

**SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE
CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE
CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL**

**AUTOR:
NATHALY IVETTE MANTILLA CALDERÓN**

**TUTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito D.M., octubre 2020

Nathaly Ivette Mantilla Calderón

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Nathaly Ivette Mantilla Calderón (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Nacional “Hipatia Cárdenas de Bustamante” de la ciudad de Quito. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la simulación de flujos de potencia con presencia de contenido armónico usando el método frecuencial. nmantillac@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. cbarrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL*” realizado por Nathaly Ivette Mantilla Calderón, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., octubre de 2020



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Nathaly Ivette Mantilla Calderón, con documento de identificación N° 1753048782, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., octubre de 2020



.....
Nathaly Ivette Mantilla Calderón

C.C.: 1753048782

1. ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Armónicos en sistemas eléctricos	3
2.2	Fuentes de armónicos	5
2.2.1	Transformadores.....	5
2.2.2	Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL) y Lámparas Led (LED)	5
2.2.3	Máquinas Rotativas	5
2.2.4	Convertidores de Potencia.....	5
2.2.5	Electrodomésticos	5
2.2.6	Reguladores de Velocidad Ajustables (ASD)	5
2.2.7	Hornos de Arco	5
2.2.8	Hornos de Inducción	5
2.3	Mitigación de armónicos.....	5
2.3.1	Transformadores en Zigzag.....	6
2.3.2	Filtros Activos	6
2.3.3	Filtros Pasivos	6
2.3.4	Filtros Pasivos Serie	6
2.3.5	Filtros Pasivos en derivación.....	6
2.4	Cuantificación de armónicos	6
2.5	Distorsión Armónica Total (THD)	7
2.5.1	Distorsión Armónica de Voltaje.....	7
2.5.2	Distorsión Armónica de Corriente	8
2.6	Modelos de elementos del sistema de potencia en condiciones armónicas	9
2.6.1	Generadores.....	9
2.6.2	Transformadores.....	10
2.6.3	Líneas de transmisión	10
2.6.4	Cargas	11
2.6.5	Compensadores	12
3	FORMULACIÓN DEL MÉTODO FRECUENCIAL PARA FLUJO ARMÓNICO	13
3.1	Modelación matemática	13
3.2	Implementación del método en el software Matlab	15
3.3	Sistemas de prueba	17

3.3.1	Sistema 1	17
3.3.2	Sistema 2	18
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	19
4.1.1	Sistema 1	20
4.1.2	Sistema 2	22
5	CONCLUSIONES	24
5.1	Trabajos futuros.....	24
6	REFERENCIAS	24
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	27
6.2	Resumen de Indicadores.....	30
7	ANEXOS.....	32
7.1	Datos del sistema de prueba 1	32
7.2	Datos del sistema de prueba 2	34

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Generador.	9
Figura 2.	Transformador.	10
Figura 3.	Redes de secuencia cero de transformador.....	10
Figura 4.	Modelo π de una línea de transmisión.....	10
Figura 5.	Carga en serie.	11
Figura 6.	Carga en paralelo.	11
Figura 7.	Carga con efecto piel.	11
Figura 8.	Motor de inducción y resistencia.....	12
Figura 9.	Cargas de transformadores y amortiguamiento de motores.	12
Figura 10.	Configuración SVC con banco de capacitores.	13
Figura 11.	Flujograma del método de Newton Raphson.	16
Figura 12.	Flujograma del método frecuencial.	17
Figura 13.	Diagrama del sistema IEEE de 14 barras.	18
Figura 14.	Diagrama del sistema de 2 barras.....	18
Figura 15.	Pantalla principal	19
Figura 16.	Pantalla de los datos del sistema.....	20
Figura 17.	Pantalla de resultados.	20
Figura 18.	Espectro de corriente en la barra 301 y 302 del sistema IEEE de 14 barras. .	22
Figura 19	Espectro de corriente en la barra 8 del sistema IEEE de 14 barras.	22

Figura 20. Resultados del THD de corriente del sistema IEEE de 14 barras.....	22
Figura 21. Resultados del THD de voltaje del sistema IEEE de 14 barras.	22
Figura 22 Espectro de corriente en la barra 2 del sistema de 2 barras.	23
Figura 23. Resultados del THD de corriente del sistema 2 barras.	23
Figura 24. Resultados del THD de voltaje del sistema 2 barras.	23
Figura 25. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	30
Figura 26. Indicador de formulación del problema - Estadodel arte.....	30
Figura 27. Indicador de solución - Estado del arte	31

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de armónicos.	4
Tabla 2. Límites máximos de armónicos de voltaje.....	8
Tabla 3. Límites máximos de distorsión armónica de corriente.	8
Tabla 4. Tipos de barras en flujos de potencia.....	9
Tabla 5. Espectro armónico Barra 301.....	18
Tabla 6. Espectro armónico Barra 302.....	18
Tabla 7. Espectro armónico Barra 8.....	18
Tabla 8. Espectro armónico del controlador de frecuencia variable (VFD).	19
Tabla 9. Respuestas de voltaje y ángulo del flujo fundamental.....	20
Tabla 10. Respuestas de las potencias del flujo fundamental.	21
Tabla 11. Respuestas del THD en el sistema de 14 barras.....	21
Tabla 12. Resultados del THD del sistema de 14 barras en el software DIgSILENT Power Factory.	21
Tabla 13. Respuestas de voltaje y ángulo del flujo a frecuencia fundamental.	23
Tabla 14. Respuestas de las potencias del flujo fundamental.	23
Tabla 15. Respuestas del THD en el sistema de 2 barras.....	23
Tabla 16. Resultados del THD del sistema de 2 barras en el software DIgSILENT Power Factory.....	23
Tabla 17. Matriz de estado del arte	27
Tabla 18. Número del tipo de barra y de la conexión de los transformadores.....	32
Tabla 19. Datos del Sistema IEEE de 14 barras.....	32
Tabla 20. Datos de los generadores del sistema IEEE de 14 barras	32
Tabla 21. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras	33
Tabla 22. Datos de los transformadores del sistema IEEE de 14 barras.....	33
Tabla 23. Datos de los compensadores del sistema IEEE de 14 barras	33

Tabla 24. Datos del sistema de 2 barras	34
Tabla 25. Datos de la línea del sistema de 2 barras	34
Tabla 26. Datos del generador del sistema de 2 barras	34

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL

Resumen

El presente trabajo aborda la temática conceptual relacionada con el funcionamiento de los sistemas de potencia que poseen contenido armónico, tanto sus causas como sus efectos dentro de la operación cotidiana en el sistema eléctrico de potencia (SEP). Para la operación normal de un sistema eléctrico de potencia se analiza diferentes variables eléctricas, siendo una de las más relevantes los armónicos del sistema, en tal sentido una inadecuada mitigación de armónicos puede llevar al sistema eléctrico de potencia a un colapso, causando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

El trabajo de investigación plantea la elaboración de una aplicación en Matlab para el cálculo de flujos de potencia con presencia de armónicos, basados en el espectro armónico que poseen los elementos; esto permite implementar cualquier carga no lineal en el sistema y observar cual es la afectación que recibe el mismo. Para la validación del programa se emplean dos sistemas de prueba y se realizará un análisis comparativo con los resultados del software DIgSILENT PowerFactory. El primero es el sistema IEEE de 14 barras sometido a componentes que introducen armónicos al sistema para poder probar el programa; y el segundo es un sistema de 2 barras que posee cargas no lineales.

Palabras Clave: Armónicos, Flujos de Potencia, Método de Newton Raphson, Método Frecuencial, THD.

Abstract

This paper will address the conceptual issues related to the operation of power systems with harmonic content, both its causes and its effects within the daily operation in the electric power system (SEP). For the normal operation of an electrical power system, different electrical variables are analyzed, being one of the most relevant the harmonics of the system. In that sense, an inadequate harmonics mitigation can lead the electrical power system to a collapse, causing several harmful effects in the network equipment.

The research work proposes the development of an application in Matlab for the calculation of power flows with the presence of harmonics, based on the harmonic spectrum that the elements possess; this allows the implementation of any non-linear load in the system and to observe which is the affectation that the system receives. For the validation of the program, two test systems are used and a comparative analysis with the results of the DIgSILENT PowerFactory software will be carried out. The first one is the IEEE 14-bar system subjected to components that introduce harmonics into the system in order to test the program; and the second one is a 2-bar system with non-linear loads.

Keywords: Harmonics, Power Flows, Newton Raphson's Method, Frequency Method, THD.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) en un comienzo no poseían una gran distorsión armónica, pero con el avance tecnológico esto ha incrementado considerablemente debido a la aparición de cargas no lineales que son fuente de corrientes y voltajes armónicos. Esto puede generar grandes problemas en la red eléctrica, entre los más comunes los errores de medición, sobrecargas en las máquinas, notable incremento de temperatura en los transformadores, mal funcionamiento de protecciones, disminución de la impedancia de los capacitores, desgaste de los aislamientos y de los dieléctricos, esto produce que los equipos pierdan gran parte de su vida útil [1].

Las soluciones para el problema de la presencia de armónicos en el sistema eléctrico de potencia son ubicar filtros en el lado de bajo voltaje y reducir pérdidas para mantener los niveles armónicos en los límites permitidos. Para la reducción de armónicos en el sistema, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, con el objetivo de determinar resonancias serie y paralelo.

La distorsión armónica en la red es un problema que afecta a la calidad de energía debido a que se puede llegar a interrumpir la continuidad del servicio [2]. En los sistemas eléctricos las distorsiones en las ondas senoidales de voltaje y corriente son conocidos como armónicos los múltiplos de la frecuencia fundamental, producidos debido a cargas no lineales y frecuentemente a la utilización de aparatos que realicen conmutaciones [3].

Existen regulaciones, estándares y normas las cuales establecen los límites del porcentaje de distorsión armónica en el que puede operar el SEP [4].

