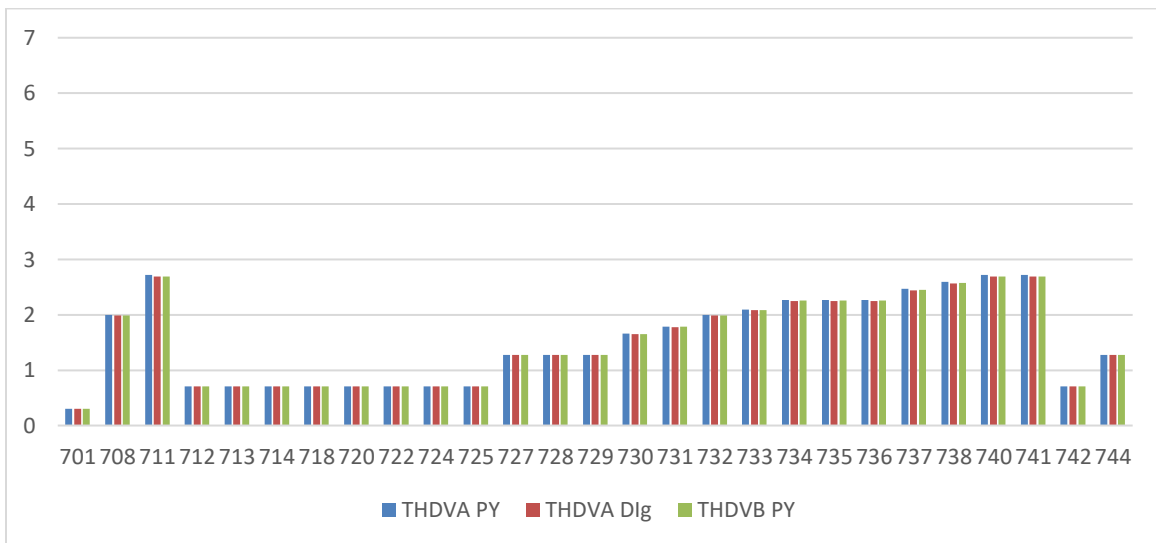


Figura 21 Porcentaje de distorsión armónica THDv (%) 37 nodos

Dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente, se obtiene los resultados favorables del THDi presentados en la tabla XXI conectado un filtro armónico.

TABLA XXIIIXI

RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE THDI APLICANDO FILTRO PARA ARMÓNICOS

NODOS	PYTHON THD_{iA} [%]	PYTHON THD_{iB} [%]	PYTHON THD_{iC} [%]
701	7,5302	8,8324	7,9785
708	3,7255	3,7114	3,711
711	3,1723	3,1554	3,1526
712	0,239	0,2091	0,2309
713	0,23079	0	0,237
714	0,2376	0,2296	0,2287
718	0,2308	0,2307	0,0001
720	0,2307	0,0001	0,222
722	0,2288	0,2123	0,2222
724	0	0,2212	0,2125
725	0,0002	0,2209	0,2209
727	0,4	0	0,3996
728	0,4001	0,399	0,3996
729	0,4	0,399	0,0005
730	0,54429	0	0,5425
731	0	0,5863	0,5849
732	0,6229	0,0002	0,6259
733	0,6884	0,6831	0
734	0,7139	0	0,7094
735	0,7454	0,7079	0,71
736	0	0,7079	0,71
737	0,7767	0,7687	0
738	1,0917	1,07948	0
740	0,8941	0,00005	0,8558
741	0,8557	0,00004	0,8484
742	0,2211	0,2299	0,2309
744	0,4	0,3989	0

Estos resultados obtenidos del THDi son comparados con los valores de la tabla XV donde se observa un porcentaje de 76,46431% en el nodo 708 con la presencia del filtro armónico obtenemos resultados del de 3,7255% y en el nodo 711 tenemos valores del 76,46594% al 3,1723%.

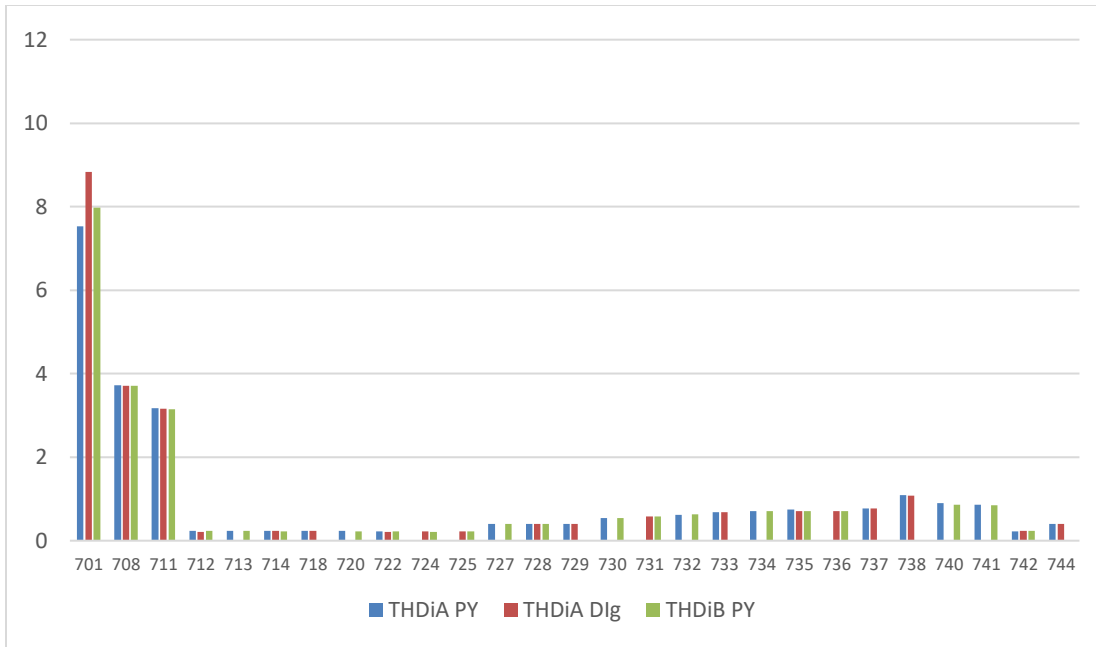


Figura 22 Porcentaje de distorsión armónica THDi (%) 37 nodos

3.5. CORRIENTE DEL NEUTRO PARA EL FLUJO DE POTENCIA (13 y 37 NODOS)

El programa propuesto nos calcula la corriente que circula por las líneas del sistema, en la tabla nos muestra las corrientes en cada fase (I_{fa}, I_{fb} y I_{fc}) y en este caso la corriente del neutro total (I_n) con sus respectivos ángulos.

TABLA XXIII
RESULTADOS DE CORRIENTES POR EL NEUTRO 13 NODOS

NODO_E.	NODO_R	I _{fa_m} [pu]	I _{fa_ang} [pu]	I _{fb_m} [pu]	I _{fb_ang} [pu]	I _{fc_m} [pu]	I _{fc_ang} [pu]	I _{n_m} [pu]	I _{n_ang} [pu]
632	680	0	0	0,34880	-141,14442	0,15475	60,22236	0,21231	-
632	646	0,19966	-35,26628	0,15330	-157,40093	0,15330	82,59876	0,04682	-28,25900
680	645	0	0	0,15429	-119,78346	0,15475	60,22208	0,00047	62,05547
633	684	0,16314	-36,45159	0	0	0	0	0,16314	-36,45159
632	671	1,57747	-30,01134	0,86656	-152,55458	1,72817	78,70457	1,06366	28,42380
671	633	0,16314	-36,45133	0	0	0,20118	92,42856	0,16089	40,30408
671	671	0,22134	-33,07847	0,24102	-151,80470	0,20079	87,32251	0,03837	-
633	611	0	0	0	0	0,20118	92,42834	0,20118	92,42834
671	675	0,54948	-24,14230	0,09327	-162,76086	0,38371	81,56414	0,48558	15,18335
646	634	0,19966	-35,26670	0,15330	-157,40178	0,15330	82,59823	0,04682	-28,25818

En la tabla XXII y XXIII se muestra las corrientes que circulan por el neutro para cada fase y la corriente total que circula en cada tramo

TABLA XXIVIII
RESULTADOS DE CORRIENTES POR EL NEUTRO 37 NODOS

NODO_E.	NODO_R	I _{fa_m} [pu]	I _{fa_ang} [pu]	I _{fb_m} [pu]	I _{fb_ang} [pu]	I _{fc_m} [pu]	I _{fc_ang} [pu]	I _{n_m} [pu]	I _{n_ang} [pu]
701	702	0,991	-25,711	0,846	-145,690	0,936	93,893	0,134	11,683
702	705	0,052	-25,485	0,052	-145,451	0,095	94,637	0,043	94,689
702	713	0,164	-25,371	0,196	-146,222	0,247	93,911	0,074	115,520
702	703	0,775	-25,805	0,597	-145,544	0,594	93,758	0,186	-26,400
703	727	0,120	-26,988	0,096	-146,900	0,072	93,098	0,042	-56,765
703	730	0,655	-25,597	0,502	-145,298	0,523	93,836	0,151	-18,334
704	714	0,057	-25,399	0,069	-145,419	0,012	94,433	0,052	-96,628
704	720	0,059	-25,343	0,128	-146,674	0,188	93,694	0,112	125,314
705	742	0,005	-26,617	0,052	-145,479	0,048	94,630	0,045	159,542
705	712	0,048	-25,396	1,042	-30,178	0,048	94,625	0,047	34,611
706	725	1,210	89,766	0,024	-146,745	0,024	93,232	0,024	153,091
707	724	3,282	89,769	0,024	-146,661	0,024	93,319	0,024	153,108
707	722	0,012	-25,671	0,080	-146,731	0,092	93,393	0,075	145,119
708	733	0,467	-25,322	0,339	-144,929	0,287	93,758	0,166	-40,659
708	732	0,024	-27,063	1,361	-30,430	0,024	93,039	0,024	32,610
709	731	3,159	89,492	0,048	-145,584	0,048	94,414	0,048	154,325
709	708	0,607	-25,596	0,454	-145,273	0,426	93,703	0,175	-33,006
710	735	0,049	-25,756	8,444	-30,459	0,049	94,373	0,049	33,817
710	736	5,343	89,433	0,024	-146,899	0,024	93,122	0,024	152,921
711	741	0,025	-27,152	2,084	-30,502	0,025	93,000	0,025	32,213
711	740	0,050	-25,814	8,390	-30,502	0,049	94,335	0,049	33,585
713	704	0,116	-25,358	0,196	-146,227	0,199	93,744	0,081	150,696
714	718	0,048	-25,397	0,048	-145,367	2,247	-150,217	0,048	-85,396
720	707	0,012	-25,352	0,104	-146,695	0,116	93,395	0,099	147,052
720	706	4,430	89,766	0,024	-146,676	0,024	93,301	0,024	153,090
727	744	0,096	-26,989	0,096	-146,906	0,048	93,104	0,048	-86,575
730	709	0,607	-25,592	0,502	-145,302	0,474	93,776	0,128	-35,774
733	734	0,418	-25,274	0,291	-144,813	0,287	93,754	0,136	-26,012
734	737	0,344	-25,087	0,266	-144,634	0,190	93,762	0,138	-53,449
734	710	0,049	-25,677	0,024	-146,835	0,073	93,971	0,043	63,721
737	738	0,262	-24,438	0,185	-143,578	0,190	93,753	0,082	-20,536
738	711	0,192	-26,404	0,116	-146,356	0,190	93,747	0,074	32,008
744	728	0,048	-26,997	0,048	-146,914	0,048	93,075	0,000	-40,362
744	729	0,024	-26,981	0,024	-146,899	1,204	-150,372	0,024	-86,754
709	775	3,714	89,491	3,739	-30,414	3,735	-150,416	251,003	-67,357

3.6. VALIDACIÓN TÉCNICA -ECONÓMICA DE LOS RESULTADOS:

Al realizar este programa se pudo calcular los armónicos provocando la distorsión de onda de voltaje o corriente denominado (THDv y THDi). Éstos producen y distorsión armónica total del voltaje y corriente en los nodos de un sistema eléctrico.

Se pudo comprender mejor los valores que se producen para proteger los componentes sensibles a la distorsión provocada y perjudicial para los elementos eléctricos o electrónicos de una subestación.

El programa cumplió ampliamente con los resultados esperados además de ser análogos con los resultados de un programa comercial PowerFactory. Evidenciándose que se desarrolló un programa dedicado para calcular los armónicos que existen en la red.

El armónico es el impacto del flujo de potencia armónica generado a través de una carga no lineal en redes de distribución desbalanceadas para determinar los THDv Y THDi en los nodos del sistema eléctrico.

3.7. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III

Se obtuvieron resultados similares comparado con un programa comercial dedicado al mismo tipo de cálculo.

El proceso usado en el desarrollo del programa es de características similares presentadas en la programación de software comercial.

Existe mayor porcentaje de distorsión armónica en los nodos donde se encuentran conectadas las cargas lineales.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se determinó los conceptos teóricos de los componentes que producen armónicos en un sistema eléctrico, tomando como referencia los conceptos se identifica ciertas técnicas aplicables para el estudio de dicho fenómeno como son: el método directo, penetración armónica y penetración armónica iterativa , cada uno de estos permiten 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.

- Tomando como referencia los diferentes conceptos de corriente armónica se realizó la modelación y el análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas para alimentadores de 13 y 37 nodos con los parámetros establecidos en la IEE para determinar los THDv y THDi en los sistemas eléctricos, utilizando el método de inyección de corrientes y barrido iterativo, debido a que es el más directo para arrojar valores reales característicos para una determinada carga contaminante.
- Existe un error de 10% en la comparación entre el algoritmo propuesto en el software Python y PowerFactory en el estudio de sistemas desbalanceados, esto se debe a que cada uno de estos programas cuentan con diferentes algoritmos de resolución.
- El diseño de un filtro anexo a la matriz Y_{BUS} a frecuencia fundamental y en función del número de armónico (h), disminuyó la distorsión armónica total a menos del 5% dicho valor está dentro del rango permitido por el ARCONEL en la resolución N° 005/18.

RECOMENDACIONES

- Realizar la comparación de los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado en Python con otros programas comerciales dedicados al análisis de armónicos en redes de distribución desbalanceadas.
- Utilizar el método iterativo de Newton Raphson, demuestra facilidad en el momento de la convergencia, debido a que la diferencia entre el número de iteraciones necesarias para resolver un sistema totalmente desbalanceado es baja, en comparación con la resolución de un sistema balanceado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Xia and G. T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies, Part I - Formulation and Solution," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-2, no. 6, pp. 17-17, June 1982, doi: 10.1109/MPER.1982.5520965.
- [2] D. K. Ray, S. Chattopadhyay and S. Sengupta, "Estimation of harmonics on load flow in a multi-bus power system," in *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, pp. 472-475, 2014, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959133.
- [3] Feng Guihong, Zhang Jing, Zhao Yisong, Ying Yong and Zhang Bingyi, "Harmonic power detection and measurement device based on harmonic power flow analysis," *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, pp. 2262-2265 Vol. 3, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202971.
- [4] Layth M. Aljfout, "Simple and Fast Algorithm for Estimating Total Harmonic Distortion", *International Journal of Soft Computing*, vol. 5, pp. 93, 2014.
- [5] M. Grotzbach, W. Dirnberger and R. Redmann, "Simplified predetermination of line current harmonics," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 17-27, March-April 1995, doi: 10.1109/2943.384623.
- [6] C. A. Canesin, L. C. O. de Oliveira, J. B. Souza, D. d. O. de Lima and R. P. Buratti, "A time-domain harmonic power-flow analysis in electrical energy distribution networks, using Norton models for non-linear loading," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014, pp. 778-782, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842775.
- [7] L. C. O. Oliveira et al., "Harmonic propagation analysis in electric energy distribution systems," *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128827.
- [8] Sy-Ruen Huang, S. C. Chung, Bing-Nan Chen and Yi-Hung Chen, "A harmonic model for the nonlinearities of single-phase transformer with describing functions," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 815-820, July 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.813878.
- [9] B. C. Neagu, G. Georgescu and O. Ivanov, "The impact of harmonic current flow on additional power losses in low voltage distribution networks," in *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 719-722, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781433.
- [10] W. Z. Gandhare, K. D. Patil, "Effects of Harmonics on Power Loss in XLPE Cables", *Energy and Power Engineering (EPE)*, vol. 5 No. 4B, 2013, pp. 1235-1239. doi: 10.4236/epe.2013.54B234.
- [11] F. V. Vera, "Estudio de armónicos que los focos ahorradores introducen a la red eléctrica," en *Efectos del empleo de focos ahorradores Estudio técnico en instalaciones*, Quito: Abya Yala, 2011, pp 33 -36.
- [14] D. B. Gallo Espín. "Mantenimiento predictivo utilizando la técnica de la termografía en transformadores y alimentadores de la Empresa Eléctrica CNEL EP Bolívar," B.S. Thesis. Cuenca, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31314>
- [15] F. Compactas, E. N. La, S. Residenciales, and U. El, "Universidad veracruzana," 2012.