El sistema de distribución posee niveles altos de distorsión armónica debido a su cercanía con los usuarios finales, mientras que la cantidad de distorsión armónica en los sistemas de generación y transmisión son bajos [5].

Generalmente, cada carga no lineal producirá una corriente armónica insignificante, pero su efecto combinado producirá una gran corriente armónica [6]. Las cargas lineales se modelan a través de impedancias dependientes de la frecuencia; en tanto que las cargas no lineales inyectan corriente armónica y se representan como fuentes de corriente.

Es importante considerar la influencia de las cargas no lineales en los componentes del sistema eléctrico durante la planificación y la operación de la red de distribución [7]. También cabe mencionar que en redes de distribución se realiza el análisis de armónicos, por lo cual es necesario verificar que la distorsión armónica se encuentre dentro de los límites indicados por las normas pertinentes, también se debe estudiar el aumento de distorsión armónica provocado por fuentes que introducen corriente armónica al sistema y de tal manera poder precisar la validez de las medidas de mitigación.

Los armónicos según como se produzcan pueden ser característicos que son resultado de la introducción de cargas no lineales y los no característicos se producen debido a cambios que suceden en el sistema eléctrico [8]. Para este trabajo de investigación se tomarán en cuenta solo las armónicas características.

La descomposición de una señal armónica en el dominio de la frecuencia es conocida como el espectro armónico, este nos indica la distorsión que poseen algunos elementos como son los transformadores, hornos de arco, motores de inducción, lámparas de descarga entre otras [9].

Los espectros de voltaje y corriente armónica se obtienen de forma distinta, el primero se consigue a partir de mediciones, mientras que el otro es hallado por medio de un proceso de caracterización [10].

Con estos antecedentes, es importante realizar simulaciones de flujo armónico debido a que estos pueden causar diferentes anomalías o pueden presentar repercusiones en el funcionamiento del sistema como las estudiadas en [11].

Este trabajo de investigación se orienta en el desarrollo de una aplicación que resuelva flujos de potencia con presencia de armónicos obteniendo como resultado los niveles de distorsión armónica (THD) existente en cada una de las barras del sistema mediante el uso del Método Frecuencial, existen trabajos relacionados con la simulación de flujos armónicos como [9], el cual se basa en el método iterativo. Otro método para la solución de flujos armónicos es el método híbrido utilizado en [12] el cual exige un análisis tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia lo que lo vuelve más complejo debido a que se establece relación entre los resultados de cada dominio.

El método en dominio del tiempo se realiza mediante Euler y la regla trapezoidal para corregir las oscilaciones numéricas como se indica [13]. Todos estos métodos se diferencian del método frecuencial debido a que este se basa en un proceso de linealización, en inyección de corrientes y saturación de transformadores.

Este trabajo inicia enfocándose en la investigación de armónicos en sistemas eléctricos y consecuentemente a la implementación del método frecuencial basado en el algoritmo iterativo Newton Raphson (NR) para la solución de flujos de potencia. Al modificar el método mencionado anteriormente se consigue la Distorsión Armónica Total (THD) de

voltaje y corriente con los cuales es posible estudiar los niveles armónicos aceptables que deben tener los sistemas eléctricos de potencia.

En la solución del flujo armónico la modelación matemática de cada uno de los componentes del sistema sufre afectaciones debido a que sus reactancias y resistencias varían de acuerdo con la frecuencia del armónico analizado.

El presente trabajo de investigación se detallan los procedimientos a seguir para desarrollar una aplicación mediante la implementación del software Matlab la cual es capaz de resolver flujos de potencia con presencia de contenido armónico; la misma que permite de una manera sencilla la simulación de cargas no lineales, logrando obtener un análisis en cualquier orden armónico que se desee estudiar sea individual o grupal.

El presente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: Sección 1: introducción y precedentes de los sistemas de potencia armónicos. Sección 2: marco teórico relacionado a la presencia de armónicos, mitigación y modelación de elementos armónicos para flujos de potencia en sistemas eléctricos. Sección 3: Modelación e implementación del modelo matemático del método frecuencial para el flujo armónico. Sección 4: análisis de resultados en los sistemas propuestos. Sección 5: conclusiones y trabajos futuros. Sección 6: referencias. Sección 7: anexos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Armónicos en sistemas eléctricos

En la actualidad debido a los diferentes equipos utilizados y al incremento de la demanda existe una gran presencia de armónicos en el sistema eléctrico.

Los armónicos en los SEP se clasifican debido a tres parámetros que definen

correctamente la función del armónico existente en las redes eléctricas [2]. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1 y se definen a continuación:

- Orden: el orden indica cuantas veces es mayor la frecuencia del armónico en base a la fundamental.
- Frecuencia: se obtiene multiplicando la frecuencia fundamental del sistema por el orden del armónico.
- Secuencia: se refiere al giro del armónico con respecto a la fundamental; si la rotación es discreta es secuencia positiva (+), si la rotación es inversa es secuencia negativa (-) y si no tiene sentido de rotación es secuencia cero (0).

Tabla 1. Parámetros de armónicos.

Orden	Frecuencia	Secuencia
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	0
...
N	60*n	...

En sistemas balanceados la secuencia cumple el patrón de la Tabla 1, pero cuando se trata de sistemas con características desbalanceadas, los armónicos puede tener elementos de cada secuencia [9].

Los armónicos de orden par solo aparecen cuando hay asimetría en la señal mientras que los armónicos de orden impar se encuentran en las redes eléctricas.

Para regular la inyección de corrientes armónicos y limitar los niveles de

distorsión armónica total proporcionada por las empresas de distribución, existen una serie de normas Internacionales [7].

En el presente trabajo se utiliza el estándar IEEE 519 “Prácticas Recomendadas y Requerimientos para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”. El estándar estima que los armónicos mayores a 40 son insignificantes y determina los niveles permisibles de distorsión armónica tanto para voltaje como para corriente establecidos para la red [4].

La norma específica que las empresas de distribución de energía y los usuarios deben mantener las distorsiones armónicas de corriente y voltaje en el límite de tolerancia admisible. Para su aplicación se recomienda utilizar valores de diseño del peor caso en condiciones normales de operación del sistema de potencia. Según el estándar es indispensable que las mediciones y el análisis de los límites armónicos se realicen en el punto común de acoplamiento (PCC).

Las características técnicas de las redes eléctricas y de los usuarios varían según el países, y por ese motivo las normas sobre armónicos se desarrollan en base a la problemática de cada país.

En el Ecuador por medio de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) se han establecido niveles máximos para la generación de contenido armónico, los cuales rigen el sistema eléctrico ecuatoriano, basados en la norma IEEE 519-2014 mencionada anteriormente. La Regulación No. 053/18 establecida por el ARCONEL dispone exigencias en la calidad de servicio que deben cumplir las empresas delegadas a la prestación de servicios públicos. El incumplimiento de esta dará lugar a sanciones pertinentes establecidas en la regulación mencionada.

2.2 Fuentes de armónicos

El cambio tecnológico que han tenido los equipos y los programas de eficiencia energética fomentan la utilización de equipos electrónicos que originan malformaciones por consumir energía eléctrica de una forma no continua en el tiempo. Estos aparatos se localizan por toda la red enlazados a los sistemas de bajo y medio voltaje [8]. En la actualidad existen muchas fuentes de armónicos, los principales causantes de las distorsiones armónicas se describen a continuación.

2.2.1 Transformadores

Los transformadores producen armónicos por histéresis magnética y saturación del núcleo. La cantidad de distorsión armónica aumentan a causa de sucesos transitorios [8].

2.2.2 Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL) y Lámparas Led (LED)

Las lámparas producen corrientes armónicas casi despreciables. Pero un gran conjunto de estas crea corrientes armónicas muy elevadas, lo cual produce distorsiones armónicas de voltaje [8].

2.2.3 Máquinas Rotativas

Las maquinas rotativas a causa de los bobinados, las variaciones periódicas, las fallas en los polos y la saturación magnética, provocan distorsiones armónicas a la red [14].

2.2.4 Convertidores de Potencia

Los convertidores debido a su función característica de conexión y desconexión causan corrientes armónicas las cuales se basan en las características de los circuitos de corriente continua y en los parámetros del convertidor [8].

2.2.5 Electrodomésticos

Los electrodomésticos debido a que poseen dispositivos electrónicos para su funcionamiento han provocado que en las redes de distribución aumente la distorsión armónica [8].

2.2.6 Reguladores de Velocidad Ajustables (ASD)

Los ASD son equipos basados en electrónica de potencia que son capaces de regular la velocidad por medio de variación de voltaje y la frecuencia de operación, esto los convierte en fuentes armónicas [14].

2.2.7 Hornos de Arco

El horno de arco produce armónicos de corrientes no periódicas y variantes en el tiempo. Al considerarse como una carga dinámica al horno de arco, las etapas de operación del mismo producen variaciones en el orden y la magnitud de armónicos producidos.

2.2.8 Hornos de Inducción

Los hornos de inducción están formados principalmente por convertidores de potencia, los cuales provocan un gran espectro armónico de corriente. Adicionalmente si las frecuencias de resonancia de la red se hallan en su rango de operación logran ser sintonizadas [8].

2.3 Mitigación de armónicos

Es indispensable tener en cuenta que para controlar la cantidad de armónicos causantes de problemas en los sistemas eléctricos de potencia existen varias acciones que se pueden realizar. Estas soluciones de mitigación deben aislar adecuadamente las distorsiones armónicas, y también reducir los efectos armónicos provocados por las cargas [15].

Los filtros son unas de las medidas correctoras y se deben instalarse lo más cerca posible de las cargas generadoras de

armónicos. A continuación, se explican algunas soluciones para mitigar los armónicos.

2.3.1 Transformadores en Zigzag

Los transformadores en zigzag se instalan entre la carga y el circuito que se desea proteger, son utilizados comúnmente para disminuir la corriente armónica que pasa a través del neutro. Estos se comportan como filtros para el sistema y establecen una ruta de baja impedancia para descartar los elementos armónicos de secuencia cero [7].

2.3.2 Filtros Activos

Los filtros activos son dispositivos que no solo limitan el filtrado de armónicos, también amortiguan y aíslan la propagación armónica, realizan un control de la potencia reactiva con el fin de realizar una regulación de voltaje y obtener la rectificación del factor de potencia [11], [15].

2.3.3 Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son diseñados para desviar las corrientes armónicas existentes en la red por medio de la implementación de rutas de alta o baja. Estos se utilizan con la finalidad de prevenir voltajes armónicos y poder suministrar potencia reactiva al sistema equilibrando el factor de potencia [16].

2.3.4 Filtros Pasivos Serie

La composición interna de estos filtros es capaz de operar en condiciones nominales, al igual que soportar cortocircuitos que se produzcan en el sistema; está formado por una carga en serie conectada a un circuito resonante en paralelo [17].

2.3.5 Filtros Pasivos en derivación

Este tipo de filtros crean una ruta de baja impedancia para lograr redirigir el camino

de la corriente armónica de una frecuencia, están formados mediante la impedancia de la red en paralelo con un circuito resonante en serie [17].

2.4 Cuantificación de armónicos

Cuando se analiza la propagación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia es indispensable utilizar series de Fourier. Mediante esta herramienta matemática se puede encontrar el contenido armónico [18].

Siempre que las señales eléctricas sean funciones periódicas se pueden aplicar las series de Fourier. Conociendo la relación entre la frecuencia y el periodo mostrada en la ecuación (6) se expresa la ecuación (1) correspondiente a la serie de Fourier en función de su frecuencia angular con sus correspondientes armónicos.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nw_0t + b_n \sin nw_0t) \quad (1)$$

Siendo:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(wt) dwt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(wt) \cos(nw_0t) dwt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(wt) \sin(nw_0t) dwt \quad (4)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (5)$$

$$w_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

Donde:

- n Es un numero entero positivo.
- a_0 Valor medio de la función $f(t)$.
- a_n, b_n Componentes rectangulares del n -ésimo armónico.

- θ_n Angulo de fase del n-ésimo armónico.
 w_0 Frecuencia angular en rad/seg

La serie de Fourier es la superposición de señales, para la mayoría de los casos la transformada de Fourier el coeficiente a_0 es igual a cero [19]. Si se conoce la amplitud y la fase la serie de Fourier se puede expresar como:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin(nw_0t + \theta_n)) \quad (7)$$

Siendo:

$$c_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(wt) e^{-jnwt} dwt \quad (8)$$

Donde:

- c_n Magnitud del n-ésimo armónico.

El termino c_n se obtiene a través de la integración compleja como se muestra en la ecuación (8). Por medio de series de Fourier se puede representar la forma de onda distorsionada de voltaje y corriente.[20]

$$v(t) = \sum_{K=1}^{\infty} V_K \sin(kW_0t + \theta_K) \quad (9)$$

$$i(t) = \sum_{K=1}^{\infty} I_K \sin(kW_0t + \theta_K) \quad (10)$$

2.5 Distorsión Armónica Total (THD)

La forma de la onda fundamental se altera cuando se suman una o más componentes armónicas, esto se conoce como distorsión armónica total (THD) [21]. Para poder determinar la mayor o menor presencia de armónicos de un sistema se utiliza el THD. Los índices de distorsión

armónica en Ecuador se calculan hasta el orden 50.

Analíticamente la distorsión armónica total de voltaje o corriente está definida como la relación entre la sumatoria de los valores RMS del segundo al último armónico y el valor RMS del primer armónico como se expresa en la ecuación (11).

$$THD_X = \frac{\sum X_{RMS} (2do Armonico en adelante)}{X_{RMS} (1er Armonico)} \quad (11)$$

$$THD_X = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (X_{KRMS})^2}}{X_{1RMS}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Donde:

- X Corriente o voltaje.
 X_K Armónico de orden k de voltaje o corriente
 X_{1RMS} Valor eficaz de la corriente o voltaje del armónico fundamental

2.5.1 Distorsión Armónica de Voltaje

Para encontrar los índices de distorsión armónica de voltaje individual y total se utilizan las siguientes formulas.

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \cdot \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \cdot 100 [\%] \quad (13)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_n} \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

$$THD_V = \left[\frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

Donde:

- $V_{h,k}$ Armónico de voltaje h en el intervalo k.

- $V_{h,i}$ Valor eficaz de la armónica de voltaje h, medido cada 3 segundos.
- $DV_{h,k}$ Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h en el intervalo.
- THD_V Factor de distorsión armónica total de voltaje.
- V_n Voltaje nominal en el punto de medición.

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \cdot \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \cdot 100 [\%] \quad (16)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_L} \cdot 100 [\%] \quad (17)$$

$$THD_I = \left[\frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,K})^2} \right] \cdot 100 [\%] \quad (18)$$

Los límites máximos de distorsión armónica individual de voltaje y distorsión armónica total de voltaje se muestran a continuación [5].

Tabla 2. Límites máximos de armónicos de voltaje.

Nivel de voltaje	Armónico individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje (≤ 0.6 kV)	5	8
Medio Voltaje (> 0.6 y < 40 kV)	3	5
Alto Voltaje (> 40 y < 138 kV)	1.5	2.5
Alto Voltaje (> 138 kV)	1	1.5

La distorsión armónica de voltaje se da debido a fuentes que inyectan corriente armónica a la red; la cual depende de la potencia del usuario, el nivel de voltaje al que está conectado y al número del armónico. Si se excede cualquier valor que se muestra en la Tabla 2, se considera que la medición de THD de voltaje está fuera del rango permitido.

2.5.2 Distorsión Armónica de Corriente

Para hallar la distorsión armónica de corriente tanto individual como total se utiliza los siguientes índices.

Donde:

$I_{h,k}$ Armónico de corriente h en el intervalo k.

$I_{h,i}$ Valor eficaz de la armónica de corriente h, medido cada 3 segundos.

$DI_{h,k}$ Factor de distorsión individual de corriente de la armónica h en el intervalo k.

THD_I Factor de distorsión armónica total de corriente.

I_L Corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (60 Hz).

A continuación, se detallan los límites de la distorsión armónica individual y total de la corriente [5].

Tabla 3. Límites máximos de distorsión armónica de corriente.

I_{CC}/I_L	% de la corriente máxima de demanda					T H D
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8
$50 < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Se considera que el consumidor incumple los límites establecidos cuando la medición reporta que la distorsión armónica de corriente ha excedido el rango de tolerancia determinado en la Tabla 3 en un lapso mayor al 5% del tiempo empleado para la medición.

2.6 Modelos de elementos del sistema de potencia en condiciones armónicas

Existen una gran cantidad de componentes que forman el sistema eléctrico de potencia, por lo cual se han determinado modelos los cuales representan a cada elemento, esto hace que el análisis sea más sencillo.

Tabla 4. Tipos de barras en flujos de potencia.

Barra Tipo	Descripción
Slack	Barra oscilante: su voltaje (V_i) y ángulo (θ_i) son fijos, es única en el sistema se asocia al generador más grande, se desconoce la potencia activa (P_i) y la potencia reactiva (Q_i).
PV	Barra de generación: son conocidas el módulo del voltaje (V_i) y la potencia activa (P_i), son desconocidas la potencia reactiva (Q_i) del generador y ángulo (θ_i) del voltaje en la barra
PQ	Barra de carga: se conoce la potencia activa (P_i) y la potencia reactiva (Q_i) inyectadas, se desconoce el voltaje (V_i) y el ángulo (θ_i) de la barra.
ZIB	Barra de inyección cero: no tiene ningún generador para inyectar energía, ni cargas para consumirla. Por lo tanto, la suma de todas las corrientes de sus ramas adyacentes es igual a cero.

Para la modelación de sistemas eléctricos de potencia se comienza con un grupo de nodos o también conocidos como barras las cuales se dividen en tres tipos como se muestra en la

Tabla 4 esta clasificación depende de los componentes que se encuentren conectados a ellas [22] [23]. En las barras se pueden conectar líneas,

transformadores, generadores y cargas entre otras.

A continuación, se describe como se modelan los elementos más comunes de los sistemas eléctricos de potencias en condiciones armónicas.

2.6.1 Generadores

Los generadores se modelan conectando en serie una resistencia y una reactancia como se muestra en la Figura 1, las cuales varían en función de la frecuencia. Casi siempre el valor de la resistencia se omite por ser un valor muy pequeño a frecuencia fundamental [24].

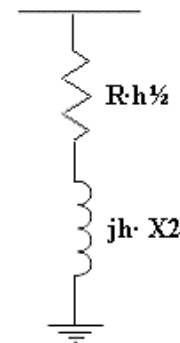


Figura 1. Generador.

Los generadores consideran su reactancia en secuencia negativa al realizar el análisis armónico. Esta se da a frecuencia fundamental y se muestra en la ecuación (19).

$$X_2 = \frac{[Xd'' + Xq'']}{2} \quad (19)$$

Donde:

X_2 Reactancia de secuencia negativa a frecuencia fundamental.

Xd'' Reactancia subtransitoria de eje directo.

Xq'' Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura.

Para modelar un generador sincrónico en un flujo armónico se emplea la

ecuación (20) y la ecuación (21) para encontrar el valor de la reactancia (X) y de la resistencia (R) respectivamente.

$$X_2^h = h \cdot X_2 \quad (20)$$

$$R^h = R \cdot \sqrt{h} \quad (21)$$

2.6.2 Transformadores

Cuando el núcleo ferromagnético del transformador se encuentra cerca de los límites de saturación se presentan los sistemas eléctricos de corrientes armónicas [25].

El funcionamiento del transformador por naturaleza opera en la región lineal donde la corriente de magnetización y el flujo magnético son directamente proporcionales [26]. No obstante, esta relación puede presentar afectaciones cuando el núcleo magnético se llega a saturar lo que genera que el transformador trabaje en su región no lineal.