- [16] E, Caluña y D, López, “Aplicación de técnicas predictivas en aisladores inspección visual, efecto corona y termografía en líneas de subtransmisión de la zona costera del país para establecer un plan de mantenimiento y evaluación técnica-económica,” Trabajo de fin de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20657>
- [17] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill, 2007.
- [18] V. H. Abril, “Técnicas E Instrumentos De La Investigación,” [Presentación Web]. Available: <https://n9.cl/duq6c>. [Accessed: 31-March-2022]
- [19] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre y AV Timbus, "Descripción general del control y la sincronización de la red para sistemas de generación de energía distribuida", IEEE Trans. Ind. Electro. , vol. 53, núm. 5, págs. 1398-1409, octubre de 2006.]

ANEXOS

ANEXO 1: INFORME DE VERIFICADORES DEL TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

ANEXO 1: INFORME DE VERIFICADORES DEL TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

1. DATOS DEL VERIFICADOR:

Diego Alejandro Nombres	Aguas 1er. Apellido	Revelo 2do Apellido
----------------------------	------------------------	------------------------

1.1 Profesión: Ingeniero Eléctrico

Grado Académico: Magister en Electricidad – Smart Grids

2. DATOS DE LOS POSGRADUADOS

Cristian Fernando Nombres	Ante 1er. Apellido	Tímbila Osorio 2do Apellido
------------------------------	-----------------------	-----------------------------------

2.1 Profesión:

Ing. Eléctrico

Ing. Electrónico

Programa: MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

3. EL TEMA DE ESTUDIO:

"ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA"

4. LA SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN PROBLÉMICA:

Frente a los problemas causados por las cargas no lineales este proyecto realizó un análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceados para determinar la distorsión armónica total del voltaje y corriente en los nodos del sistema eléctrico. La finalidad del proyecto de investigación fue desarrollar un programa en Python para calcular armónicos en redes de distribución desbalanceadas, la metodología fue aplicada a redes de prueba de la IEEE de 13 y 37 nodos. Los resultados de flujo armónico fueron comparados con el software PowerFactory DigSILENT.



5. LA FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:

¿Cuál es el impacto del flujo de potencia armónica generado a través de una carga no lineal en redes de distribución desbalanceadas para determinar los THDv Y THDi en los nodos del sistema eléctrico?

6. EL OBJETO DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN:

El objeto de la investigación nace de la necesidad de encontrar alternativas, que mejoren la calidad de energía eléctrica, de tal manera se identifique cuáles son los principales motivos que afectan a la mala calidad de energía eléctrica el CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN es el sistema eléctrico de potencia, en el cual abarca la calidad de energía eléctrica por la distorsión armónica en una red.

7. EL OBJETIVO GENERAL:

Realizar un análisis de flujo armónico en redes de distribución desbalanceadas para determinar los THDv y THDi en los nodos del sistema eléctrico.

8. LA JUSTIFICACIÓN:

Con la finalidad de determinar la incidencia de cargas no lineales en la red se realizó un estudio para conocer nivel de flujo de armónicos en una red de distribución desbalanceada. Se considero modelos de carga no lineales de la literatura lo cuales fueron ingresado en el script en Python.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] D. Xia and G. T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies Part I - Formulation and Solution," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 6, pp. 1257-1263, June 2013.
- [2] D. K. Ray, S. Chattopadhyay and S. Sengupta, "Estimation of harmonics on load flow in a multi-bus power system," Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC), Calcutta, 2014, pp. 472-473.
- [3] Feng Guihong, Zhang Jing, Zhao Yisong, Ying Yong and Zhang Bingyi, "Harmonic power detection and measurement device based on harmonic power flow analysis," 2003 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, 2013, pp. 2262-2263 Vol. 3.
- [4] Layth M. Aljofout, "Simple and Fast Algorithm for Estimating Total Harmonic Distortion", International Journal of Soft Computing, vol. 3, pp. 93, 2014.
- [5] M. Grotzbach, W. Dimberger and R. Redmann, "Simplified predetermination of line current harmonics," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 1, no. 2, pp. 17-27, March-April 1993, doi: 10.1109/2943.384623.



- [6] C. A. Canesin, L. C. O. de Oliveira, J. B. Souza, D. d. O. de Lima and R. P. Buratti, "A time-domain harmonic power-flow analysis in electrical energy distribution networks, using Norton models for non-linear loading," 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014, pp. 778-782, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842775.
- [7] L. C. O. Oliveira et al., "Harmonic propagation analysis in electric energy distribution systems," 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128827.
- [8] Sy-Ruen Huang, S. C. Chung, Bing-Nan Chen and Yi-Hung Chen, "A harmonic model for the nonlinearities of single-phase transformer with describing functions," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, pp. 815-820, July 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.813878.
- [9] B. C. Neagu, G. Georgescu and O. Ivanov, "The impact of harmonic current flow on additional power losses in low voltage distribution networks," in 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 2016, pp. 719-722, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781433.
- [10] W. Z. Gandhare, K. D. Patil, "Effects of Harmonics on Power Loss in XLPE Cables", Energy and Power Engineering (EPE), vol. 3 No. 48, 2013, pp. 1233-1239, doi: 10.4236/epe.2013.348234.
- [11] F. V. Vera, "Estudio de armónicos que los focos ahorradores introducen a la red eléctrica," en Efectos del empleo de focos ahorradores Estudio técnico en instalaciones, Quito: Abya Yala, 2011, pp 33 -36.
- [14] D. B. Gallo Espín. "Mantenimiento predictivo utilizando la técnica de la termografía en transformadores y alimentadores de la Empresa Eléctrica CNEC EP Bolívar," B.S. Thesis. Cuenca, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31314>
- [15] F. Compactas, E. N. La, S. Residenciales, and U. El, "Universidad veracruzana," 2012.
- [16] E. Caluña y D. López, "Aplicación de técnicas predictivas en aisladores inspección visual, efecto corona y termografía en líneas de subtransmisión de la zona costera del país para establecer un plan de mantenimiento y evaluación técnica-económica," Trabajo de fin de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20637>
- [17] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill, 2007.
- [18] V. H. Abril, "Técnicas E Instrumentos De La Investigación," [Presentación Web]. Available: <https://ns.d/duq6c>. [Accessed: 31-March-2022]
- [19] F. Blasbjerg, R. Teodorescu, M. Liserre y AV Timbus, "Descripción general del control y la sincronización de la red para sistemas de generación de energía distribuida", IEEE Trans. Ind. Electro. , vol. 33, núm. 3, págs. 1398-1409, octubre de 2006.
- [20] C. Cañizares, A. Conejo, "Electric Energy Systems Analysis and Operation", Taylor & Francis Group LLC, núm. 9, págs. 498-506, 2009.

Fecha de elaboración: 16 de marzo del 2022



firmado electrónicamente por:
DIEGO
ALEJANDRO
AGUIAR REVELLO

Firma del verificador:

Ing. Diego Aguas Revello, Mgs.

ANEXO 2: CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL VERIFICADOR



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

DIRECCIÓN DE POSGRADO

ANEXO 2:

CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL VERIFICADOR

En mi calidad de verificador del tema del proyecto de investigación y desarrollo titulado "ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADAS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA" de los posgraduados:

APELLIDOS	NOMBRES
Ante Timbala	Cristian Fernando
Ruiz Osorio	Cristian Mauricio

PROGRAMA: Maestría en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

CERTIFICO:

Que: analizado el tema del proyecto de investigación y desarrollo, presentado como requisito previo a la aprobación y desarrollo del trabajo de titulación para optar por el grado de Magister en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Revisado por: Diego Alejandro Aguas Revelo
Cédula de ciudadanía N° 1721760070
Profesión: Ingeniero Eléctrico
Posgrado: Magister en Electricidad – Smart Grids

Sugiero su aprobación y permita continuar con el diseño del proyecto de investigación y desarrollo.

Latacunga, marzo 16 de 2022

Firma



Verificar autenticidad por:
DIEGO
ALEJANDRO
AGUAS REVELO

Ing. Diego A. Aguas Revelo, Mgs.

ANEXO 3: INFORME DEL TUTOR



**Formulario
de Solicitud**

INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	X
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES			
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio		
Título de la propuesta	“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD _v y THD _i EN LOS NODOS DEL SISTEMA”		
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.		
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN			
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza		
INFORME			
Evaluación del desarrollo DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al desarrollo de las actividades formativas			
ACTIVIDADES FORMATIVAS	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Descripción de la propuesta	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Justificación de la propuesta	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Beneficiarios de la propuesta	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100

Fecha: 11/04/2022

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4

Latacunga - Ecuador

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido / San Felipe. Tel: (03) 2252346 - 2252307 - 2252205



INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	X
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES	
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio
Título	“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THDv y THDi EN LOS NODOS DEL SISTEMA”
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN	
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

INFORME			
Evaluación del desarrollo DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al desarrollo de las actividades formativas			
ACTIVIDADES FORMATIVAS	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Problema de investigación	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Objetivos	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100

Fecha: 11/04/2022

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4

Latacunga - Ecuador

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido / San Felipe. Tel: (03) 2252346 - 2252307 - 2252205



INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	X
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES			
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio		
Título	"ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD _v y THD _i EN LOS NODOS DEL SISTEMA"		
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.		
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN			
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza		
INFORME			
Evaluación del desarrollo DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al desarrollo de las actividades formativas			
ACTIVIDADES FORMATIVAS	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Fundamentación científico técnica	SI X	NO <input type="checkbox"/>	100
Fuentes bibliográficas sobre las que se apoya el trabajo	SI X	NO <input type="checkbox"/>	100

Fecha: 11/04/2021

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4



INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	X
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES	
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio
Título	“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD _v y THD _i EN LOS NODOS DEL SISTEMA”
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN	
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

INFORME			
Evaluación del desarrollo DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al desarrollo de las actividades formativas			
ACTIVIDADES FORMATIVAS	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Problema de investigación	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Objetivos	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100

Fecha: 11/04/2022

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4



INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	x
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES			
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio		
Título de la propuesta	"ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD _v y THD _i EN LOS NODOS DEL SISTEMA"		
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.		
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN			
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza		
INFORME			
Evaluación del desarrollo DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al desarrollo de las actividades formativas			
ACTIVIDADES FORMATIVAS	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados en el trabajo	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Preguntas científicas o hipótesis del trabajo	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100
Metodologías	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100

Fecha: 30/06/2021

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4

Latacunga - Ecuador

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido / San Felipe. Tel: (03) 2252346 - 2252307 - 2252205

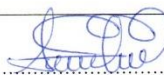


INFORME DEL TUTOR

PROPUESTA TECNOLÓGICA	
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	x
ARTÍCULO ACADÉMICO	

DATOS GENERALES	
Nombre del Estudiante	Ing. Ante Timbila Cristian Fernando Ing. Ruiz Osorio Cristian Mauricio
Título de la propuesta	“ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD _v y THD _i EN LOS NODOS DEL SISTEMA”
Sub línea de Investigación.	Calidad de energía.
DATOS DEL TUTOR DE TITULACIÓN	
Nombre completo	Msc. Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

INFORME: Evaluación del progreso DE LA PROPUESTA con relación a lo establecido en el plan de investigación y al CRONOGRAMA de las actividades.					
ACTIVIDADES DE DESARROLLO	CUMPLIMIENTO		AVANCE DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ASISTENCIA	
Objetivo específico 1	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Objetivo específico 2	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Objetivo específico 3	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	100	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
OBSERVACIONES: El desarrollo de la investigación avanza acorde a las tareas y actividades planteadas mismas que fueron revisadas en cada encuentro. Fecha: 11/04/2022					



 Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza
 C.C. 050328786-4

ANEXO 4: AVAL DEL TUTOR



POSGRADO

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “ANÁLISIS DE FLUJO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADOS, PARA DETERMINAR LOS THD_v y THD_i EN LOS NODOS DEL SISTEMA” presentado por (Ante Timbila Cristian Fernando y Ruiz Osorio Cristian Mauricio), para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera de que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, abril, 11, 2022

Msc. Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

C.C. 050328786-4

Latacunga - Ecuador

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido / San Felipe. Tel: (03) 2252346 - 2252307 - 2252205

ANEXO 5: ALIMENTADOR DE PRUEBA DE 13 NODOS IEEE

Datos de configuración de la línea aérea

Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Datos de configuración de la línea subterránea

Config.	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Datos de configuración de la línea subterránea:

Config	Phasing	Cable	Neutral	Space ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Transformador Datos:

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 – Gr.W	0.48 – Gr.W	1.1	2

Datos del segmento de línea:

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Datos Capacitor:

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
kVAr	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

Datos de carga distribuida:

Node A	Node B	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Datos de carga puntual

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Regulador Data

Regulator ID:	1		
Line Segment:	650 - 632		
Location:	50		
Phases:	A - B -C		
Connection:	3-Ph,LG		
Monitoring Phase:	A-B-C		
Bandwidth:	2.0 volts		
PT Ratio:	20		
Primary CT Rating:	700		
Compensator Settings:	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting:	3	3	3
X - Setting:	9	9	9
Voltage Level:	122	122	122

Matrices de admitancia e impedancia de fase

Configuration 601:

Z (R +jX) in ohms per mile
0.3465 1.0179 0.1560 0.5017 0.1580 0.4236
0.3375 1.0478 0.1535 0.3849
0.3414 1.0348
B in micro-Siemens per mile
6.2998 -1.9958 -1.2595
5.9597 -0.7417
5.6386

Configuration 602:

Z (R +jX) in ohms per mile
0.7526 1.1814 0.1580 0.4236 0.1560 0.5017
0.7475 1.1983 0.1535 0.3849
0.7436 1.2112
B in micro-Siemens per mile
5.6990 -1.0817 -1.6905
5.1795 -0.6588
5.4246

Configuration 603:

Z (R +jX) in ohms per mile
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
1.3294 1.3471 0.2066 0.4591
1.3238 1.3569
B in micro-Siemens per mile
0.0000 0.0000 0.0000
4.7097 -0.8999
4.6658

Configuration 604:

Z (R +jX) in ohms per mile
1.3238 1.3569 0.0000 0.0000 0.2066 0.4591
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
1.3294 1.3471
B in micro-Siemens per mile
4.6658 0.0000 -0.8999
0.0000 0.0000
4.7097

Configuration 605:

```
      Z (R +jX) in ohms per mile
0.0000 0.0000  0.0000 0.0000  0.0000 0.0000
           0.0000 0.0000  0.0000 0.0000
                        1.3292 1.3475
      B in micro-Siemens per mile
      0.0000  0.0000  0.0000
           0.0000  0.0000
                        4.5193
```