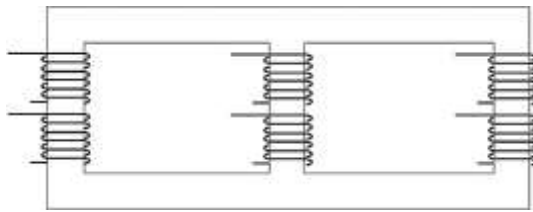


Figura 2. Transformador.

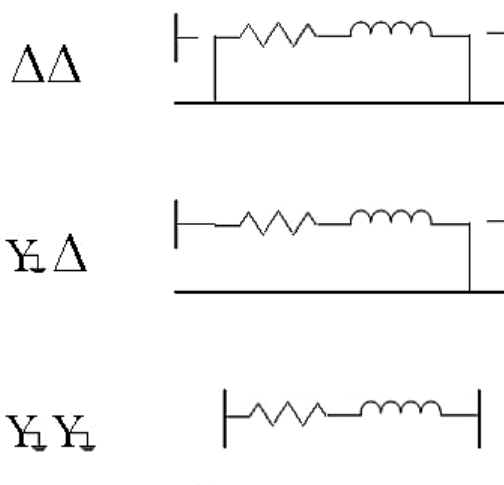


Figura 3. Redes de secuencia cero de transformador.

Para realizar los cálculos se utiliza la ecuación (20) que toma en cuenta la reactancia del transformador en función de la frecuencia, la resistencia permanece constante.

Se debe considerar que para crear la matriz Y de barra en cada frecuencia de orden 3n se simulan los transformadores por medio de la secuencia cero. Las conexiones existentes que se aplican a los transformadores se detallan en la Figura 3.

2.6.3 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión para el análisis de armónicos se representan mediante el modelo π de parámetros distribuidos para todas las frecuencias.

Para su simulación se deben considerar el efecto piel y la longitud de la línea [27]. El modelo π se utiliza para distancias mayores al 5% de la longitud de onda (λ).

La longitud de onda se encuentra mediante la relación entre la velocidad de la luz (c) y la frecuencia del armónico (f).

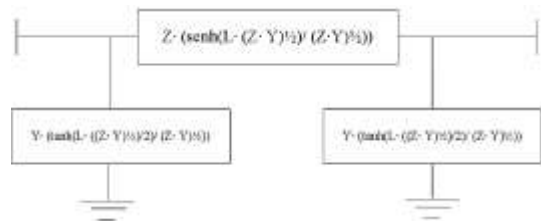


Figura 4. Modelo π de una línea de transmisión.

Los parámetros de la Figura 4 se expresan a continuación.

$$Z = R + jhX_L \quad (22)$$

$$Y = j \frac{h}{X_c} \quad (23)$$

Donde:

R Resistencia de la línea de transmisión por la longitud.

X_L Reactancia inductiva de la línea de transmisión por la longitud.

- X_C Reactancia capacitiva de la línea de transmisión por la longitud.
- h Numero de armónico.

Para el cálculo del efecto piel se utiliza la siguiente expresión.

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \left(1 + \frac{0,646 \cdot h^2}{192 + 0,518 \cdot h^2} \right) \quad (24)$$

Donde:

- R_{AC} Efecto piel.
- R_{DC} Resistencia DC de la línea de transmisión.

2.6.4 Cargas

El comportamiento de las cargas varia ante los cambios del voltaje y la frecuencia, esto dificulta su modelamiento en los sistemas eléctricos de potencia [28]. A continuación, se indican los modelos existentes de cargas utilizados para el análisis de armónicos con sus respectivas ecuaciones.

- Modelo serie: la representación de las cargas en serie se observa en la Figura 5 y para ser modeladas se utilizan las ecuaciones (25) y (26).

$$R = P \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \quad (25)$$

$$X = Q \cdot \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \quad (26)$$

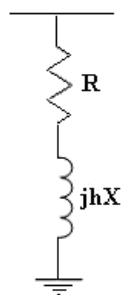


Figura 5. Carga en serie.

- Modelo paralelo: las ecuaciones (27) y (28) son utilizadas para la

obtención de la impedancia de las cargas en paralelo, su representación gráfica se muestra en la Figura 6.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (27)$$

$$X = \frac{V^2}{Q} \quad (28)$$

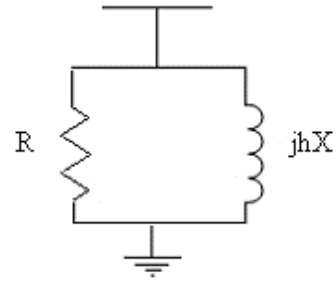


Figura 6. Carga en paralelo.

- Modelo efecto piel: su grafica se muestra Figura 7 y se representa con las siguientes ecuaciones.

$$R(h) = \frac{V^2}{m(h) \cdot P} \quad (29)$$

$$X(h) = \frac{V^2}{m(h) \cdot Q} \quad (30)$$

$$m(h) = 0,1 \cdot h + 0,9 \quad (31)$$

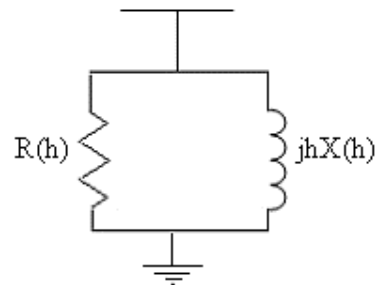


Figura 7. Carga con efecto piel.

- Modelo motor de inducción más resistencia: se encuentra modelado por la Figura 8 y por las ecuaciones (32) y (33).

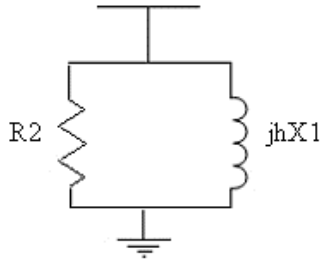


Figura 8. Motor de inducción y resistencia.

- Modelo de cargas de transformadores y amortiguamiento de motores: utiliza las siguientes ecuaciones y su grafica se indica en la Figura 9.

$$R_2 = \frac{V^2}{(1 - K) \cdot P} \quad (32)$$

$$X_1 = \frac{V^2}{Km \cdot K1 \cdot K \cdot P} \quad (33)$$

$$X_2 = 0,1 \cdot R_2 \quad (34)$$

$$R_1 = \frac{X_1}{K_3} \quad (35)$$

$$k_1 = \frac{I_{RB}}{I_{nom}} \quad (36)$$

Donde:

- K_m Factor de instalación $\approx 1,2$.
- K_1 Factor de severidad ≈ 8 .
- K Fracción de la carga motora.
- I_{RB} Corriente del rotor bloqueado
- I_{nom} Corriente nominal

La relación que existe entre la potencia aparente nominal y la que consume el motor se conoce como factor de instalación.

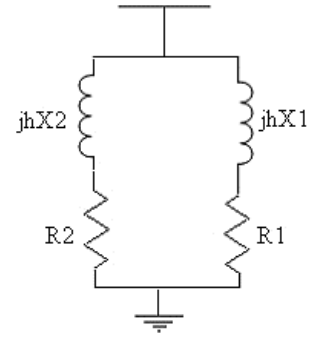


Figura 9. Cargas de transformadores y amortiguamiento de motores.

2.6.5 Compensadores

Los SVC (compensadores estáticos de potencia reactiva) se utilizan en sistemas eléctricos de alto voltaje; estos inyectan corrientes armónicas en función del ángulo de disparo del tiristor, del voltaje en la barra donde se conecta el compensador y de la reactancia a ser controlada [29]. La función se muestra en la ecuación (37).

$$I_h = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V}{X} \left[\frac{\sin(b+1)\alpha}{2(b+1)} + \frac{\sin(b-1)\alpha}{2(b-1)} - \cos \alpha \frac{\sin b\alpha}{b} \right] \quad (37)$$

Donde:

- b $2h+1, h=1,2,3\dots$
- V Voltaje de línea fundamental.
- X Reactancia del compensador.
- α Angulo de disparo.

Obtenido el espectro armónico se puede calcular el equivalente Norton del compensador mediante una fuente de corriente conectada a una admitancia en paralelo a como en la Figura 10.

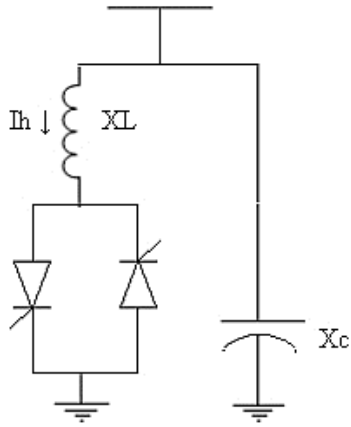


Figura 10. Configuración SVC con banco de capacitores.

Para las frecuencias armónicas se plantean las siguientes ecuaciones:

$$Y_{h-eq} = \frac{1}{j\omega L_{eq}} = \frac{1}{j\omega X_{eq}} \quad (38)$$

$$I_{h-eq} = \frac{V_h}{j\omega L_{eq}} - I_h = V_h \cdot Y_{h-eq} - I_h \quad (39)$$

$$L_{eq} = \pi \cdot \frac{L}{\sigma - \sin \sigma} \quad (40)$$

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (41)$$

Donde:

- L Inductancia de la rama serie.
- σ Ángulo de conducción del SVC en radianes.

3 FORMULACIÓN DEL MÉTODO FRECUENCIAL PARA FLUJO ARMÓNICO

Para desarrollar la aplicación se empleó el software Matlab mediante la herramienta de interfaz gráfica Guide, la cual permite diseñar pantallas en las que se pueden colocar botones, graficas, tablas, texto y muchas cosas más según se desee. Para establecer la frecuencia fundamental se colocó una caja de texto para que el usuario ingrese el valor de la frecuencia

en la que se desee trabajar, y mediante un botón se ejecuta el cálculo del flujo armónico para poder visualizar las respuestas obtenidas por el programa en forma de tablas y graficas.

Para utilizar la aplicación se deben conocer los espectros que poseen los elementos que inyectan los armónicos al sistema; debido a que los espectros tienen que ser ingresados como datos del sistema para que el programa resuelva el flujo armónico. Todos los datos del sistema se ingresan por unidad mediante un archivo xls en el cual se detallan los datos que se deben ingresar para que el programa funcione correctamente; ingresar bien los datos es lo más importante para que la aplicación entregue las respuestas correctas.

El algoritmo utilizado en la aplicación para la simulación de flujos de potencia con presencia de contenido armónico es considerado como método frecuencial debido a que los parámetros del sistema cambian con la frecuencia, ya que se realiza un análisis de orden armónico.

Para hallar la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de potencia mediante el método frecuencial, primero se debe obtener las variables eléctricas en cada una de las barras por medio del algoritmo de Newton Raphson Completo a frecuencia fundamental. Después se procede con el cálculo de la matriz Y de barra para cada una de las frecuencias tomando en cuenta la impedancia interna de los generadores y la impedancia de las cargas [30]. Con esto se calcula las corrientes armónicas inyectadas al sistema y así se puede encontrar la distorsión armónica total (THD) de voltaje y corriente [31].

3.1 Modelación matemática

Una de las restricciones que deben cumplir los flujos es el balance de

potencia por medio de las ecuaciones (42) y (43).

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (42)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (43)$$

La matriz Jacobiano relaciona las potencias activas y reactivas con los voltajes y ángulos de las barras por medio de derivadas [30].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (45)$$

Siendo:

$$H_{ij} = \frac{dP_i}{d\theta_j} \quad (46)$$

$$N_{ij} = |V_j| \frac{dP_i}{dV_j} \quad (47)$$

$$L_{ij} = \frac{dQ_i}{d\theta_j} \quad (48)$$

$$M_{ij} = |V_j| \frac{dQ_i}{dV_j} \quad (49)$$

Los elementos H, N, L, M del Jacobiano son matrices cuadradas, las cuales son calculadas por medio de las siguientes ecuaciones.

Para los elementos fuera de la diagonal ($i \neq j$) se utilizan las ecuaciones (50) y (51).

$$H_{ij} = L_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (50)$$

$$N_{ij} = M_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (51)$$

Para los elementos de la diagonal ($i=j$) se utilizan las ecuaciones que se expresan a continuación.

$$H_{ij} = -Q_i - B_{ii} V_i^2 \quad (52)$$

$$L_{ij} = Q_i - B_{ii} V_i^2 \quad (53)$$

$$N_{ij} = P_i + G_{ii} V_i^2 \quad (54)$$

$$M_{ij} = P_i - G_{ii} V_i^2 \quad (55)$$

Por medio de la ecuación (44) se obtienen las correcciones de ángulo y voltaje con los cuales se obtienen los valores reales de voltaje y ángulo en las barras.

Utilizando el método de Newton Raphson para resolver el flujo de potencia a la frecuencia fundamental, se obtuvo todas las variables eléctricas del sistema. Conociendo estos datos se procede a resolver el flujo de potencia con presencia de contenido armónico mediante el método frecuencial.

El método frecuencial se basa en procesos de linealización que consiste en hallar equivalentes de Norton para frecuencias armónicas alrededor de un punto cercano al punto de operación real considerando las características de los elementos. A continuación, se explica la creación de la matriz de admitancia para las frecuencias armónicas [32], esta se calcula como la Y de barra pero se debe considerar las impedancias tanto de los generados como de las cargas para cada una de las frecuencias que se desee analizar.

Para los elementos de la diagonal, se considera una suma de todas las admitancias que se encuentren conectadas a la barra i sin excepción.

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} + \sum_{j=1}^n Y_{ji} \quad (56)$$

Para los elementos fuera de la diagonal, es la sumatoria las admitancias mutuas que se encuentren conectadas entre las barras (i-j). Si no hay alguna

admitancia entre las barras (i-j) el termino sería cero.

$$Y_{ij} = Y_{ji} = - \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (57)$$

Después de haber obtenido la matriz de admitancia para cada frecuencia se calcula la corriente de carga a frecuencia fundamental mediante la ecuación (58); conociendo este valor y el espectro, se calcula la magnitud y el ángulo de la corriente armónica inyectada para todas las frecuencias por medio de las ecuaciones (59) y (60) respectivamente [33].

$$I_1 = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad (58)$$

$$I_h = I_1 \frac{I_{h-esp}}{I_{1-esp}} \quad (59)$$

$$\theta_h = \theta_{h-esp} + h(\theta_1 - \theta_{1-esp}) \quad (60)$$

Donde:

- I_1 Amplitud de la corriente fundamental.
- I_h Amplitud de la corriente armónica en orden h.
- I_{h-esp} Amplitud del espectro de corriente armónica en orden h.
- θ_1 Angulo de la corriente fundamental.
- θ_h Angulo de la corriente armónica en orden h.
- θ_{1-esp} Angulo del espectro de corriente armónica en orden h.

La saturación de los transformadores produce corrientes armónicas, las cuales se encuentran aplicando la ecuación (10); con todas estas corrientes se forma un vector de las corrientes armónicas inyectadas al sistema.

Mediante las ecuaciones (61) y (62) se linealiza cada componente del sistema;

mientras que para cada función no lineal se utiliza la ecuación (63).

$$\Delta V = V - V_b \quad (61)$$

$$\Delta I = I - I_b \quad (62)$$

$$\Delta I = [J] \cdot \Delta V \quad (63)$$

Al reemplazar las ecuaciones (61) y (62) en la ecuación (63) se obtiene:

$$I_N = I_b - [J] \cdot V_b \quad (64)$$

Donde:

- I_N Equivalente Norton para elementos no lineales.
- I_b, V_b Valores cercanos al punto de operación.

Combinando los elementos lineales y no lineales en la matriz de admitancias se tiene la ecuación (65) mediante la cual se obtienen los voltajes armónicos de las barras para cada una de las frecuencias.

$$[Y] \cdot V = I \quad (65)$$

Donde:

- $[Y]$ Matriz de admitancias de barra.
- V Vector de voltaje de barra.
- I Vector de inyección de corrientes con un solo elemento diferente de cero.

Se debe comprobar que los voltajes armónicos cumplan el criterio de convergencia caso contrario se debe volver a calcular las corrientes generadas por los transformadores saturados y finalmente se encuentran los valores de THD utilizando las ecuaciones (15) y (18) [34].

3.2 Implementación del método en el software Matlab

El modelo matemático propuesto en este trabajo es realizado en el software

MATLAB. En la aplicación se puede analizar cualquier sistema eléctrico de potencia balanceado, siempre y cuando se conozcan los espectros armónicos que poseen los elementos, debido a que está diseñado para hallar la distorsión armónica que existen en las barras las cuales son producidas por elementos que introducen armónicos al sistema de potencia.

Para demostrar el funcionamiento del código diseñado se utilizan dos sistemas de prueba los cuales son explicados a detalle en la sección 3.3

El método de Newton Raphson Completo se utiliza para obtener las variables eléctricas del flujo de potencia a una frecuencia fundamental. El proceso utilizado en este trabajo de investigación se detalla en el flujograma de la Figura 11.

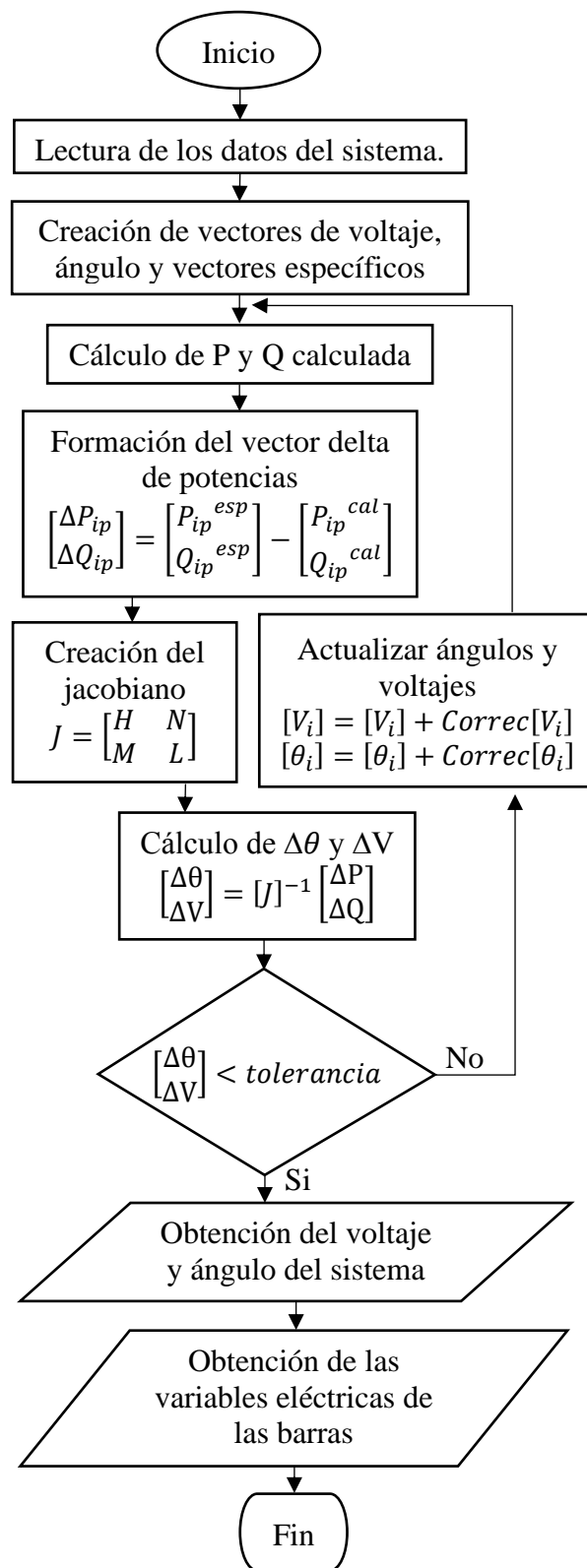


Figura 11. Flujograma del método de Newton Raphson.