Configuration 606:

```
      Z (R +jX) in ohms per mile
0.7982 0.4463  0.3192 0.0328  0.2849 -0.0143
           0.7891 0.4041  0.3192 0.0328
                        0.7982 0.4463
      B in micro-Siemens per mile
      96.8897  0.0000  0.0000
           96.8897  0.0000
                        96.8897
```

Configuration 607:

```
      Z (R +jX) in ohms per mile
1.3425 0.5124  0.0000 0.0000  0.0000 0.0000
           0.0000 0.0000  0.0000 0.0000
                        0.0000 0.0000
      B in micro-Siemens per mile
      88.9912  0.0000  0.0000
           0.0000  0.0000
                        0.0000
```


ANEXO 6: ALIMENTADOR DE PRUEBA DE 37 NODOS IEEE

Datos de segmento

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
701	702	960	722
702	705	400	724
702	713	360	723
702	703	1320	722
703	727	240	724
703	730	600	723
704	714	80	724
704	720	800	723
705	742	320	724
705	712	240	724
706	725	280	724
707	724	760	724
707	722	120	724
708	733	320	723
708	732	320	724
709	731	600	723
709	708	320	723
710	735	200	724
710	736	1280	724
711	741	400	723
711	740	200	724
713	704	520	723
714	718	520	724
720	707	920	724
720	706	600	723
727	744	280	723
730	709	200	723
733	734	560	723
734	737	640	723
734	710	520	724
737	738	400	723
738	711	400	723
744	728	200	724
744	729	280	724
775	709	0	XFM-1
799	701	1850	721

Configuraciones de cables subterráneos

Config.	Phasing	Cable	Spacing ID
721	A B C	1,000,000 AA, CN	515
722	A B C	500,000 AA, CN	515
723	A B C	2/0 AA, CN	515
724	A B C	#2 AA, CN	515

Datos del regulador

Regulator ID:	1	
Line Segment:	799 -701	
Location:	799	
Phases:	A - B -C	
Connection:	AB - CB	
Monitoring Phase:	AB & CB	
Bandwidth:	2.0 volts	
PT Ratio:	40	
Primary CT Rating:	350	
Compensator Settings:	Ph-AB	Ph-CB
R - Setting:	1,5	1,5
X - Setting:	3	3
Voltage Level:	122	122

Datos del transformador

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2.500	230 D	4.8 D	2	8
XFM -1	500	4.8 D	.480 D	0,09	1,81

Cargas puntuales

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
701	D-PQ	140	70	140	70	350	175
712	D-PQ	0	0	0	0	85	40
713	D-PQ	0	0	0	0	85	40
714	D-I	17	8	21	10	0	0
718	D-Z	85	40	0	0	0	0
720	D-PQ	0	0	0	0	85	40
722	D-I	0	0	140	70	21	10
724	D-Z	0	0	42	21	0	0
725	D-PQ	0	0	42	21	0	0
727	D-PQ	0	0	0	0	42	21
728	D-PQ	42	21	42	21	42	21
729	D-I	42	21	0	0	0	0
730	D-Z	0	0	0	0	85	40
731	D-Z	0	0	85	40	0	0
732	D-PQ	0	0	0	0	42	21
733	D-I	85	40	0	0	0	0
734	D-PQ	0	0	0	0	42	21
735	D-PQ	0	0	0	0	85	40
736	D-Z	0	0	42	21	0	0
737	D-I	140	70	0	0	0	0
738	D-PQ	126	62	0	0	0	0
740	D-PQ	0	0	0	0	85	40
741	D-I	0	0	0	0	42	21
742	D-Z	8	4	85	40	0	0
744	D-PQ	42	21	0	0	0	0
Total		727	357	639	314	1091	530

Matrices de admitancia e impedancia de fase

Configuración 721

Z (R +jX) in ohms per mile
 0.2926 0.1973 0.0673 -0.0368 0.0337 -0.0417
 0.2646 0.1900 0.0673 -0.0368
 0.2926 0.1973

B in micro Siemens per mile
 159.7919 0.0000 0.0000
 159.7919 0.0000
 159.7919

Configuración 722

Z (R +jX) in ohms per mile
 0.4751 0.2973 0.1629 -0.0326 0.1234 -0.0607
 0.4488 0.2678 0.1629 -0.0326
 0.4751 0.2973

B in micro Siemens per mile
 127.8306 0.0000 0.0000
 127.8306 0.0000
 127.8306

Configuración 723

Z (R +jX) in ohms per mile
 1.2936 0.6713 0.4871 0.2111 0.4585 0.1521
 1.3022 0.6326 0.4871 0.2111
 1.2936 0.6713

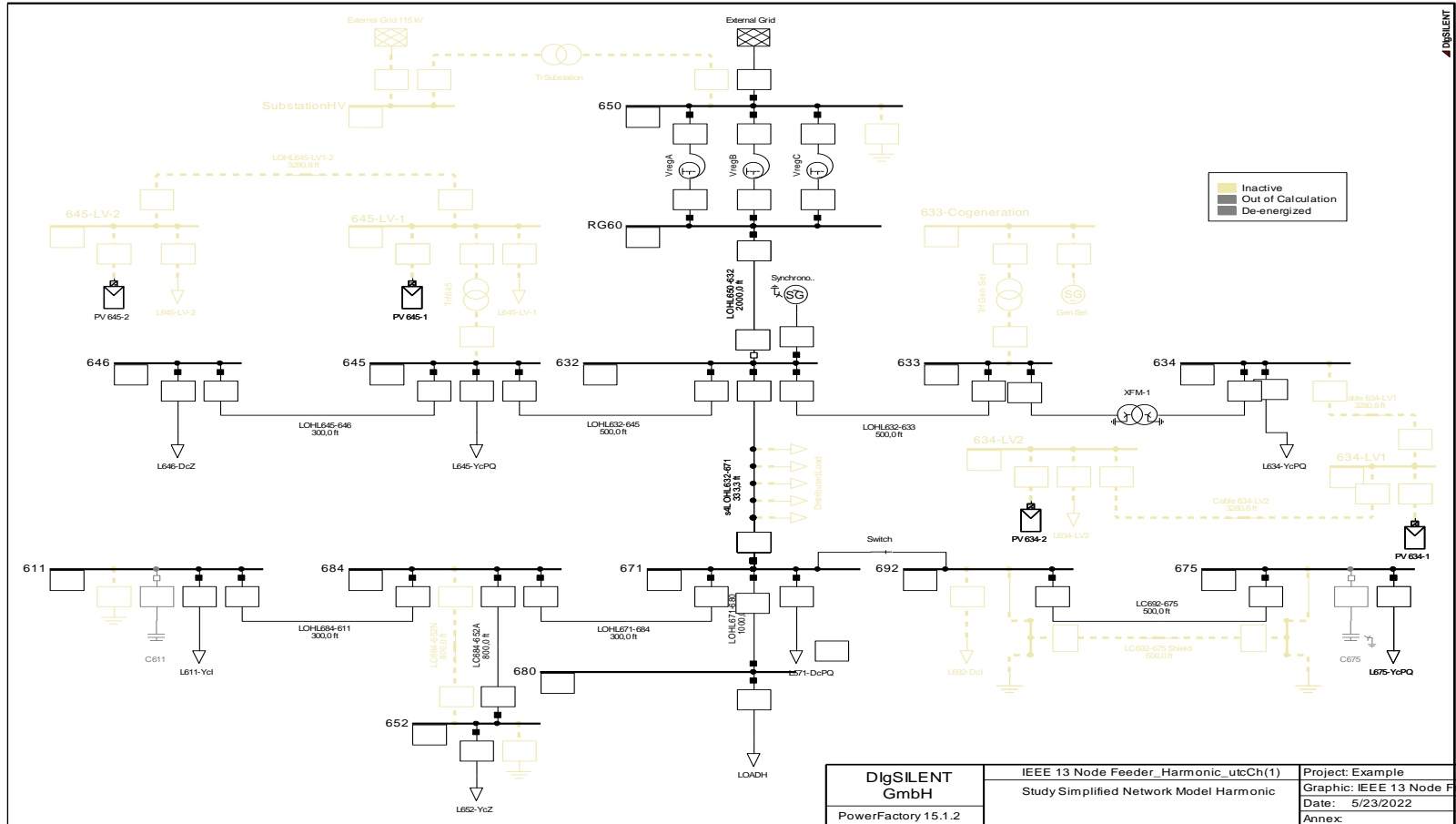
B in micro Siemens per mile
 74.8405 0.0000 0.0000
 74.8405 0.0000
 74.8405

Configuración 724

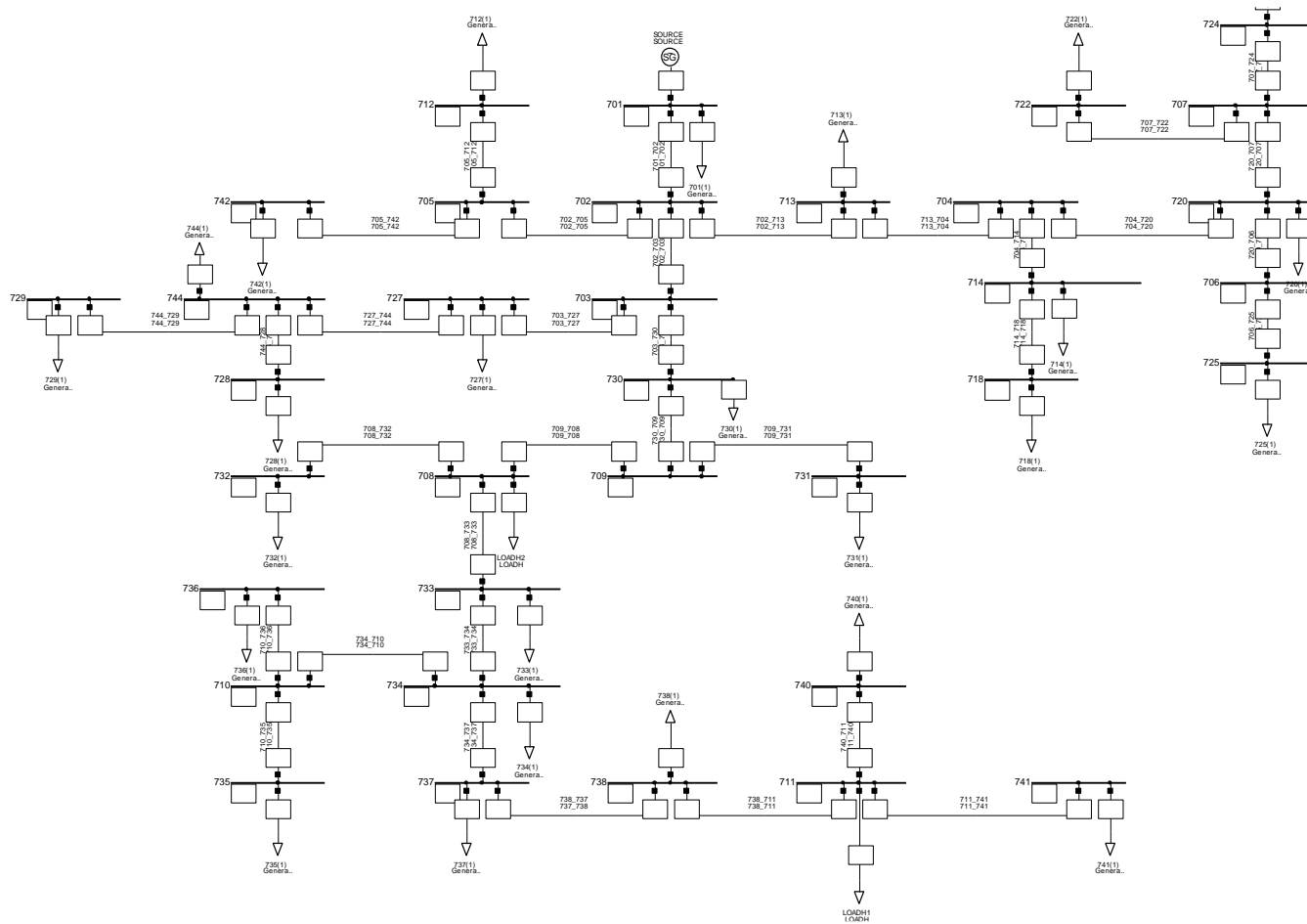
Z (R +jX) in ohms per mile
 2.0952 0.7758 0.5204 0.2738 0.4926 0.2123
 2.1068 0.7398 0.5204 0.2738
 2.0952 0.7758

B in micro Siemens per mile
 60.2483 0.0000 0.0000
 60.2483 0.0000

ANEXO 7: Diagrama del sistema de 13 nodos



ANEXO 8: Diagrama del sistema de 37 nodos



ANEXO 9: Código del programa PHYTON SIN FILTRO

1. Lectura de datos de la red `run_pf_armonico.py`

```
from pandas import read_excel
from numpy import array, zeros, ones, exp, angle, pi, conj, concatenate, sqrt, cos, sin,
transpose, arange, where
from scipy.sparse import csr_matrix as sparse
from Z012 import Z012
from num_interna import num_interna
from separ_fases import separ_fases
from ybus import ybus
from Sbus import Sbus
from newton_rapson import newton_rapson
from numpy import flatnonzero as find
from pandas import DataFrame
from barrido_frecuencia import barrido_frecuencia
from corrientes_armonicas import corrientes_armonicas
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def run_pf_armonico(red):
```

```
    print('-----')
    print('    UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI    ')
    print('    FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA    ')
    print('FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN ')
    print('ELABORADO POR: Cristian Ante y Cristian Ruiz')
    print('-----')

    ### LECTURA DE DATOS DE ENTRADA
    # BARRA SLACK
    slack = read_excel(red, sheetname='General') # MATRIZ LINEAS
    lineas = read_excel(red, sheetname='Topology') # MATRIZ PARAMETROS
    parametros = read_excel(red, sheetname='Configurations') # MATRIZ CARGAS
    cargas = read_excel(red, sheetname='Loads') # MATRIZ REGULADORES
    reguladores = read_excel(red, sheetname='Regulators') # MATRIZ
GENERADORES
    generadores = read_excel(red, sheetname='GD') # MATRIZ BARRAS
    barras_i = read_excel(red, sheetname='Graphic')
    espectro = read_excel(red, sheetname='Espectro_nl') # ESPECTRO NO LINEAL
    vbase = read_excel(red, sheetname='Vbase') # ESPECTRO NO LINEAL
    indices_l = read_excel(red, sheetname='Fases') # ESPECTRO NO LINEAL
```

```
### CALCULO MATRIZ IMPEDANCIAS Z012
```

```

Zabc = array(parametros)
lineas = array(lineas)
barras_i = array(barras_i)
cargas = array(cargas)
generadores = array(generadores)
vbase = array(vbase)
[R,X,B] = Z012(Zabc,lineas)
capacitores = -1*array(reguladores) # CAPACITORES SON NEGATIVOS
bus_cap = capacitores[:,0]
cap_a = capacitores[:,1]
cap_b = capacitores[:,2]
cap_c = capacitores[:,3]
nc = bus_cap.shape[0]
indices_1 = array(indices_1)
ila = indices_1[:,2]
ilb = indices_1[:,3]
ilc = indices_1[:,4]
ilfa = ila > 0
ilfb = ilb > 0
ilfc = ilc > 0

%% VALORES EN POR UNIDAD
mvabase = 1 # 1 MVA Potencia base
vbase = vbase[:,2]/sqrt(3)
Rpu = R / (vbase**2/(mvabase))
Xpu = X / (vbase**2/(mvabase))
Bpu = B*10**-6 / ((mvabase)/vbase**2)

%% MATRIZ BARRAS
barras = ones ((barras_i.shape[0],11))
barras[:,0] = barras_i[:,0]
barras[:,2:5] = barras_i[:,1:4]
ind_slack = (barras[:,0] == slack['Datos'].values[0]) # posición barra slack
barras[ind_slack,1] = 3
nb = barras.shape[0]
GS_A = 5 ; BS_A = 6 # Es adicional para el caso de capacitores en los nodos
GS_B = 7 ; BS_B = 8
GS_C = 9 ; BS_C = 10
barras[:,GS_A] = 0
barras[:,BS_A] = 0
barras[:,GS_B] = 0
barras[:,BS_B] = 0
barras[:,GS_C] = 0
barras[:,BS_C] = 0

```



```

%% CAPACITORES Y REACTORES
for i in range(nc):
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_A] = 0
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_A] = cap_a[i]/(mvabase*1000)
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_B] = 0
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_B] = cap_b[i]/(mvabase*1000)
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_C] = 0
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_C] = cap_c[i]/(mvabase*1000)

%% MATRIZ LINEAS
nl = lineas.shape[0]
rxb = ones((nl,10))
rxb[:,0:4] = lineas
rxb[:,4] = Rpu
rxb[:,5] = Xpu
rxb[:,6] = Bpu/2 ##BC/2
lineas = rxb
red = {'bus': barras, 'branch': lineas, 'gen': generadores, 'load': cargas }

%% RENUMERACIÓN INTERNA
red = num_interna(red);
barras = red['bus']; lineas = red['branch']; generadores = red['gen']; cargas =
red['load']
bus_num = barras[:,0]

%% SEPARACIÓN DE FASES
[lineas_a, lineas_b,
lineas_c, barras_a, barras_b, barras_c, cargas_a, cargas_b, cargas_c] = separ_fases
(lineas, barras, cargas)

red_a = {'bus': barras_a, 'branch': lineas_a, 'gen': generadores, 'load': cargas_a }
red_b = {'bus': barras_b, 'branch': lineas_b, 'gen': generadores, 'load': cargas_b }
red_c = {'bus': barras_c, 'branch': lineas_c, 'gen': generadores, 'load': cargas_c }
BUS_I = 0
iva = red_a['bus'][:, BUS_I].copy()
ivb = red_b['bus'][:, BUS_I].copy()
ivc = red_c['bus'][:, BUS_I].copy()

%% RENUMERACION DE NODOS
red_a = num_interna(red_a)
red_b = num_interna(red_b)
red_c = num_interna(red_c)
barras_a = red_a['bus']; lineas_a = red_a['branch']; cargas_a = red_a['load']
barras_b = red_b['bus']; lineas_b = red_b['branch']; cargas_b = red_b['load']
barras_c = red_c['bus']; lineas_c = red_c['branch']; cargas_c = red_c['load']

```

```

barras_b[:,5] = barras_b[:,7]
barras_b[:,6] = barras_b[:,8]
barras_c[:,5] = barras_c[:,9]
barras_c[:,6] = barras_c[:,10]

%%% FORMACIÒN DE LA MATRIZ YBARRA
[Ybus_a, Yfa, Yta, Cfa, Cta] = ybus ( mvabase,barras_a, lineas_a)
[Ybus_b, Yfb, Ytb, Cfb, Ctb] = ybus ( mvabase,barras_b, lineas_b)
[Ybus_c, Yfc, Ytc, Cfc, Ctc] = ybus ( mvabase,barras_c, lineas_c)

%%% INICIO ALGORITMO FLUJO DE POTENCIA
nba = barras_a.shape[0]
nbb = barras_b.shape[0]
nbc = barras_c.shape[0]
Va = ones((nba,1))*exp(1j*0)
Vb = ones((nbb,1))*exp(1j*0)
Vc = ones((nbc,1))*exp(1j*0)

vslack_a = slack['Datos'].values[4]
vslack_b = slack['Datos'].values[5]
vslack_c = slack['Datos'].values[6]

%%% INDICES PARA BARRAS PV, PQ Y SLACK
PQ = 1 ; PV = 2 ; REF = 3; BUS_TYPE = 1
ref_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
pv_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
pq_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices

ref_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
pv_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
pq_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices

ref_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
pv_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
pq_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices

Va[ref_a,:] = vslack_a + 1j*0
Vb[ref_b,:] = vslack_b + 1j*0
Vc[ref_c,:] = vslack_c + 1j*0

%%% FLUJO DE POTENCIA A FRECUENCIA FUNDAMENTAL
Sbus_a = Sbus(mvabase, barras_a, generadores , cargas_a, Va)
Sbus_b = Sbus(mvabase, barras_b, generadores , cargas_b, Vb)
Sbus_c = Sbus(mvabase, barras_c, generadores , cargas_c, Vc)

```

```

    Va, converged_a, i_a = newton_rapson(Ybus_a, Sbus_a, Va.ravel(), ref_a, pv_a,
pq_a, mvabase, barras_a, generadores , cargas_a)
    Vb, converged_b, i_b = newton_rapson(Ybus_b, Sbus_b, Vb.ravel(), ref_b, pv_b,
pq_b, mvabase, barras_b, generadores , cargas_b)
    Vc, converged_c, i_c = newton_rapson(Ybus_c, Sbus_c, Vc.ravel(), ref_c, pv_c,
pq_c, mvabase, barras_c, generadores , cargas_c)

```

```

%% IMPRESION DE RESULTADOS FLUJOS DE POTENCIA

```

```

    Vma = zeros(nb) ; Vaa = zeros(nb) ; Vmb = zeros(nb) ; Vab = zeros(nb); Vmc =
zeros(nb) ; Vac = zeros(nb)
    Vma[iva.astype(int)] = abs(Va)
    Vaa[iva.astype(int)] = angle(Va)*180/pi
    Vmb[ivb.astype(int)] = abs(Vb)
    Vab[ivb.astype(int)] = angle(Vb)*180/pi -120
    Vmc[ivc.astype(int)] = abs(Vc)
    Vac[ivc.astype(int)] = angle(Vc)*180/pi + 120
    print()
    print('FLUJO DE POTENCIA NEWTON RAPSHON ')
    voltajes ={'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '2.Va[pu]': Vma, '3.Vang_a[°]': Vaa,
'4.Vb[pu]': Vmb, '5.Vang_b[°]': Vab, '6.Vc[pu]': Vmc, '7.Vang_c[°]': Vac }
    resultados = DataFrame(voltajes)
    print(resultados)

```

```

%% FLUJOS DE POTENCIA ARMONICOS

```

```

%% BARRIDO DE FRECUENCIA

```

```

    I_espec = array(espectro)
    icnln_a = cargas_a[:,9]
    icnln_b = cargas_b[:,7]
    icnln_c = cargas_c[:,5]
    orden = I_espec[:,0]
    Ybarr_a, Yf_freq_a, Yt_freq_a, Ybush_a = barrido_frecuencia(barras_a, lineas_a,
generadores, orden, Va, cargas_a, Cfa, Cta, mvabase,icnln_a)
    Ybarr_b, Yf_freq_b, Yt_freq_b, Ybush_b = barrido_frecuencia(barras_b, lineas_b,
generadores, orden, Vb, cargas_b, Cfb, Ctb, mvabase,icnln_b)
    Ybarr_c, Yf_freq_c, Yt_freq_c, Ybush_c = barrido_frecuencia(barras_c, lineas_c,
generadores, orden, Vc, cargas_c, Cfc, Ctc, mvabase,icnln_c)

```

```

%% LAZO PARA VARIAS CARGAS ARMÓNICAS

```

```

    nespec = sum(cargas[:,9])

    PD =3 ; QD = 4
    ind_nln_a = cargas_a[:,0]
    Vaar = Va[ind_nln_a.astype(int)]
    Sca = (cargas_a[:,PD] + 1j*cargas_a[:,QD])/(1000*mvabase)
    # print(cargas_a)

```

```

# print(Vaar)
# I_ffa = conj(Sca / Vaar)
# print(I_ffa)

if nespec < 2:
    #%% CORRIENTES DE INYECCION FRECUENCIA FUNDAMENTAL,
    ARMONICA Y VOLTAJES ARMONICOS
    spectrum = array(espectro)
    Ia, Ifa, Vha = corrientes_armonicas(barras_a,
    cargas_a,spectrum,Va,Ybarr_a,mvabase,icnln_a,Ybush_a)
    Ib, Ifb, Vhb = corrientes_armonicas(barras_b,
    cargas_b,spectrum,Vb,Ybarr_b,mvabase,icnln_b,Ybush_b)
    Ic, Ifc, Vhc = corrientes_armonicas(barras_c,
    cargas_c,spectrum,Vc,Ybarr_c,mvabase,icnln_c,Ybush_c)

    THD_fa = 1/abs(Va) * sqrt(sum((abs(Vha)**2)))*100
    THD_fb = 1/abs(Vb) * sqrt(sum((abs(Vhb)**2)))*100
    THD_fc = 1/abs(Vc) * sqrt(sum((abs(Vhc)**2)))*100

    If_f_a = Ybus_a @ Va
    If_f_b = Ybus_b @ Vb
    If_f_c = Ybus_c @ Vc

# print('El contenido Armónico en corriente por cada rama y en cada fase es: ')
    THD_Ia = 1/abs(If_f_a) * sqrt(sum((abs(Ifa)**2)))*100
    THD_Ib = 1/abs(If_f_b) * sqrt(sum((abs(Ifb)**2)))*100
    THD_Ic = 1/abs(If_f_c) * sqrt(sum((abs(Ifc)**2)))*100

else:
    espectro = array(espectro);
    orden1 = espectro[:,0]
    orden2 = espectro[:,3]
    orden3 = espectro[:,6]
    I_espec1 = espectro[:,0:3]
    I_espec2 = espectro[:,3:6]
    I_espec3 = espectro[:,6:9]
    icnln_ta = cargas_a[:,9]
    icnln_tb = cargas_b[:,7]
    icnln_tc = cargas_c[:,5]
    icnln_a = where(icnln_ta==1)
    icnln_b = where(icnln_tb==1)
    icnln_c = where(icnln_tc==1)
    ncnln_a = sum(icnln_ta)
    ncnln_b = sum(icnln_tb)
    ncnln_c = sum(icnln_tc)

```

```

ind_nln_a = zeros(icnln_ta.shape[0]);
ind_nln_b = zeros(icnln_tb.shape[0]);
ind_nln_c = zeros(icnln_tc.shape[0]);
nba = barras_a.shape[0]
nbb = barras_b.shape[0]
nbc = barras_c.shape[0]
THD_fa = zeros(nba)
THD_fb = zeros(nbb)
THD_fc = zeros(nbc)
THD_Ia = zeros(nba)
THD_Ib = zeros(nbb)
THD_Ic = zeros(nbc)

for i in range(ncnln_a.astype(int)):
    icnln_a = array(icnln_a)
    ind_nln_a[icnln_a[0,i]] = 1
    orden_c = cargass_a[:,10]
    num_orden = orden_c[icnln_a[0,i]]

    if num_orden == 1:
        orden = orden1
        spectrum = I_espec1
    elif num_orden == 2:
        orden = orden2
        spectrum = I_espec2
    else:
        orden = orden3
        spectrum = I_espec3
    Ybarr_a, Yf_freq_a, Yt_freq_a, Ybush = barrido_frecuencia(barras_a,
lineas_a, generadores, orden, Va, cargass_a, Cfa, Cta, mvabase, ind_nln_a)
    Ia, Ifa, Vha = corrientes_armonicass(barras_a,
cargass_a, spectrum, Va, Ybarr_a, mvabase, ind_nln_a, Ybush_a)
    ind_nln_a = zeros(icnln_ta.shape[0])
    THD_a = 1/abs(Va) * sqrt(sum((abs(Vha)**2)))*100
    THD_fa = THD_a + THD_fa
    If_f_a = Ybus_a @ Va
#     print(abs(Ifa))
    Iharmo_a = sqrt(sum((abs(Ifa)**2)))
#     print(abs(I_ffa))
#     print(Iharmo_a)
#     THD_ia = (1/abs(I_ffa)) * Iharmo_a [ind_nln_a.astype(int)]
    THD_ia = (1/abs(If_f_a)) * Iharmo_a *100
    THD_Ia = THD_ia + THD_Ia

for i in range(ncnln_b.astype(int)):

```

```

icnln_b = array(icnln_b)
ind_nln_b[icnln_b[0,i]] = 1
orden_c = cargas_b[:,8]
num_orden = orden_c[icnln_b[0,i]]

if num_orden == 1:
    orden = orden1
    spectrum = I_espec1
elif num_orden == 2:
    orden = orden2
    spectrum = I_espec2
else:
    orden = orden3
    spectrum = I_espec3
Ybarr_b, Yf_freq_b, Yt_freq_b, Ybush = barrido_frecuencia(barras_b,
lineas_b, generadores, orden, Vb, cargas_b, Cfb, Ctb, mvabase, ind_nln_b)
Ib, Ifb, Vhb = corrientes_armonicas(barras_b,
cargas_b, spectrum, Vb, Ybarr_b, mvabase, ind_nln_b, Ybush_b)
ind_nln_b = zeros(icnln_b.shape[0])
THD_b = 1/abs(Vb) * sqrt(sum((abs(Vhb)**2)))*100
THD_fb = THD_b + THD_fb
If_f_b = Ybus_b @ Vb
THD_ib = 1/abs(If_f_b) * sqrt(sum((abs(Ifb)**2)))*100
THD_Ib = THD_ib + THD_Ib

for i in range(ncnln_c.astype(int)):
    icnln_c = array(icnln_c)
    ind_nln_c[icnln_c[0,i]] = 1
    orden_c = cargas_c[:,6]
    num_orden = orden_c[icnln_c[0,i]]

    if num_orden == 1:
        orden = orden1
        spectrum = I_espec1
    elif num_orden == 2:
        orden = orden2
        spectrum = I_espec2
    else:
        orden = orden3
        spectrum = I_espec3
    Ybarr_c, Yf_freq_c, Yt_freq_c, Ybush = barrido_frecuencia(barras_c,
lineas_c, generadores, orden, Vc, cargas_c, Cfc, Ctc, mvabase, ind_nln_c)
    Ic, Ifc, Vhc = corrientes_armonicas(barras_c,
cargas_c, spectrum, Vc, Ybarr_c, mvabase, ind_nln_c, Ybush_c)

```

```

ind_nln_c = zeros(icnln_tc.shape[0])
THD_c = 1/abs(Vc) * sqrt(sum((abs(Vhc)**2)))*100
THD_fc = THD_c + THD_fc
If_f_c = Ybus_c @ Vc
THD_ic = 1/abs(If_f_c) * sqrt(sum((abs(Ifc)**2)))*100
THD_Ic = THD_ic + THD_Ic

### IMPRESION DE RESULTADOS FLUJOS DE POTENCIA ARMONICOS
nba = barras_a.shape[0]
print()

### CONTENIDO ARMONICO THD VOLTAJES %
print()
print('FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO ')
print('El contenido Armónico en voltajes por cada fase y en cada barra es: ')
print()
THDa = zeros(nb)
THDb = zeros(nb)
THDc = zeros(nb)
THDa[iva.astype(int)] = THD_fa
THDb[ivb.astype(int)] = THD_fb
THDc[ivc.astype(int)] = THD_fc
THD = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '3.Thd_Va[%]': THDa, '4.Thd_Vb[%]': THDb,
'5.Thd_Vc[%]': THDc}
thdv = DataFrame(THD)
Vha[0,:] = Va;
Vhb[0,:] = Vb;
Vhc[0,:] = Vc;
Vhta = zeros((8,nb))
Vhtb = zeros((8,nb))
Vhtc = zeros((8,nb))
anga = zeros((8,nb))
angb = zeros((8,nb))
angc = zeros((8,nb))
Vhta[:,iva.astype(int)] = abs(Vha)
Vhtb[:,ivb.astype(int)] = abs(Vhb)
Vhtc[:,ivc.astype(int)] = abs(Vhc)
anga[:,iva.astype(int)] = angle(Vha)*180/pi
angb[:,ivb.astype(int)] = angle(Vhb)*180/pi
angc[:,ivc.astype(int)] = angle(Vhc)*180/pi
voltajes_h_mod = {'Bus': list(barras_i[:,0]),'V_Harmonicos_fa':
transpose(abs(Vhta)), 'V_Harmonicos_fb': transpose(abs(Vhtb)), 'V_Harmonicos_fc':
transpose(abs(Vhtc))}
voltajes_h_angle = {'Bus': list(barras_i[:,0]),'Ang_Harmonicos_fa': transpose(anga),
'Ang_Harmonicos_fb': transpose(angb), 'Ang_Harmonicos_fc': transpose(angc)}