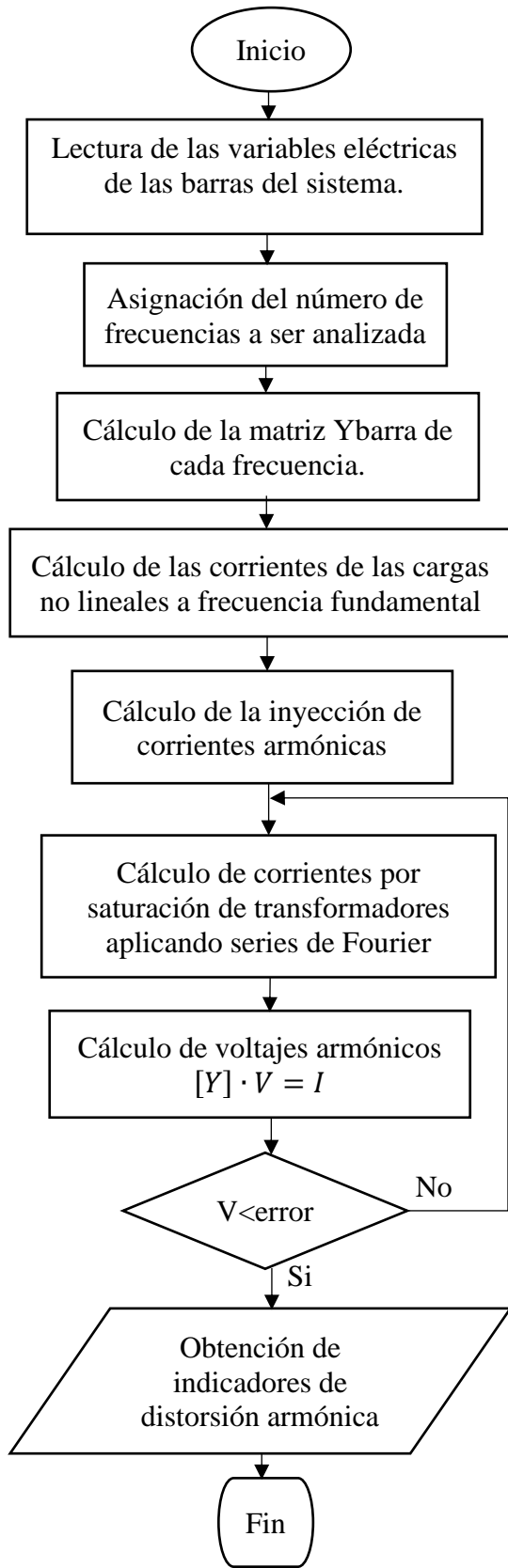


Figura 12. Flujoograma del método frecuencial.

En base a los resultados obtenidos de las variables eléctricas mediante el procedimiento del flujoograma de la Figura 11 se procede a implementar el método frecuencial para flujos armónicos, el cual mediante el cálculo de series de Fourier para encontrar las corrientes por saturación del transformador y por medio del cálculo de corrientes armónicas inyectadas al sistema se obtienen los índices de distorsión armónica total (THD) de todas las barras de sistema. Este proceso se explica en el flujoograma de la Figura 12.

3.3 Sistemas de prueba

Para la comprobación del código desarrollado en el cual se utiliza la metodología descrita anteriormente, se emplean dos sistemas de prueba de los cuales se obtienen los valores de las potencias, de los voltajes y de los ángulos de cada barra. También se calcula la corriente y el voltaje en todas las barras para cada una de las frecuencias y así poder encontrar el THD de voltaje y corriente.

3.3.1 Sistema 1

Este sistema es el IEEE de 14 barras tomado de [9], cuyo diagrama se muestra en la Figura 13.

Este sistema está formado por 14 barras físicas y por dos barras de simulación que corresponden a los convertidores de 6 pulsos para la simulación del HVD, las cuales se encuentran conectados en la barra 301 y 302 a través de dos transformadores (YY) y (YD) respectivamente, estas poseen dos filtros para el armónico 11. Mientras que en la barra 8 está conectado un compensador estático de potencia reactiva (SVC) en delta, no genera armónicos de tercer orden y en los armónicos de orden 2, 5, 7, 11 existen filtros.

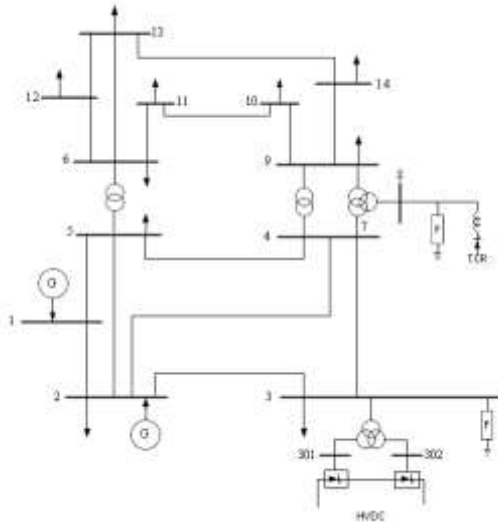


Figura 13. Diagrama del sistema IEEE de 14 barras.

Los espectros armónicos que se inyectan al sistema se muestran en la Tabla 5, en la Tabla 6, y en la Tabla 7.

Los datos completos del sistema, de las líneas, de los transformadores, de los generadores y de los compensadores se muestran en la sección de anexos.

Tabla 5. Espectro armónico Barra 301.

Armónico	Barra 301	
	Magnitud	Angulo
1	1	-49.56
5	0.1941	-67.77
7	0.1309	11.9
11	0.0758	-7.13
13	0.0586	68.57
17	0.0379	46.53
19	0.0329	116.46
23	0.0226	87.47
24	0.0241	159.32
29	0.0193	126.79

Tabla 6. Espectro armónico Barra 302.

Armónico	Barra 302	
	Magnitud	Angulo
1	1	-49.56
5	0.1941	-67.77
7	0.1309	11.9
11	0.0758	-7.13

13	0.0586	68.57
17	0.0379	46.53
19	0.0329	116.46
23	0.0226	87.47
24	0.0241	159.32
29	0.0193	126.79

Tabla 7. Espectro armónico Barra 8.

Armónico	Barra 8	
	Magnitud	Angulo
1	1	46.92
5	0.0702	-124.4
7	0.025	-29.87
11	0.0136	-23.75
13	0.0075	71.5
17	0.0062	77.12
19	0.0032	173.43
23	0.0043	178.02
24	0.0013	-83.45
29	0.004	-80.45

3.3.2 Sistema 2

Este sistema de prueba fue tomado de [10], y su diagrama se indica en la Figura 14.

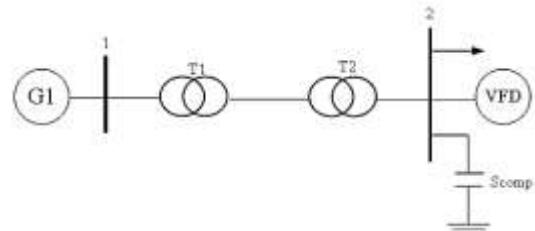


Figura 14. Diagrama del sistema de 2 barras.

El sistema trabaja con una base de 100 MVA, los valores de las potencias de carga y compensación están en MVA. La conexión de los dos transformadores es YY conectados a tierra.

El sistema consta de dos barras, la barra 1 es la slack mientras que en la barra 2 se encuentra conectado un controlador de frecuencia variable (VFD), el cual se modela como una carga de potencia constante para el flujo de potencia. Los datos del espectro armónico que se

inyecta en el sistema para las frecuencias armónicas se muestran en la Tabla 8. Los datos completos de todo el sistema se muestran en los anexos.

Tabla 8. Espectro armónico del controlador de frecuencia variable (VFD).

Armónico	VFD	
	Magnitud	Angulo
1	1	89.48
3	0.00442	-58.09
5	0.23216	-122.92
7	0.03419	-136.34
9	0.00459	150.75
11	0.07842	22.19
13	0.02943	-16.23

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicación realizada mediante el software Matlab es un código abierto lo que permite tener acceso a la programación utilizada para su desarrollo y así poder tener un mayor entendimiento del método frecuencial basado en el algoritmo de Newton Raphson Completo para la resolución de flujos de potencia con presencia de contenido armónico.

La aplicación consta de tres pantallas la pantalla principal como se indica en la Figura 15 muestra el tema de la aplicación y posee un botón de inicio el cual lleva a la segunda pantalla.

La pantalla de la Figura 16 posee tablas en las cuales se visualizan todos los datos del sistema los cuales son ingresados mediante un archivo xlsx; al igual que la pantalla principal posee un botón llamado cálculos el cual abre la pantalla final.

La Figura 17 muestra la tercera pantalla en la cual se ingresa la frecuencia fundamental, esta varía según el país, en el caso de Ecuador se utiliza 60 Hz como frecuencia fundamental. Después de ingresar la frecuencia a la que se desea trabajar se presiona el botón calcular y automáticamente la aplicación mediante el código implementado visualiza los resultados del flujo de potencia a frecuencia fundamental, los resultados del THD tanto de corriente como de voltaje para cada barra y se visualizan las gráficas de los espectros que inyecta armónicos al sistema en sus respectivas barras.



Figura 15. Pantalla principal



Figura 16. Pantalla de los datos del sistema.



Figura 17. Pantalla de resultados.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los sistemas de prueba.

4.1.1 Sistema 1

Al realizar la simulación del sistema de prueba se obtuvo las respuestas del flujo de potencia a frecuencia fundamental, las respuestas de los voltajes y ángulos se detallan en la Tabla 9, y en la Tabla 10 se indican las potencias de carga y generación de cada una de las barras del sistema.