```

```

    vol_harmonics_a = V_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.V_f_a':
transpose(abs(Vhta[0,:])),
    '2.V_fa_3': transpose(abs(Vhta[1,:])), '3.V_fa_5':
transpose(abs(Vhta[2,:])),
    '3.V_fa_7': transpose(abs(Vhta[3,:]))}
    vol_harmonics_b = V_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.V_f_b':
transpose(abs(Vhtb[0,:])),
    '2.V_fb_3': transpose(abs(Vhtb[1,:])), '3.V_fb_5':
transpose(abs(Vhtb[2,:])),
    '3.V_fb_7': transpose(abs(Vhtb[3,:]))}
    vol_harmonics_c = V_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.V_f_c':
transpose(abs(Vhtc[0,:])),
    '2.V_fc_3': transpose(abs(Vhtc[1,:])), '3.V_fc_5':
transpose(abs(Vhtc[2,:])),
    '3.V_fc_7': transpose(abs(Vhtc[3,:]))}
    vol_harmonics_a = DataFrame(vol_harmonics_a)
    vol_harmonics_b = DataFrame(vol_harmonics_b)
    vol_harmonics_c = DataFrame(vol_harmonics_c)

```

```

print(thdv)

```

```

%% CONTENIDO ARMONICO THD CORRIENTES %

```

```

# CORRIENTES FUNDAMENTALES

```

```

Ihar_fa = Ybarr_a[1] @ Vha[1,:]

```

```

Ife_a = Yfa @ Va

```

```

Ife_b = Yfb @ Vb

```

```

Ife_c = Yfc @ Vc

```

```

Ife_a_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

```

```

Ife_b_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

```

```

Ife_c_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

```

```

Ife_a_t[ilfa] = Ife_a

```

```

Ife_b_t[ilfb] = Ife_b*exp(-1j*2*pi/3)

```

```

Ife_c_t[ilfc] = Ife_c*exp(1j*2*pi/3)

```

```

In = Ife_a_t + Ife_b_t + Ife_c_t

```

```

Ibase = mvabase / (sqrt(3)*vbase[0])

```

```

Ifa[0,:] = If_f_a;

```

```

Ifb[0,:] = If_f_b;

```

```

Ifc[0,:] = If_f_c;

```

```

Ihta = zeros((8,nb))

```

```

Ihtb = zeros((8,nb))

```

```

Ihtc = zeros((8,nb))

```

```

Ianga = zeros((8,nb))

```



```

Iangb = zeros((8,nb))
Iangc = zeros((8,nb))
Ihta[:,iva.astype(int)] = abs(Ifa)
Ihtb[:,ivb.astype(int)] = abs(Ifb)
Ihtc[:,ivc.astype(int)] = abs(Ifc)
Ianga[:,iva.astype(int)] = angle(Ifa)*180/pi
Iangb[:,ivb.astype(int)] = angle(Ifb)*180/pi
Iangc[:,ivc.astype(int)] = angle(Ifc)*180/pi
I_h_mod = {'Bus': list(barras_i[:,0]),'I_Harmonicos_fa': transpose(abs(Ihta)),
'I_Harmonicos_fb': transpose(abs(Ihtb)), 'I_Harmonicos_fc': transpose(abs(Ihtc))}
I_h_angle = {'Bus': list(barras_i[:,0]),'AngI_Harmonicos_fa': transpose(Ianga),
'AngI_Harmonicos_fb': transpose(Iangb), 'AngI_Harmonicos_fc': transpose(Iangc)}
corrientes_harmonics_a = I_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.I_f_a':
transpose(abs(Ihta[0,:])),
'2.I_fa_3': transpose(abs(Ihta[1,:])), '3.I_fa_5':
transpose(abs(Ihta[2,:])),
'3.I_fa_7': transpose(abs(Ihta[3,:]))}
corrientes_harmonics_b = I_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.I_f_b':
transpose(abs(Ihtb[0,:])),
'2.I_fb_3': transpose(abs(Ihtb[1,:])), '3.I_fb_5':
transpose(abs(Ihtb[2,:])),
'3.I_fb_7': transpose(abs(Ihtb[3,:]))}
corrientes_harmonics_c = I_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.I_f_c':
transpose(abs(Ihtc[0,:])),
'2.I_fc_3': transpose(abs(Ihtc[1,:])), '3.I_fc_5':
transpose(abs(Ihtc[2,:])),
'3.I_fc_7': transpose(abs(Ihtc[3,:]))}
corrientes_harmonics_a = DataFrame(corrientes_harmonics_a)
corrientes_harmonics_b = DataFrame(corrientes_harmonics_b)
corrientes_harmonics_c = DataFrame(corrientes_harmonics_c)

# print(THD_Ia)
THDia = zeros(nb)
THDib = zeros(nb)
THDic = zeros(nb)
THDia[iva.astype(int)] = THD_Ia
THDib[ivb.astype(int)] = THD_Ib
THDic[ivc.astype(int)] = THD_Ic
print()
print('El contenido Armónico de corriente por cada fase y en cada barra es: ')
print()
THDi = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '3.Thd_Ia[%]': THDia, '4.Thd_Ib[%]': THDib,
'5.Thd_Ic[%]': THDic}
thdi = DataFrame(THDi)
print(thdi)

```

```

corrientes_fase ={'1.Bus_e': list(lineas[:,0]), '2.Bus_r': list(lineas[:,1]),
'3.If_a_m[pu]': abs(Ife_a_t), '4.If_a_ang[pu]': angle(Ife_a_t)*180/pi,
                  '5.If_b_m[pu]': abs(Ife_b_t), '6.If_b_ang[pu]': angle(Ife_b_t)*180/pi,
'7.If_c_m[pu]': abs(Ife_c_t), '8.If_c_ang[pu]': angle(Ife_c_t)*180/pi,
                  '9.In_m[pu]': abs(In), '10.In_ang[pu]': angle(In)*180/pi}
corrientes_fase = DataFrame(corrientes_fase)

```

```

%% GRAFICO DE RESULTADOS

```

```

nba = barras_a.shape[0]
y = arange(nba)

```

```

fig1,ax1 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDa)
ax1.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE A')
ax1.set_xlabel("Barra")
ax1.set_ylabel("THDv [%]")
plt.show()

```

```

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDia)
ax2.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE A')
ax2.set_xlabel("Barra")
ax2.set_ylabel("THDi [%]")
plt.show()

```

```

fig3,ax3 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDb)
ax3.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE B')
ax3.set_xlabel("Barra")
ax3.set_ylabel("THDv [%]")
plt.show()

```

```

fig4, ax4 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDib)
ax4.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE B')
ax4.set_xlabel("Barra")
ax4.set_ylabel("THDi [%]")
plt.show()

```

```

fig5,ax5 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDc)
ax5.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE C')
ax5.set_xlabel("Barra")

```

```

ax5.set_ylabel("THDv [%]")
plt.show()

fig6, ax6 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDic)
ax6.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE C')
ax6.set_xlabel("Barra")
ax6.set_ylabel("THDi [%]")
plt.show()

#Ybarr_a
return voltajes_h_mod, voltajes_h_angle,I_h_mod, I_h_angle,thdv,thdi,resultados,
corrientes_fase,Ybarr_a,Ybarr_b,Ybarr_c, corrientes_harmonics_a,
corrientes_harmonics_b, corrientes_harmonics_c,
vol_harmonics_a,vol_harmonics_b,vol_harmonics_c

```

2. Calcular la matriz de secuencia Z012. Z012.py

```

from numpy import zeros, hstack, array, sqrt, transpose, concatenate, diagonal,
append, asmatrix, delete

```

```

def Z012(zabc,lineas):

    ## Cálculo de la matriz de secuencia 012
    nl = lineas.shape[0]
    Z012 = zeros((2,3))
    B012 = zeros((2,3))

    ## Caso monofásico
    for i in range(nl):
        m = lineas[i,3]-1
        if sum(zabc[m,2:8]==0)> 3:
            z012_diag = zeros((3,1))
            Z11 = array(zabc[m,2]+1j*zabc[m,8])
            if abs(Z11) != 0:
                z012_diag = array([0 ,Z11, 0])
            Z22 = array(zabc[m,5]+1j*zabc[m,11])
            if abs(Z22) != 0:
                z012_diag = array([0 ,Z22, 0])
            Z33 = array(zabc[m,7]+1j*zabc[m,13])
            if abs(Z33) != 0:

```

```

    z012_diag = array([0 ,Z33, 0])
    z012_diag = asmatrix(z012_diag)
    Z012 = append(Z012, array(z012_diag), axis = 0)

```

```

## Caso bifásico
elif sum(zabc[m,2:8]==0) == 3:
    Z11 = zabc[m,2]+1j*zabc[m,8]
    Z12 = zabc[m,3]+1j*zabc[m,9]
    Z21 = Z12
    Z22 = zabc[m,5]+1j*zabc[m,11]
    Z23 = zabc[m,6]+1j*zabc[m,12]
    Z33 = zabc[m,7]+1j*zabc[m,13]
    Z32 = Z23
    Z31 = zabc[m,4]+1j*zabc[m,10]
    Z0 = Z11 + 2 * Z12
    Z1 = Z22 - Z21- Z23
    Z2 = Z33 - Z32 - Z31
    Z0 = array(Z0)
    Z1 = array(Z1)
    Z2 = array(Z2)
    if abs(Z1) == 0:
        Z1 = Z2
    z012_diag = asmatrix(array([Z0,Z1,Z2]))
    Z012 = append(Z012, array(z012_diag), axis = 0)

```

```

else:
    ## Caso trifásico
    Z11 = zabc[m,2]+1j*zabc[m,8]
    Z12 = zabc[m,3]+1j*zabc[m,9]
    Z13 = zabc[m,4]+1j*zabc[m,10]
    Z21 = Z12
    Z22 = zabc[m,5]+1j*zabc[m,11]
    Z23 = zabc[m,6]+1j*zabc[m,12]
    Z31 = Z13
    Z32 = Z23
    Z33 = zabc[m,7]+1j*zabc[m,13]
    Zf1 = array([Z11, Z12, Z13])
    Zf2 = array([Z21, Z22, Z23])
    Zf3 = array([Z31, Z32, Z33])
    Zabc = array([Zf1, Zf2, Zf3])
    a = -0.5+ 1j*(sqrt(3)/2)
    As= asmatrix(array([[ 1, 1, 1],[ 1, a**2, a], [ 1, a, a**2]]))
    Asinv=asmatrix((1/3)*array([[ 1, 1, 1],[ 1, a, a**2],[ 1, a**2, a]]))
    z012=Asinv@Zabc@As #

```

```

z012_diag = asmatrix(z012.diagonal())
Z012 = append(Z012, array(z012_diag), axis = 0)

Z012 = delete(Z012, (0), axis=0)
Z012 = delete(Z012, (0), axis=0)

## Caso monofásico
for i in range(nl):
    m = lineas[i,3]-1
    if sum(zabc[m,2:8]==0)> 3:
        b012_diag = zeros((3,1))
        B11 = 1j*zabc[m,14]
        if abs(B11) != 0:
            b012_diag = array([0 ,B11, 0])
        B22 = 1j*zabc[m,17]
        if abs(B22) != 0:
            b012_diag = array([0 ,B22, 0])
        B33 = 1j*zabc[m,19]
        if abs(B33) != 0:
            b012_diag = array([0 ,B33, 0])
        b012_diag = asmatrix(b012_diag)
        B012 = append(B012, array(b012_diag), axis = 0)

## Caso bifásico
elif sum(zabc[m,2:8]==0) == 3:
    B11 = 1j*zabc[m,14]
    B12 = 1j*zabc[m,15]
    B21 = B12
    B22 = 1j*zabc[m,17]
    B23 = 1j*zabc[m,18]
    B33 = 1j*zabc[m,19]
    B32 = B23
    B31 = 1j*zabc[m,16]
    B0 = B11 + 2* B12
    B1 = B22 - B21- B23
    B2 = B33 - B32 - B31
    B0 = array(B0)
    B1 = array(B1)
    B2 = array(B2)
    if abs(B1) == 0:
        B1 = B2
    b012_diag = asmatrix(array([B0,B1,B2]))
    B012 = append(B012, array(b012_diag), axis = 0)
else:
    ## Caso trifásico

```

```

B11 = 1j*zabc[m,14]
B12 = 1j*zabc[m,15]
B13 = 1j*zabc[m,16]
B21 = B12
B22 = 1j*zabc[m,17]
B23 = 1j*zabc[m,18]
B31 = B13
B32 = B23
B33 = 1j*zabc[m,19]
Bf1 = array([B11, B12, B13])
Bf2 = array([B21, B22, B23])
Bf3 = array([B31, B32, B33])
Babc = array([Bf1, Bf2, Bf3])

a = -0.5+ 1j*(sqrt(3)/2)
As= asmatrix(array([[ 1, 1, 1],[ 1, a**2, a], [ 1, a, a**2]]))
Asinv=asmatrix((1/3)*array([[ 1, 1, 1],[ 1, a, a**2],[ 1, a**2, a]]))
b012=Asinv*Babc*As
b012_diag = asmatrix(b012.diagonal())
B012 = append(B012, array(b012_diag), axis = 0)

B012 = delete(B012, (0), axis=0)
B012 = delete(B012, (0), axis=0)
R = (Z012[:,1].real)*(lineas[:,2]/5280)
X = (Z012[:,1].imag)*(lineas[:,2]/5280)
B = (B012[:,1].imag)*(lineas[:,2]/5280)

return R, X, B

```

3. Remuneración interna de nodos num_interna.py

```

import sys
from copy import deepcopy
from numpy import array, zeros, argsort, arange
from numpy import flatnonzero as find
from scipy.sparse import csr_matrix as sparse
from idx_bus import PQ, PV, REF, NONE, BUS_I, BUS_TYPE
from idx_gen import GEN_BUS, GEN_STATUS
from idx_brch import F_BUS, T_BUS, BR_STATUS

def num_interna(red):

```

```

red = deepcopy(red)
%%% Creación del diccionario de numeración interna
num_int = {
    'ext':  { 'bus':  None, 'branch':  None, 'gen':  None, 'load':
None },
    'bus':  { 'interno':  None, 'externa':  None, 'status':  { } },
    'gen':  { 'interno':  None, 'externa':  None, 'status':  { } },
    'branch':  { 'status':  { } }
}

%%% Número de barras y generadores
nb = red["bus"].shape[0]
ng = red["gen"].shape[0]

%%% Verificación que todas las barras tengan definido el tipo de barra; NONE = 4
bt = red["bus"][:, BUS_TYPE]
err = find(~((bt == PQ) | (bt == PV) | (bt == REF) | (bt == NONE)))
if len(err) > 0:
    sys.stderr.write('ext2int: bus %d has an invalid BUS_TYPE\n' % err)

%%% Matriz dispersa numeracion interna
n2i = sparse((range(nb), (red["bus"][:, BUS_I], zeros(nb))),
shape=(max(red["bus"][:, BUS_I].astype(int)) + 1, 1))
n2i = array( n2i.todense().flatten() )[0, :] # se forma un array de 1 fila

%%% Determinación de barras en servicio.
bs = (bt != NONE) ## Genera un array de 1 y 0 , se tiene la
condición cero para barras aisladas
num_int["bus"]["status"]["on"] = find( bs ) #retorna indices que no son ceros
(disponibles)
num_int["bus"]["status"]["off"] = find( ~bs ) #retorna indices que son ceros
(indisponibles)

%%% Determinación de generadores en servicio.
gs = ( (red["gen"][:, GEN_STATUS] > 0) & bs[ n2i[red["gen"][:,
GEN_BUS].astype(int)] ] ) #gen status y gen insolated
m = bs[ n2i[red["gen"][:, GEN_BUS].astype(int)] ]
num_int["gen"]["status"]["on"] = find( gs )
num_int["gen"]["status"]["off"] = find( ~gs )

%%% Determinación de ramas en servicio. branch estatus y branch insolated
brs = (( red["branch"][:, BR_STATUS] > 0) & bs[n2i[red["branch"][:,
F_BUS].astype(int)]] & bs[n2i[red["branch"][:, T_BUS].astype(int)]] )
num_int["branch"]["status"]["on"] = find( brs )
num_int["branch"]["status"]["off"] = find( ~brs )

```

```

%% Numero final de barras
nb = red["bus"].shape[0]

%% Numeración interna consecutiva para barras, ramas y generadores
num_int["bus"]["externa"] = red["bus"][:, BUS_I].copy() #Copiar
numeración externa
num_int["bus"]["interno"] = zeros(max(num_int["bus"]["externa"]).astype(int) +
1) #Creación de un vector de ceros para la numeracion interna

num_int["bus"]["interno"][num_int["bus"]["externa"].astype(int)] = arange(nb)
#
red["bus"][:, BUS_I] = num_int["bus"]["interno"][ red["bus"][:, BUS_I].astype(int)
].copy() #Poblacion de numeración interna en barras

%% Numeración interna consecutiva para cargas
red["load"][:, 0] = num_int["bus"]["interno"][ red["load"][:, 0].astype(int) ].copy()
#Poblacion de numeración interna en cargas

%% Numeración interna consecutiva para generadores
red["gen"][:, GEN_BUS] = num_int["bus"]["interno"][ red["gen"][:,
GEN_BUS].astype(int) ].copy() #Poblacion de numeración interna en generadores

%% Numeración interna consecutiva para ramas
red["branch"][:, F_BUS] = num_int["bus"]["interno"][ red["branch"][:,
F_BUS].astype(int) ].copy() #Poblacion de numeración interna en ramas
red["branch"][:, T_BUS] = num_int["bus"]["interno"][ red["branch"][:,
T_BUS].astype(int) ].copy() #Poblacion de numeración interna en ramas

%% Reordenamiento de generadores en forma ascendente
num_int["gen"]["interno"] = argsort(red["gen"][:, GEN_BUS]) #Indices de
ordenamiento interno
red["gen"] = red["gen"][num_int["gen"]["interno"].astype(int), :] # Ordenamiento
con los indices calculados

num_int["gen"]["externa"] = argsort(num_int["gen"]["interno"]) #Indices de
ordenamiento externo

return red

```

4. Calcular matriz de admitancia por cada fase ybus.py


```

from sys import stderr
from numpy import ones, conj, nonzero, any, exp, pi, r_, asarray
from scipy.sparse import csr_matrix
from idx_bus import BUS_I, GS, BS
from idx_brch import F_BUS, T_BUS, BR_R, BR_X, BR_B, SHIFT, TAP

def ybus(baseMVA, bus, branch):
    """
    """
    branch = asarray(branch)

    nb = bus.shape[0]    ## number of buses
    nl = branch.shape[0] ## number of lines

    if any(bus[:, BUS_I] != list(range(nb))):
        stderr.write('Deben estar enumerados los nodos en orden\n')

    Ys = 1 / (branch[:, BR_R] + 1j * branch[:, BR_X]) ## series admittance
    Bc = branch[:, BR_B]    ## line charging susceptance
    tap = ones(nl)         ## default tap ratio = 1
    i = nonzero(branch[:, TAP]) ## indices of non-zero tap ratios
    tap[i] = branch[i, TAP] ## assign non-zero tap ratios
    tap = tap * exp(1j * pi / 180 * branch[:, SHIFT]) ## add phase shifters

    Ytt = Ys + 1j * Bc / 2
    Yff = Ytt / (tap * conj(tap))
    Yft = - Ys / conj(tap)
    Ytf = - Ys / tap

    ## vector of shunt admittances
    # Ysh = (bus[:, GS] + 1j * bus[:, BS]) / baseMVA
    Ysh = (bus[:, GS] + 1j * bus[:, BS])

    ## build connection matrices
    f = branch[:, F_BUS]    ## list of "from" buses
    t = branch[:, T_BUS]    ## list of "to" buses
    ## connection matrix for line & from buses
    Cf = csr_matrix((ones(nl), (range(nl), f)), (nl, nb))

    ## connection matrix for line & to buses
    Ct = csr_matrix((ones(nl), (range(nl), t)), (nl, nb))
    i = r_[range(nl), range(nl)] ## double set of row indices

```

```

Yf = csr_matrix((r_[Yff, Yft], (i, r_[f, t])), (nl, nb))
Yt = csr_matrix((r_[Ytf, Ytt], (i, r_[f, t])), (nl, nb))

## build Ybus
Ybus = Cf.T * Yf + Ct.T * Yt + \
    csr_matrix((Ysh, (range(nb), range(nb))), (nb, nb))

return Ybus, Yf, Yt, Cf, Ct

```

5. Calcular balance de potencia en nodos Sbus.py

```

from numpy import ones, flatnonzero as find
from scipy.sparse import csr_matrix as sparse
from idx_gen import GEN_BUS, GEN_STATUS, PG_A, QG_A
from numpy import diag, conj, zeros, append, transpose, asmatrix, asarray

def Sbus(baseMVA, bus, gen , cargas, V):
    ## NUMERO DE BARRAS, GENERADORES Y CARGAS

    on = gen[:, GEN_STATUS] > 0
    nb = bus.shape[0]
    ngon = on.shape[0]
    nload = cargas.shape[0]
    barra_gen = gen[on,0]
    barra_car = cargas[:,0]

    Alpha = 2
    PD = 3
    QD = 4
    ## MATRICES DE CONEXION PARA GENERADORES Y CARGAS
    Cg = sparse((ones(ngon), (barra_gen, range(ngon))), (nb, ngon))
    Cd = sparse((ones(nload), (barra_car, range(nload))), (nb, nload))
    Sg = Cg * (gen[on, PG_A] + 1j * gen[on, QG_A]) / (1000*baseMVA)
    Sd = Cd * (cargas[:, PD] + 1j * cargas[:, QD]) / (1000*baseMVA)

    ind_carga = cargas[:,Alpha]
    ipk = cargas[ind_carga == 0,0]
    iik = cargas[ind_carga == 1,0]
    izk = cargas[ind_carga == 2,0]

    nSd = Sd.shape[0]
    Spk = zeros((nSd,1)) + 1j* zeros((nSd,1))

```

```

Sik = zeros((nSd,1)) + 1j* zeros((nSd,1))
Szk = zeros((nSd,1)) + 1j* zeros((nSd,1))

Spk[ipk.astype(int),0] = Sd[ipk.astype(int)]
Sik[iik.astype(int),0] = Sd[iik.astype(int)]
Szk[izk.astype(int),0] = Sd[izk.astype(int)]

nV = V.shape[0]
Vik = zeros((nV,1)) + 1j* zeros((nV,1))
Vzk = zeros((nV,1)) + 1j* zeros((nV,1))
Vik[ipk.astype(int),0] = V[ipk.astype(int),0]
Vzk[izk.astype(int),0] = V[izk.astype(int),0]
Sg = transpose(asmatrix(Sg))

%%% MODELO ZIP DE CARGA
# Sd_zik = Spk + Sik * abs(Vik) + Szk * abs(Vzk) * abs(Vzk)
Sd_zik = Spk + Sik + Szk
# print(sum(Sd_zik))
# Ptotal = sum(Sd_zik).real
# print(Ptotal*1000)
Sbus = Sg - Sd_zik
Sbus = asarray(Sbus)
Sbus = Sbus.ravel()
return Sbus

```

6. Calcular flujo de potencia mediante Newton Raphson newton_rapson.py, dSbus_dV.py, idx_brch.py, idx_brch.py, idx_gen.py

```

import sys
from numpy import array, angle, exp, linalg, conj, r_, Inf, asmatrix, asarray, transpose
from scipy.sparse import hstack, vstack
from scipy.sparse.linalg import spsolve
from dSbus_dV import dSbus_dV
from Sbus import Sbus

def newton_rapson(Ybus, Sbus1, V0, ref, pv, pq, mvabase, barras, generadores ,
cargas):

    ## options
    tol = 1e-4
    max_it = 30
    verbose = 2

    ## Parametros de inicio

```

```

converged = 0
i = 0
V = V0
Va = angle(V)
Vm = abs(V)

## set up indexing for updating V
pvpq = r_[pv, pq]
npv = len(pv)
npq = len(pq)
j1 = 0;    j2 = npv    ## j1:j2 - V angle of pv buses
j3 = j2;   j4 = j2 + npq ## j3:j4 - V angle of pq buses
j5 = j4;   j6 = j4 + npq ## j5:j6 - V mag of pq buses

## evaluate F(x0)
# print(Sbus)
# print(V * conj(Ybus * V))
mis = V * conj(Ybus * V) - Sbus1
F = r_[ mis[pv].real,
        mis[pq].real,
        mis[pq].imag ]

## check tolerance
normF = linalg.norm(F, Inf)
if verbose > 1:
    sys.stdout.write('\n it   max P & Q mismatch (p.u.)')
    sys.stdout.write('\n---- -----')
    sys.stdout.write('\n%3d    %10.3e' % (i, normF))
if normF < tol:
    converged = 1
    if verbose > 1:
        sys.stdout.write('\nConverged!\n')

## do Newton iterations
while (not converged and i < max_it):
    ## update iteration counter
    i = i + 1

    ## evaluate Jacobian
    dS_dVm, dS_dVa = dSbus_dV(Ybus, V)

    J11 = dS_dVa[array([pvpq]).T, pvpq].real
    J12 = dS_dVm[array([pvpq]).T, pq].real
    J21 = dS_dVa[array([pq]).T, pvpq].imag

```

```

J22 = dS_dVm[array([pq]).T, pq].imag

J = vstack([
    hstack([J11, J12]),
    hstack([J21, J22])
    ], format="csr")

## compute update step
dx = -1 * spsolve(J, F)
#    print(dx)

## update voltage
if npv:
#    Va = Va.ravel()
    Va[pv] = Va[pv] + dx[j1:j2]
#    print(pv)
if npq:
#    Va = Va.ravel()
    Va[pq] = Va[pq] + dx[j3:j4]
#    Vm = Vm.ravel()
    Vm[pq] = Vm[pq] + dx[j5:j6]

V = Vm * exp(1j * Va)
Vm = abs(V)      ## update Vm and Va again in case
Va = angle(V)    ## we wrapped around with a negative Vm

## evaluate F(x)
Vbus = transpose(asarray(asmatrix(V)))
Sbus1 = Sbus(mvabase, barras, generadores , cargas, Vbus) # Calculo Sbus
dependiente del voltaje

mis = V * conj(Ybus * V) - Sbus1
F = r_[ mis[pv].real,
        mis[pq].real,
        mis[pq].imag ]

## check for convergence
normF = linalg.norm(F, Inf)
if verbose > 1:
    sys.stdout.write('\n%3d      %10.3e' % (i, normF))
if normF < tol:
    converged = 1
    if verbose:
        sys.stdout.write("\nNewton's method power flow converged in "
            "%d iterations.\n" % i)

```

```

if verbose:
    if not converged:
        sys.stdout.write("\nNewton's method power did not converge in %d "
            "iterations.\n" % i)
return V, converged, i

```

7. Calcular voltajes y corrientes armónicas por cada fase
corrientes_armonicas.py

```

from pandas import read_excel
from numpy import array, zeros, ones, exp, angle, pi, conj, linalg, cos, sin
from scipy.sparse import csr_matrix as sparse
from Z012 import Z012
from num_interna import num_interna
from separ_fases import separ_fases
from ybus import ybus
from Sbus import Sbus
from newton_rapson import newton_rapson
from numpy import flatnonzero as find
from pandas import DataFrame
from barrido_frecuencia import barrido_frecuencia

```

```

def corrientes_armonicas(barras, cargas,espectrum,V,Yh,mvabase,icnln,Ybush):

```

```

    PD = 3 ; QD = 4
    nb = barras.shape[0]
    cargas = cargas [icnln.astype(bool),:]
    ind_nln = cargas[:,0]
    Sc = (cargas[:,PD] + 1j*cargas[:,QD])/(1000*mvabase)

    V = V[ind_nln.astype(int)]
    I_ff = conj(Sc / V)
    I_espec = array(espectrum)
    # print(abs(I_ff))

    h = I_espec[:,0]
    I1 = abs(I_ff)
    # print(I1)
    Ih_spectrum = I_espec[:,1]
    I1_spectrum = Ih_spectrum[0]
    teta_1 = angle(I_ff)
    teta_h_spectrum = I_espec[:,2]*pi/180
    teta_1_spectrum = teta_h_spectrum[0]

```

```

hn = h.shape[0]

if teta_1 < 0:
    teta_1 = teta_1 + pi

It1 = zeros (hn)
Ih1 = zeros (hn)
It1_rad = zeros (hn)

%%% CALCULO DE CORRIENTES ARMONICAS METODO DIRECTO

Vh1 = zeros((hn,nb)) + 1j*zeros((hn,nb))
Ih_iter = zeros((hn,nb)) + 1j*zeros((hn,nb))

for i in range(hn-1):
# Calculo de corrientes armonicas
    Ih = I1 * Ih_spectrum[i+1]/ I1_spectrum

    teta_h = teta_h_spectrum[i+1] + h[i+1]*(teta_1-teta_1_spectrum)
    if teta_h > pi:
        if teta_h < 2*pi:
            teta_h = teta_h - 2*pi
#
    if teta_h > 0:
        if teta_h > 2*pi:
            nteta = teta_h / (2*pi)
            nteta = int(nteta)
            teta_h = teta_h - nteta*2*pi

    if teta_h < 0:
        if teta_h < -2*pi:
            nteta = teta_h / (2*pi)
            nteta = int(nteta)
            teta_h = teta_h + nteta*2*pi

    Ih1[i+1] = Ih
    It1_rad[i+1] = teta_h
    It1[i+1] = teta_h*180/pi
    Zh = linalg.inv(Yh[i+1])

    Ih_total = zeros((nb,1))+1j*0
    Ih_total[ind_nln.astype(int),0] = Ih*cos(teta_h) + 1j* Ih*sin(teta_h)
# print(abs(Ih_total))
    Vh = Zh @ Ih_total
    Vh = Vh.ravel()

```

```

    Vh1[i+1,:] = Vh
#   Ih_iter[i+1,:] = Yh[i+1] @ Vh1[i+1,:]
    Ih_iter[i+1,:] = Ybush[i+1] @ Vh1[i+1,:]
#
    #%% CALCULO DE CORRIENTES ARMONICAS METODO ITERATIVO
    Ih_t = Ih_iter
#   print(Ih_iter)
# print(Ih_total)
    Vh_t = Vh1
    return Ih_total , Ih_t, Vh_t