Tabla 9. Respuestas de voltaje y ángulo del flujo fundamental.

Barra	Voltaje [p.u.]	Angulo [°]
1	1.060	0
2	1.045	-5.676
3	1.044	-15.287
301	1.043	-16.165
302	1.043	-16.165
4	1.030	-11.411
5	1.035	-9.818
6	1.070	-15.862
7	1.020	-14.468
8	1.022	-14.491

9	1.016	-16.083
10	1.017	-16.324
11	1.040	-16.202
12	1.053	-16.704
13	1.046	-16.72
14	1.016	-17.38

Tabla 10. Respuestas de las potencias del flujo fundamental.

Barra	Pg [MW]	Qg [Mvar]	Pc [MW]	Qc [Mvar]
1	261.701	-30.044	0	0
2	18.3	2.366	0	0
3	0	0	0	0
301	0	0	59.505	3.363
302	0	0	59.505	3.363
4	0	0	47.79	-3.9
5	0	0	7.599	1.599
6	-11.2	43.347	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	12.9
9	0	0	29.499	16.599
10	0	0	9	5.799
11	0	0	3.501	1.8
12	0	0	6.099	1.599
13	0	0	13.5	5.799
14	0	0	14.901	5.001

Tabla 11. Respuestas del THD en el sistema de 14 barras.

Barra	THD _V [%]	THD _I [%]
1	7.38	0
2	7.02	0
3	12.65	0
301	15.49	26.07
302	12.68	26.07
4	6.20	0
5	6.64	0
6	3.78	0
7	4.96	0
8	3.98	7.67
9	6.03	0
10	6.00	0
11	4.47	0
12	4.00	0
13	4.01	0
14	6.01	0

Los índices de distorsión armónica total se visualizan en la Tabla 11, el THD tanto de corriente como de voltaje se

encuentran fuera de los límites especificados por la Regulación Ecuatoriana No. 053/18 mencionada anteriormente, por lo tanto, es indispensable tomar las medidas necesarias para mitigar los armónicos en el sistema.

Como método de contraste se utiliza el software DlgSILENT PowerFactory, y los resultados se indican en la Tabla 12, con esto se da una validación al código propuesto en este trabajo de investigación.

Tabla 12. Resultados del THD del sistema de 14 barras en el software DlgSILENT Power Factory.

Barra	THD _V [%]	THD _I [%]
1	7.41	0
2	7.06	0
3	12.70	0
301	15.53	26.13
302	12.74	26.13
4	6.27	0
5	6.69	0
6	3.88	0
7	4.99	0
8	4.03	7.72
9	6.07	0
10	6.11	0
11	4.54	0
12	4.05	0
13	4.06	0
14	6.04	0

Previo al análisis del flujo de potencia con presencia de contenido armónico realizado al sistema IEEE 14 barras, la distorsión armónica de este se mantenía en 0% en todas las barras del sistema; pero al momento de colocar los elementos que inyectan armónicos al sistema mostrados en la Figura 13 se incrementó la distorsión armónica dando como resultado los valores descritos en la Tabla 11. Con los espectros obtenidos en el desarrollo del cálculo del THD de corriente se puede reconstruir las formas de onda de las corrientes de las cargas

distorsionadas, como se muestran en la Figura 18 y Figura 19.

En la Figura 20 y Figura 21 se indica la distorsión armónica total de corriente y voltaje respectivamente. Se puede observar que las cargas no lineales poseen mayor distorsión. Cabe mencionar que en las gráficas las barras 4 y 5 corresponden a las barras 301 y 302 respectivamente; por lo tanto, la barra 6 viene a ser la 4 y así sucesivamente.

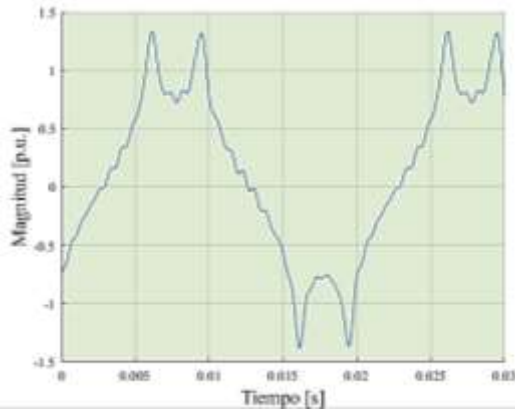


Figura 18. Espectro de corriente en la barra 301 y 302 del sistema IEEE de 14 barras.

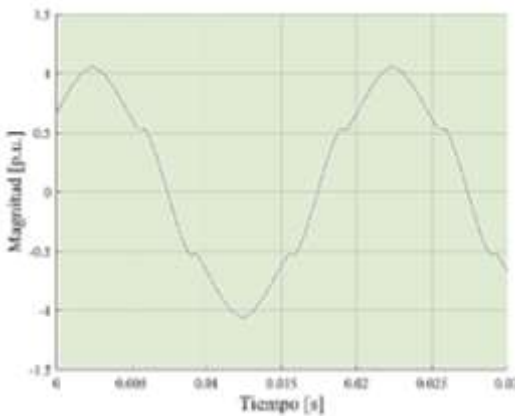


Figura 19 Espectro de corriente en la barra 8 del sistema IEEE de 14 barras.

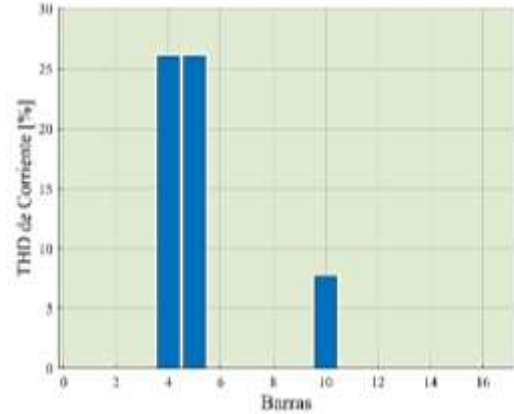


Figura 20. Resultados del THD de corriente del sistema IEEE de 14 barras.

El análisis realizado muestra la distorsión armónica producida en las barras debido a los elementos no lineales del sistema, por estos elementos se produce un incremento del THD de voltaje en cada una de las barras; a pesar que solo 3 barras poseen cargas no lineales, de las barras que no se encuentran conectadas a cargas que inyectan contenido armónicos al sistema se obteniendo que la barra 3 posee mayor distorsión armónica de 12.65% y la barra 6 posee la menor distorsión armónica con 3.78%.

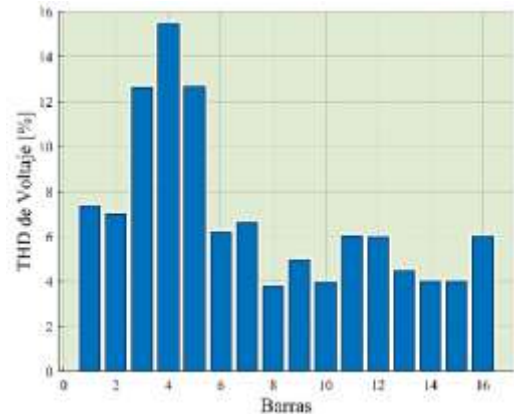


Figura 21. Resultados del THD de voltaje del sistema IEEE de 14 barras.

4.1.2 Sistema 2

Al realizar la simulación del sistema de prueba 2 se obtienen las respuestas del flujo de potencia a frecuencia

fundamental, los cuales se detallan en la Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 13. Respuestas de voltaje y ángulo del flujo a frecuencia fundamental.

Barra	Voltaje [p.u.]	Angulo [°]
1	1.0380	3.63
2	1.000	0

Tabla 14. Respuestas de las potencias del flujo fundamental.

Barra	Pg [MW]	Qg [Mvar]	Pc [MW]	Qc [Mvar]
1	40.10	22.28	0	0
2	0	0	40	20

En este sistema podemos observar que al resolver el flujo de potencia armónico los resultados del THD de voltaje en la barra 2 se encuentra fuera del límite permitido por la normativa utilizada, mientras que el THD de corriente cumple con esta normativa. Los resultados se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15. Respuestas del THD en el sistema de 2 barras.

Barra	THD_V [%]	THD_I [%]
1	0.301	3.63
2	5.717	0

Los resultados obtenidos con el software DIGSILENT Power Factory se muestran en la Tabla 16 estos valores son semejantes a las respuestas del código propuesto en este trabajo con una pequeña variación debido a la apreciación de los decimales.

Tabla 16. Resultados del THD del sistema de 2 barras en el software DIGSILENT Power Factory.

Barra	THD_V [%]	THD_I [%]
1	0.310	3.69
2	5.725	0

Las formas de onda de las corrientes de las cargas distorsionadas se reconstruyen con los espectros de corriente, como se indica en la Figura 22. En la Figura 23 y Figura 24 se muestra el THD de corriente y voltaje respectivamente.

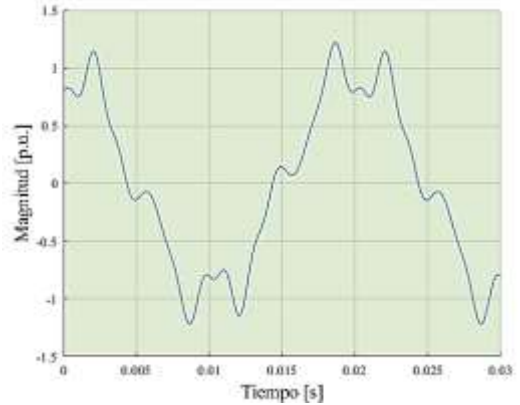


Figura 22 Espectro de corriente en la barra 2 del sistema de 2 barras.