```

8. Crear matrices de barras, líneas y cargas por cada fase separ_fases.py

from numpy import array, where, delete, zeros, asmatrix, concatenate, reshape, asarray

def separ_fases(lineas, barras, cargas):

```

    nl = lineas.shape[0]
    lin = zeros((nl,12))
    lin[:,0:10] = lineas
    lineas = lin
    ind_e = lineas[:,0]
    ind_r = lineas[:,1]

    #%% Lineas en la fase a
    lin_ea = barras[ind_e.astype(int),2]
    lin_ra = barras[ind_r.astype(int),2]
    lineas_a = lineas
    lineas_a[:,10] = lin_ea
    lineas_a[:,11] = lin_ra
    ind_a = ((lin_ea * lin_ra)==1)
    lineas_a = lineas_a[ind_a,:]
#   lineas_a = asarray(lineas_a)
    lineas_a[:,8] = 0
    lineas_a[:,7] = 0

    #%% Barras fase A
    barras_a = barras[(barras[:,2]>0),:]

    #%% Cargas fase A
    cargas_a = cargas[(abs(cargas[:,4])>0),:]

    #%% Lineas en la fase b

```



```

lin_eb = barras[ind_e.astype(int),3]
lin_rb = barras[ind_r.astype(int),3]
lineas_b = lineas
lineas_b[:,10] = lin_eb
lineas_b[:,11] = lin_rb
ind_b = ((lin_eb * lin_rb)==1)
lineas_b = lineas_b[ind_b,:]
lineas_b[:,8] = 0
lineas_b[:,7] = 0

%%% Barras fase B
barras_b = barras[(barras[:,3]>0),:]

%%% Cargas fase B
cargas_b = cargas[(abs(cargas[:,6])>0),:]
cargas_b = delete(cargas_b, 3, axis = 1)
cargas_b = delete(cargas_b, 3, axis = 1)

%%% Lineas en la fase v
lin_ec = barras[ind_e.astype(int),4]
lin_rc = barras[ind_r.astype(int),4]
lineas_c = lineas
lineas_c[:,10] = lin_ec
lineas_c[:,11] = lin_rc
ind_c = ((lin_ec * lin_rc)==1)
lineas_c = lineas_c[ind_c,:]
lineas_c[:,8] = 0
lineas_c[:,7] = 0

%%% Barras fase C
barras_c = barras[(barras[:,4]>0),:]

%%% Cargas fase C
cargas_c = cargas[(abs(cargas[:,8])>0),:]
cargas_c = delete(cargas_c, 3, axis = 1)
cargas_c = delete(cargas_c, 3, axis = 1)
cargas_c = delete(cargas_c, 3, axis = 1)
cargas_c = delete(cargas_c, 3, axis = 1)

return lineas_a, lineas_b,
lineas_c,barras_a,barras_b,barras_c,cargas_a,cargas_b,cargas_c

```

ANEXO 10: CÓDIGO DEL PROGRAMA PHYTON CON FILTRO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

AUTORES: Ante Cristian

Ruiz Cristian

"""

```
from pandas import read_excel
```

```
from numpy import array, zeros, ones, exp, angle, pi, conj, concatenate, sqrt, cos, sin,  
transpose, arange, where
```

```
from scipy.sparse import csr_matrix as sparse
```

```
from Z012 import Z012
```

```
from num_interna import num_interna
```

```
from separ_fases import separ_fases
```

```
from ybus import ybus
```

```
from Sbus import Sbus
```

```
from newton_rapson import newton_rapson
```

```
from numpy import flatnonzero as find
```

```
from pandas import DataFrame
```

```
from barrido_frecuencia import barrido_frecuencia
```

```
from corrientes_armonicas import corrientes_armonicas
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

def run_pf_armonico(red,filtro):

    print('-----')

    print('    UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI    ')

    print('    FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA    ')

    print('FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN ')

    print('ELABORADO POR: Christian Ante y Christian Ruiz')

    print('-----')

    ### LECTURA DE DATOS DE ENTRADA

    # BARRA SLACK

    slack = read_excel(red,sheetname= 'General') # MATRIZ LINEAS

    lineas = read_excel(red,sheetname= 'Topology' ) # MATRIZ PARAMETROS

    parametros = read_excel(red,sheetname='Configurations') # MATRIZ CARGAS

    cargas = read_excel(red,sheetname='Loads') # MATRIZ REGULADORES

    reguladores = read_excel(red,sheetname='Regulators') # MATRIZ
GENERADORES

    generadores = read_excel(red,sheetname='GD') # MATRIZ BARRAS

    barras_i = read_excel(red,sheetname='Graphic')

    espectro = read_excel(red,sheetname='Espectro_nl') #ESPECTRO NO LINEAL

```

```

vbase = read_excel(red,sheetname='Vbase') #ESPECTRO NO LINEAL

indices_1 = read_excel(red,sheetname='Fases') #ESPECTRO NO LINEAL

%%% CALCULO MATRIZ IMPEDANCIAS Z012

Zabc = array(parametros)

lineas = array(lineas)

barras_i = array(barras_i)

cargas = array(cargas)

generadores = array(generadores)

vbase = array(vbase)

[R,X,B] = Z012(Zabc,lineas)

capacitores = -1*array(reguladores) # CAPACITORES SON NEGATIVOS

bus_cap = capacitores[:,0]

cap_a = capacitores[:,1]

cap_b = capacitores[:,2]

cap_c = capacitores[:,3]

nc = bus_cap.shape[0]

indices_1 = array(indices_1)

ila = indices_1[:,2]

ilb = indices_1[:,3]

ilc = indices_1[:,4]

ilfa = ila > 0

```

```
ilfb = ilb > 0
```

```
ilfc = ilc > 0
```

```
### VALORES EN POR UNIDAD
```

```
mvabase = 1 # 1 MVA Potencia base
```

```
vbase = vbase[:,2]/sqrt(3)
```

```
Rpu = R / (vbase**2/(mvabase))
```

```
Xpu = X / (vbase**2/(mvabase))
```

```
Bpu = B*10**-6 / ((mvabase)/vbase**2)
```

```
### MATRIZ BARRAS
```

```
barras = ones ((barras_i.shape[0],11))
```

```
barras[:,0] = barras_i[:,0]
```

```
barras[:,2:5] = barras_i[:,1:4]
```

```
ind_slack = (barras[:,0] == slack['Datos'].values[0]) # posición barra slack
```

```
barras[ind_slack,1] = 3
```

```
nb = barras.shape[0]
```

```
GS_A = 5 ; BS_A = 6 # Es adicional para el caso de capacitores en los nodos
```

```
GS_B = 7 ; BS_B = 8
```

```
GS_C = 9 ; BS_C = 10
```

```
barras[:,GS_A] = 0
```

```
barras[:,BS_A] = 0
```

```
barras[:,GS_B] = 0
```

```
barras[:,BS_B] = 0
```

```
barras[:,GS_C] = 0
```

```
barras[:,BS_C] = 0
```

```
%%% CAPACITORES Y REACTORES
```

```
for i in range(nc):
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_A] = 0
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_A] = cap_a[i]/(mvabase*1000)
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_B] = 0
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_B] = cap_b[i]/(mvabase*1000)
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],GS_C] = 0
```

```
    barras[bus_cap[i]==barras[:,0],BS_C] = cap_c[i]/(mvabase*1000)
```

```
%%% MATRIZ LINEAS
```

```
nl = lineas.shape[0]
```

```
rxb = ones((nl,10))
```

```
rxb[:,0:4] = lineas
```

```
rxb[:,4] = Rpu
```

```
rxb[:,5] = Xpu
```

```
rxb[:,6] = Bpu/2 ##BC/2
```

```
lineas = rxb
```

```

red = { 'bus': barras, 'branch': lineas, 'gen': generadores, 'load': cargas }

%%% RENUMERACIÓN INTERNA

red = num_interna(red);

barras = red['bus'] ; lineas = red['branch'] ; generadores = red['gen'] ; cargas =
red['load']

bus_num = barras[:,0]

%%% SEPARACIÓN DE FASES

[lineas_a,                                     lineas_b,
lineas_c,barras_a,barras_b,barras_c,cargas_a,cargas_b,cargas_c] = separ_fases
(lineas, barras,cargas)

red_a = { 'bus': barras_a, 'branch': lineas_a, 'gen': generadores, 'load': cargas_a }
red_b = { 'bus': barras_b, 'branch': lineas_b, 'gen': generadores, 'load': cargas_b }
red_c = { 'bus': barras_c, 'branch': lineas_c, 'gen': generadores, 'load': cargas_c }

BUS_I = 0

iva = red_a['bus'][:, BUS_I].copy()
ivb = red_b['bus'][:, BUS_I].copy()
ivc = red_c['bus'][:, BUS_I].copy()

%%% RENUMERACION DE NODOS

red_a = num_interna(red_a)

```

```

red_b = num_interna(red_b)

red_c = num_interna(red_c)

barras_a = red_a['bus'] ; lineas_a = red_a['branch'] ; cargas_a = red_a['load']

barras_b = red_b['bus'] ; lineas_b = red_b['branch'] ; cargas_b = red_b['load']

barras_c = red_c['bus'] ; lineas_c = red_c['branch'] ; cargas_c = red_c['load']

barras_b[:,5] = barras_b[:,7]

barras_b[:,6] = barras_b[:,8]

barras_c[:,5] = barras_c[:,9]

barras_c[:,6] = barras_c[:,10]

```

```

%% FORMACIÒN DE LA MATRIZ YBARRA

```

```

[Ybus_a, Yfa, Yta, Cfa, Cta] = ybus ( mvabase,barras_a, lineas_a)

[Ybus_b, Yfb, Ytb, Cfb, Ctb] = ybus ( mvabase,barras_b, lineas_b)

[Ybus_c, Yfc, Ytc, Cfc, Ctc] = ybus ( mvabase,barras_c, lineas_c)

```

```

%% INICIO ALGORITMO FLUJO DE POTENCIA

```

```

nba = barras_a.shape[0]

nbb = barras_b.shape[0]

nbc = barras_c.shape[0]

Va = ones((nba,1))*exp(1j*0)

Vb = ones((nbb,1))*exp(1j*0)

Vc = ones((nbc,1))*exp(1j*0)

```



```
vslack_a = slack['Datos'].values[4]
```

```
vslack_b = slack['Datos'].values[5]
```

```
vslack_c = slack['Datos'].values[6]
```

```
### INDICES PARA BARRAS PV, PQ Y SLACK
```

```
PQ = 1 ; PV = 2 ; REF = 3; BUS_TYPE = 1
```

```
ref_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
```

```
pv_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
```

```
pq_a = find(barras_a[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices
```

```
ref_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
```

```
pv_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
```

```
pq_b = find(barras_b[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices
```

```
ref_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == REF) # ref bus index
```

```
pv_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == PV) # PV bus indices
```

```
pq_c = find(barras_c[:, BUS_TYPE] == PQ) # PQ bus indices
```

```
Va[ref_a,:] = vslack_a + 1j*0
```

```
Vb[ref_b,:] = vslack_b + 1j*0
```

```
Vc[ref_c,:] = vslack_c + 1j*0
```

```
##### FLUJO DE POTENCIA A FRECUENCIA FUNDAMENTAL
```

```
Sbus_a = Sbus(mvabase, barras_a, generadores , cargas_a, Va)
```

```
Sbus_b = Sbus(mvabase, barras_b, generadores , cargas_b, Vb)
```

```
Sbus_c = Sbus(mvabase, barras_c, generadores , cargas_c, Vc)
```

```
Va, converged_a, i_a = newton_rapson(Ybus_a, Sbus_a, Va.ravel(), ref_a, pv_a,  
pq_a, mvabase, barras_a, generadores , cargas_a)
```

```
Vb, converged_b, i_b = newton_rapson(Ybus_b, Sbus_b, Vb.ravel(), ref_b, pv_b,  
pq_b, mvabase, barras_b, generadores , cargas_b)
```

```
Vc, converged_c, i_c = newton_rapson(Ybus_c, Sbus_c, Vc.ravel(), ref_c, pv_c,  
pq_c, mvabase, barras_c, generadores , cargas_c)
```

```
##### IMPRESION DE RESULTADOS FLUJOS DE POTENCIA
```

```
Vma = zeros(nb) ; Vaa = zeros(nb) ; Vmb = zeros(nb) ; Vab = zeros(nb); Vmc =  
zeros(nb) ; Vac = zeros(nb)
```

```
Vma[iva.astype(int)] = abs(Va)
```

```
Vaa[iva.astype(int)] = angle(Va)*180/pi
```

```
Vmb[ivb.astype(int)] = abs(Vb)
```

```
Vab[ivb.astype(int)] = angle(Vb)*180/pi -120
```

```
Vmc[ivc.astype(int)] = abs(Vc)
```

```
Vac[ivc.astype(int)] = angle(Vc)*180/pi + 120
```

```
print()
```

```
print('FLUJO DE POTENCIA NEWTON RAPSHON ')
```

```
voltajes ={'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '2.Va[pu]': Vma, '3.Vang_a[°]': Vaa,  
'4.Vb[pu]': Vmb, '5.Vang_b[°]': Vab, '6.Vc[pu]': Vmc, '7.Vang_c[°]': Vac }
```

```
resultados = DataFrame(voltajes)
```

```
print(resultados)
```

```
### FLUJOS DE POTENCIA ARMONICOS
```

```
### BARRIDO DE FRECUENCIA
```

```
I_espec = array(espectro)
```

```
icnln_a = cargas_a[:,9]
```

```
icnln_b = cargas_b[:,7]
```

```
icnln_c = cargas_c[:,5]
```

```
orden = I_espec[:,0]
```

```
Ybarr_a, Yf_freq_a, Yt_freq_a, Ybush_a = barrido_frecuencia(barras_a, lineas_a,  
generadores, orden, Va, cargas_a, Cfa, Cta, mvabase, icnln_a, filtro)
```

```
Ybarr_b, Yf_freq_b, Yt_freq_b, Ybush_b = barrido_frecuencia(barras_b, lineas_b,  
generadores, orden, Vb, cargas_b, Cfb, Ctb, mvabase, icnln_b, filtro)
```

```
Ybarr_c, Yf_freq_c, Yt_freq_c, Ybush_c = barrido_frecuencia(barras_c, lineas_c,  
generadores, orden, Vc, cargas_c, Cfc, Ctc, mvabase, icnln_c, filtro)
```

```
### LAZO PARA VARIAS CARGAS ARMÓNICAS
```

```
nespec = sum(cargas[:,9])
```

```
PD = 3 ; QD = 4
```

```

ind_nln_a = cargas_a[:,0]

Vaar = Va[ind_nln_a.astype(int)]

Sca = (cargas_a[:,PD] + 1j*cargas_a[:,QD])/(1000*mvabase)

# print(cargas_a)

#print(Vaar)

# I_ffa = conj(Sca / Vaar)

#print(I_ffa)

if nespec < 2:

    %%% CORRIENTES DE INYECCION FRECUENCIA FUNDAMENTAL,
    ARMONICA Y VOLTAJES ARMONICOS

    spectrum = array(espectro)

    Ia, Ifa, Vha = corrientes_armonicas(barras_a,
cargas_a,spectrum,Va,Ybarr_a,mvabase,icnln_a,Ybush_a)

    Ib, Ifb, Vhb = corrientes_armonicas(barras_b,
cargas_b,spectrum,Vb,Ybarr_b,mvabase,icnln_b,Ybush_b)

    Ic, Ifc, Vhc = corrientes_armonicas(barras_c,
cargas_c,spectrum,Vc,Ybarr_c,mvabase,icnln_c,Ybush_c)

    THD_fa = 1/abs(Va) * sqrt(sum((abs(Vha)**2)))*100

    THD_fb = 1/abs(Vb) * sqrt(sum((abs(Vhb)**2)))*100

    THD_fc = 1/abs(Vc) * sqrt(sum((abs(Vhc)**2)))*100

```

```

If_f_a = Ybus_a @ Va
If_f_b = Ybus_b @ Vb
If_f_c = Ybus_c @ Vc

# print('El contenido Armónico en corriente por cada rama y en cada fase es: ')

THD_Ia = 1/abs(If_f_a) * sqrt(sum((abs(Ifa)**2)))*100
THD_Ib = 1/abs(If_f_b) * sqrt(sum((abs(Ifb)**2)))*100
THD_Ic = 1/abs(If_f_c) * sqrt(sum((abs(Ifc)**2)))*100

else:

    espectro = array(espectro);

    orden1 = espectro[:,0]
    orden2 = espectro[:,3]
    orden3 = espectro[:,6]

    I_espec1 = espectro[:,0:3]
    I_espec2 = espectro[:,3:6]
    I_espec3 = espectro[:,6:9]

    icnln_ta = cargas_a[:,9]
    icnln_tb = cargas_b[:,7]
    icnln_tc = cargas_c[:,5]

    icnln_a = where(icnln_ta==1)
    icnln_b = where(icnln_tb==1)

```

```

icnln_c = where(icnln_tc==1)

ncnln_a = sum(icnln_ta)

ncnln_b = sum(icnln_tb)

ncnln_c = sum(icnln_tc)

ind_nln_a = zeros(icnln_ta.shape[0]);

ind_nln_b = zeros(icnln_tb.shape[0]);

ind_nln_c = zeros(icnln_tc.shape[0]);

nba = barras_a.shape[0]

nbb = barras_b.shape[0]

nbc = barras_c.shape[0]

THD_fa = zeros(nba)

THD_fb = zeros(nbb)

THD_fc = zeros(nbc)

THD_Ia = zeros(nba)

THD_Ib = zeros(nbb)

THD_Ic = zeros(nbc)

for i in range(ncnln_a.astype(int)):

    icnln_a = array(icnln_a)

    ind_nln_a[icnln_a[0,i]] = 1

    orden_c = cargas_a[:,10]

    num_orden = orden_c[icnln_a[0,i]]

```

```

if num_orden == 1:
    orden = orden1
    spectrum = I_espec1
elif num_orden == 2:
    orden = orden2
    spectrum = I_espec2
else:
    orden = orden3
    spectrum = I_espec3

Ybarr_a, Yf_freq_a, Yt_freq_a, Ybush = barrido_frecuencia(barras_a, lineas_a,
generadores, orden, Va, cargas_a, Cfa, Cta, mvabase, ind_nln_a, filtro)

Ia, Ifa, Vha = corrientes_armonicas(barras_a,
cargas_a, spectrum, Va, Ybarr_a, mvabase, ind_nln_a, Ybush_a)

ind_nln_a = zeros(icnln_ta.shape[0])

THD_a = 1/abs(Va) * sqrt(sum((abs(Vha)**2)))*100

THD_fa = THD_a + THD_fa

If_f_a = Ybus_a @ Va

# print(abs(Ifa))

Iharmo_a = sqrt(sum((abs(Ifa)**2)))

# print(abs(I_ffa))

# print(Iharmo_a)

```

```

#     THD_ia = (1/abs( I_ffa)) * Iharmo_a [ind_nln_a.astype(int)]

THD_ia = (1/abs(If_f_a)) * Iharmo_a *100

THD_Ia = THD_ia + THD_Ia

for i in range(ncnln_b.astype(int)):

    icnln_b = array(icnln_b)

    ind_nln_b[icnln_b[0,i]] = 1

    orden_c = cargas_b[:,8]

    num_orden = orden_c[icnln_b[0,i]]

    if num_orden == 1:

        orden = orden1

        spectrum = I_espec1

    elif num_orden == 2:

        orden = orden2

        spectrum = I_espec2

    else:

        orden = orden3

        spectrum = I_espec3

    Ybarr_b, Yf_freq_b, Yt_freq_b, Ybush = barrido_frecuencia(barras_b,
lineas_b, generadores, orden, Vb, cargas_b, Cfb, Ctb, mvabase, ind_nln_b, filtro)

```



```
Ib, Ifb, Vhb = corrientes_armonicas(barras_b,
cargas_b,spectrum,Vb,Ybarr_b,mvabase,ind_nln_b,Ybush_b)
```

```
ind_nln_b = zeros(icnln_tb.shape[0])
```

```
THD_b = 1/abs(Vb) * sqrt(sum((abs(Vhb)**2)))*100
```

```
THD_fb = THD_b + THD_fb
```

```
If_f_b = Ybus_b @ Vb
```

```
THD_ib = 1/abs>If_f_b) * sqrt(sum((abs>Ifb)**2)))*100
```

```
THD_Ib = THD_ib + THD_Ib
```

```
for i in range(ncnln_c.astype(int)):
```

```
icnln_c = array(icnln_c)
```

```
ind_nln_c[icnln_c[0,i]] = 1
```

```
orden_c = cargas_c[:,6]
```

```
num_orden = orden_c[icnln_c[0,i]]
```

```
if num_orden == 1:
```

```
orden = orden1
```

```
spectrum = I_espec1
```

```
elif num_orden == 2:
```

```
orden = orden2
```

```
spectrum = I_espec2
```

```

else:

    orden = orden3

    spectrum = I_espec3

    Ybarr_c, Yf_freq_c, Yt_freq_c, Ybush = barrido_frecuencia(barras_c, lineas_c,
generadores, orden, Vc, cargas_c, Cfc, Ctc, mvabase, ind_nln_c, filtro)

    Ic, Ifc, Vhc = corrientes_armonicas(barras_c,
cargas_c, spectrum, Vc, Ybarr_c, mvabase, ind_nln_c, Ybush_c)

    ind_nln_c = zeros(icnln_tc.shape[0])

    THD_c = 1/abs(Vc) * sqrt(sum((abs(Vhc)**2)))*100

    THD_fc = THD_c + THD_fc

    If_f_c = Ybus_c @ Vc

    THD_ic = 1/abs(If_f_c) * sqrt(sum((abs(Ifc)**2)))*100

    THD_Ic = THD_ic + THD_Ic

### IMPRESION DE RESULTADOS FLUJOS DE POTENCIA ARMONICOS

nba = barras_a.shape[0]

print()

### CONTENIDO ARMONICO THD VOLTAJES %

print()

print('FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO ')

print('El contenido Armónico en voltajes por cada fase y en cada barra es: ')

```

```

print()

THDa = zeros(nb)

THDb = zeros(nb)

THDc = zeros(nb)

THDa[iva.astype(int)] = THD_fa

THDb[ivb.astype(int)] = THD_fb

THDc[ivc.astype(int)] = THD_fc

THD = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '3.Thd_Va[%]': THDa, '4.Thd_Vb[%]': THDb,
'5.Thd_Vc[%]': THDc}

thdv = DataFrame(THD)

Vha[0,:] = Va;

Vhb[0,:] = Vb;

Vhc[0,:] = Vc;

Vhta = zeros((8,nb))

Vhtb = zeros((8,nb))

Vhtc = zeros((8,nb))

anga = zeros((8,nb))

angb = zeros((8,nb))

angc = zeros((8,nb))

Vhta[:,iva.astype(int)] = abs(Vha)

Vhtb[:,ivb.astype(int)] = abs(Vhb)

Vhtc[:,ivc.astype(int)] = abs(Vhc)

```

```

anga[:,iva.astype(int)] = angle(Vha)*180/pi

angb[:,ivb.astype(int)] = angle(Vhb)*180/pi

angc[:,ivc.astype(int)] = angle(Vhc)*180/pi

voltajes_h_mod      ={'Bus':      list(barras_i[:,0]),'V_Harmonicos_fa':
transpose(abs(Vhta)), 'V_Harmonicos_fb': transpose(abs(Vhtb)), 'V_Harmonicos_fc':
transpose(abs(Vhtc))}

voltajes_h_angle ={'Bus': list(barras_i[:,0]),'Ang_Harmonicos_fa': transpose(anga),
'Ang_Harmonicos_fb': transpose(angb), 'Ang_Harmonicos_fc': transpose(angc)}

vol_harmonics_a    =    V_h_mod    ={'1.Bus':    list(barras_i[:,0]),'2.V_f_a':
transpose(abs(Vhta[0,:])),

                    '2.V_fa_3':    transpose(abs(Vhta[1,:])),    '3.V_fa_5':
transpose(abs(Vhta[2,:])),

                    '3.V_fa_7': transpose(abs(Vhta[3,:]))}

vol_harmonics_b    =    V_h_mod    ={'1.Bus':    list(barras_i[:,0]),'2.V_f_b':
transpose(abs(Vhtb[0,:])),

                    '2.V_fb_3':    transpose(abs(Vhtb[1,:])),    '3.V_fb_5':
transpose(abs(Vhtb[2,:])),

                    '3.V_fb_7': transpose(abs(Vhtb[3,:]))}

vol_harmonics_c    =    V_h_mod    ={'1.Bus':    list(barras_i[:,0]),'2.V_f_c':
transpose(abs(Vhtc[0,:])),

                    '2.V_fc_3':    transpose(abs(Vhtc[1,:])),    '3.V_fc_5':
transpose(abs(Vhtc[2,:])),

                    '3.V_fc_7': transpose(abs(Vhtc[3,:]))}

vol_harmonics_a = DataFrame(vol_harmonics_a)

```

```

vol_harmonics_b = DataFrame(vol_harmonics_b)

vol_harmonics_c = DataFrame(vol_harmonics_c)

print(thdv)

%%% CONTENIDO ARMONICO THD CORRIENTES %

# CORRIENTES FUNDAMENTALES

Ihar_fa = Ybarr_a[1] @ Vha[1,:]

Ife_a = Yfa @ Va

Ife_b = Yfb @ Vb

Ife_c = Yfc @ Vc

Ife_a_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

Ife_b_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

Ife_c_t = zeros(nl) + 1j*zeros(nl)

Ife_a_t[ilfa] = Ife_a

Ife_b_t[ilfb] = Ife_b*exp(-1j*2*pi/3)

Ife_c_t[ilfc] = Ife_c*exp(1j*2*pi/3)

In = Ife_a_t + Ife_b_t + Ife_c_t

Ibase = mvabase / (sqrt(3)*vbase[0])

```

```

Ifa[0,:] = If_f_a;

Ifb[0,:] = If_f_b;

Ifc[0,:] = If_f_c;

Ihta = zeros((8,nb))

Ihtb = zeros((8,nb))

Ihtc = zeros((8,nb))

Ianga = zeros((8,nb))

Iangb = zeros((8,nb))

Iangc = zeros((8,nb))

Ihta[:,iva.astype(int)] = abs(Ifa)

Ihtb[:,ivb.astype(int)] = abs(Ifb)

Ihtc[:,ivc.astype(int)] = abs(Ifc)

Ianga[:,iva.astype(int)] = angle(Ifa)*180/pi

Iangb[:,ivb.astype(int)] = angle(Ifb)*180/pi

Iangc[:,ivc.astype(int)] = angle(Ifc)*180/pi

I_h_mod   ={'Bus':  list(barras_i[:,0]),'I_Harmonicos_fa':  transpose(abs(Ihta)),
'I_Harmonicos_fb': transpose(abs(Ihtb)), 'I_Harmonicos_fc': transpose(abs(Ihtc))}

I_h_angle ={'Bus':  list(barras_i[:,0]),'AngI_Harmonicos_fa':  transpose(Ianga),
'AngI_Harmonicos_fb': transpose(Iangb), 'AngI_Harmonicos_fc': transpose(Iangc)}

corrientes_harmonics_a   =  I_h_mod   ={'1.Bus':  list(barras_i[:,0]),'2.I_f_a':
transpose(abs(Ihta[0,:])),
                                '2.I_fa_3':      transpose(abs(Ihta[1,:])),      '3.I_fa_5':
transpose(abs(Ihta[2,:])),

```

```

        '3.I_fa_7': transpose(abs(Ihta[3,:]))}

    corrientes_harmonics_b = I_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.I_f_b':
transpose(abs(Ihtb[0,:])),

        '2.I_fb_3':      transpose(abs(Ihtb[1,:])),      '3.I_fb_5':
transpose(abs(Ihtb[2,:])),

        '3.I_fb_7': transpose(abs(Ihtb[3,:]))}

    corrientes_harmonics_c = I_h_mod = {'1.Bus': list(barras_i[:,0]),'2.I_f_c':
transpose(abs(Ihtc[0,:])),

        '2.I_fc_3':      transpose(abs(Ihtc[1,:])),      '3.I_fc_5':
transpose(abs(Ihtc[2,:])),

        '3.I_fc_7': transpose(abs(Ihtc[3,:]))}

    corrientes_harmonics_a = DataFrame(corrientes_harmonics_a)
    corrientes_harmonics_b = DataFrame(corrientes_harmonics_b)
    corrientes_harmonics_c = DataFrame(corrientes_harmonics_c)

# print(THD_Ia)

    THDia = zeros(nb)

    THDib = zeros(nb)

    THDic = zeros(nb)

    THDia[iva.astype(int)] = THD_Ia
    THDib[ivb.astype(int)] = THD_Ib
    THDic[ivc.astype(int)] = THD_Ic

    print()

```

```

print('El contenido Armónico de corriente por cada fase y en cada barra es: ')

print()

THDi ={'1.Bus': list(barras_i[:,0]), '3.Thd_Ia[%]': THDia, '4.Thd_Ib[%]': THDib,
'5.Thd_Ic[%]': THDic}

thdi = DataFrame(THDi)

print(thdi)

corrientes_fase ={'1.Bus_e': list(lineas[:,0]), '2.Bus_r': list(lineas[:,1]),
'3.Ifa_m[pu]': abs(Ife_a_t), '4.Ifa_ang[pu]': angle(Ife_a_t)*180/pi,
'5.Ifb_m[pu]': abs(Ife_b_t), '6.Ifb_ang[pu]': angle(Ife_b_t)*180/pi,
'7.Ifc_m[pu]': abs(Ife_c_t), '8.Ifc_ang[pu]': angle(Ife_c_t)*180/pi,
'9.In_m[pu]': abs(In), '10.In_ang[pu]': angle(In)*180/pi}

corrientes_fase = DataFrame(corrientes_fase)

### GRAFICO DE RESULTADOS

nba = barras_a.shape[0]

y = arange(nba)

fig1,ax1 = plt.subplots(figsize=(6,5))

plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDa)

ax1.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE A')

ax1.set_xlabel("Barra")

```



```
ax1.set_ylabel("THDv [%]")
```

```
plt.show()
```

```
fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(6,5))
```

```
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDia)
```

```
ax2.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE A')
```

```
ax2.set_xlabel("Barra")
```

```
ax2.set_ylabel("THDi [%]")
```

```
plt.show()
```

```
fig3,ax3 = plt.subplots(figsize=(6,5))
```

```
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDb)
```

```
ax3.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE B')
```

```
ax3.set_xlabel("Barra")
```

```
ax3.set_ylabel("THDv [%]")
```

```
plt.show()
```

```
fig4, ax4 = plt.subplots(figsize=(6,5))
```

```
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDib)
```

```
ax4.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE B')
```

```
ax4.set_xlabel("Barra")
```

```
ax4.set_ylabel("THDi [%]")
```

```

plt.show()

fig5,ax5 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDc)
ax5.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO VOLTAJES FASE C')
ax5.set_xlabel("Barra")
ax5.set_ylabel("THDv [%]")
plt.show()

fig6, ax6 = plt.subplots(figsize=(6,5))
plt.bar(list(barras_i[:,0]),THDi)
ax6.set_title('CONTENIDO ARMÓNICO CORRIENTES FASE C')
ax6.set_xlabel("Barra")
ax6.set_ylabel("THDi [%]")
plt.show()

#Ybarr_a

return voltajes_h_mod, voltajes_h_angle,I_h_mod, I_h_angle,thdv,thdi,resultados,
corrientes_fase,Ybarr_a,Ybarr_b,Ybarr_c, corrientes_harmonics_a,
corrientes_harmonics_b, corrientes_harmonics_c,
vol_harmonics_a,vol_harmonics_b,vol_harmonics_c

```