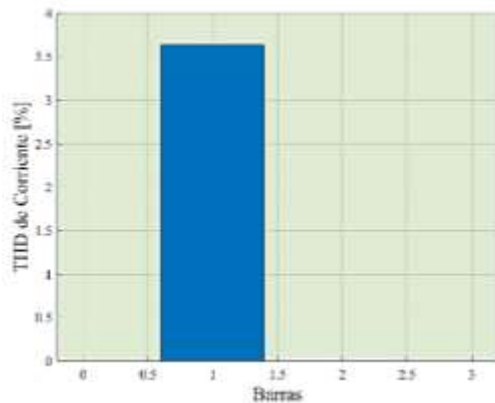


Figura 23. Resultados del THD de corriente del sistema 2 barras.

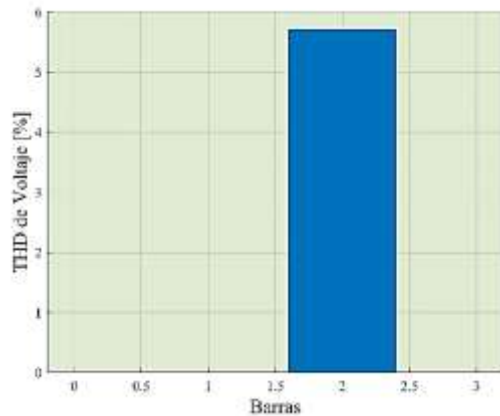


Figura 24. Resultados del THD de voltaje del sistema 2 barras.

5 CONCLUSIONES

La aplicación propuesta en este trabajo permite la simulación de cargas no lineales las cuales inyectan armónicos al sistema eléctrico de potencia permitiendo que por medio de la implementación de un flujo armónico se obtenga el valor de la distorsión armónica total (THD) tanto para la corriente como para el voltaje de cada barra.

Es importante verificar que los índices de distorsión cumplan o estén dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales utilizadas, para así poder evitar posibles problemas en los sistemas eléctricos a través de la implementación de medidas de migración necesarias.

Se debe tomar en cuenta que para la resolución de un flujo armónico es primordial tener conocimiento de cada elemento del sistema, ya que se debe conocer cuál de ellos inyecta contenido armónico a la red para así poder simularlos correctamente.

En el caso de sistemas que poseen armónicos es indispensable conocer la conexión de los transformadores debido a que se analizan mediante la secuencia cero solo en armónicos de orden 3.

El método frecuencial utilizado en la aplicación presentada tiene un tiempo de respuesta rápido debido a que encuentra su convergencia.

El método empleado en la aplicación propuesta en este artículo demuestra una gran facilidad al momento de resolver flujos armónicos debido a que tiene una metodología robusta y es capaz de analizar el comportamiento del sistema en cada una de las frecuencias armónicas.

5.1 Trabajos futuros

Basado en la investigación realizada para este trabajo y con los resultados obtenidos, se han identificado varios campos de estudio similares los cuales

pueden llevar a cabo proyectos relacionados con los flujos armónicos como pueden ser los siguientes:

- Diseño de filtros necesarios para la eliminación de armónicos del sistema de energía.
- Estudio económico del sistema eléctrico basado en las pérdidas y daños producidos por las corrientes armónicas inyectadas en el sistema.
- Análisis de calidad de energía enfocados en las distorsiones armónicas encontradas en el sistema eléctrico.
- Modelos de prevención de armónicos basándose en el tipo de conexión que poseen los elementos del sistema y las conexiones de las redes eléctricas.

6 REFERENCIAS

- [1] A. Tejada and A. Llamas, "Efectos de las armónicas en los sistemas electricos," p. 8, 2002.
- [2] H. A. Bueno Muñoz and M. V. Fajardo Muzo, "Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos en una red bifásica residencial," Universidad Politécnica Salesiana, 2013.
- [3] C. Rios, M. Aristizabal, and G. Ramon, "Análisis de armónicos en sistemas eléctricos," *Análisis Armónicos En Sist. Eléctricos*, vol. 1, no. 21, pp. 21–26, 2003.
- [4] D. Committee, I. Power, and E. Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society Sponsored by the Transmission and Distribution Committee I," vol. 2014, 2014.
- [5] ARCONEL, "Regulacion No. ARCONEL-053/18," *Arconel*. p. 38, 2018.

- [6] Sergio Herraiz, "Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas," Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002.
- [7] K. G. Genovez Ramírez and B. F. Ureña Torres, "Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución," Universidad de Cuenca, 2018.
- [8] E. Rojas Girett, "Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía," Universidad Nacional de Caaguazú, 2015.
- [9] G. Constante, "Flujo de potencia de armónicos utilizando MATLAB," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [10] A. Gomez Exposito, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Madrid, 2002.
- [11] M. Toledo and C. Jiménez, "Análisis y Propuestas Para la Mitigación de la Contaminación Armónica en las Subestaciones de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR C.A.," Universidad Politecnica Salesiana, 2010.
- [12] W. C. Carreño, G. O. Plata, A. L. M. Wandurraga, and C. A. Duarte Gualdrón, "Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo," *Ingeniare*, vol. 19, no. 1, pp. 76–92, 2011.
- [13] L. Sainz Sopera, "Estudio de la formulación y resolución del problema del flujo armónico de cargas," Universidad Politecnica de Cataluña, 1995.
- [14] C. A. Ríos Porras, M. Aristizabal Naranjo, and A. Escobar, "Modelado de Sistemas Eléctricos en presencia de Armónicos," vol. 2, no. 22, pp. 7–12, 2003.
- [15] B. J. Villatoro Martínez, "Teorías de Diseño de Filtros Activos para Mitigación de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia," Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009.
- [16] D. F. Montoya Cespedes, "Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico industrial mediante un filtro de armónico pasivo," Universidad Pontificia Boliviana, 2016.
- [17] F. J. Garcia Juarez, "Aplicacion y especificacion de filtros de armonicas en sistemas electricos de potencia," Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [18] M. Alzamora, "Programa digital para el análisis de propagación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia," Escuela Politécnica Nacional, 1995.
- [19] J. R. Aranda Mendoza, "Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia," Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015.
- [20] K. S. Chuga Ortiz, "Caracterizacion de armonicos en el sistema Nacional Interconectado(SNI) a partir de informacion del sistema de monitoreo de area extendida," Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [21] G. Quishpe Sacancela, "Simulación de transformadores y contrastación con medición experimental moderna," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2001.
- [22] A. Garces Ruiz, J. C. Galvis Manso, and R. A. Gallego, "Flujo De Carga Armónico Para Sistemas Radiales," *Sci. Tech.*, vol. 10, no. 25, pp. 65–70, 2004.
- [23] A. A. Abdelsalam, K. M. Hassanin, A. Y. Abdelaziz, and H. H. Alhelou, "Optimal PMUs placement considering ZIBs and

- single line and PMUs outages,” *AIMS Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 122–141, 2020.
- [24] Y. Zhang and S. Wang, “Harmonic power flow analysis for distribution system with distributed generations,” no. Ciced, pp. 23–26, 2014.
- [25] S. J. Campos Chacon, “Metodología para la identificación de transformadores de corriente saturados en un sistema de potencia,” Universidad del Valle, 2015.
- [26] L. Montealegre Lobo, “Modelo de transformadores en saturacion utilizando funciones de calculo de parametros en EMTP-RV,” *J. Vis. Lang. Comput.*, vol. 11, no. 1106, pp. 287–301, 2012.
- [27] W. Carvajal Carreño, G. Ordóñez Plata, A. L. Moreno Wandurraga, and C. A. Duarte Gualdrón, “Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 19, no. 1, pp. 76–92, 2011.
- [28] G. Reyes Calderon, “Armonicas En Sistemas De Distribucion De Energia Eléctrica,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 1996.
- [29] J. J. Chavez and A. Ramirez, “SVC and TCSC implemented into a newton-type harmonic power flow algorithm,” *2006 38th Annu. North Am. Power Symp. NAPS-2006 Proc.*, pp. 283–287, 2006.
- [30] L. Rodrigues Rosales and R. Santacruz Buendia, “Análisis de flujos de potencia y armonicos en una red de alta tension y diseño de filtros armonicos de potencia,” Instituto Politecnico Nacional, 2012.
- [31] Guerrero, “Programa interactivo de flujo de potencia para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia,” Escuela Politecnica Nacional, 1988.
- [32] M. Madrigal and E. Acha, “A new harmonic power flow method based on the instantaneous power balance,” pp. 655–662, 2004.
- [33] A. L. Amoo, D. M. Said, A. Yusuf, and A. A. Mohd Zin, “Harmonic power flow in Nigerian Power system with PV site,” *Proc. 2013 IEEE 7th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2013*, no. June, pp. 319–323, 2013.
- [34] Y. Sun, G. Zhang, W. Xu, and J. G. Mayordomo, “A non-iterative harmonic power flow method for accurate harmonic calculations,” *ICHQP 2008 13th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, pp. 2–7, 2008.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 17. Matriz de estado del arte

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL																					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE SOLUCION			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Flujos de Potencia armónicos	Flujos de Potencia	Método de Newton Raphson completo	Elementos con contenido armónico	THD	saturation de transformadores	modelación de los elementos	THD de voltaje	THD de corriente	Filtros	modelación de los componentes	Series de Fourier	Algoritmos Iterativos	Newton Raphson	Algoritmo de flujo armónico	Límites de distorsión armónica	Medidas de mitigación armónica	Simulación de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson completo
1	2003	Análisis de armónicos en sistemas eléctricos	24			X							X						X	X	X
2	2002	Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos	22			X			X					X					X		
3	2013	Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos en una red bifásica residencial	1				X			X	X	X	X				X				
4	2002	Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas	3	X	X	X			X				X	X	X		X				X
5	2018	Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución	0			X	X	X	X			X		X			X	X			X
6	2014	Flujo de potencia de armónicos utilizando MATLAB	0	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X			X
7	2015	Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía	0		X	X	X	X											X		
8	2003	Modelado de Sistemas Eléctricos en presencia de Armónicos	1			X			X		X		X					X			X
9	2010	Análisis y Propuestas Para la Mitigación de la Contaminación Armónica en las Subestaciones de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR C.A.	0			X	X			X	X	X	X				X	X			X

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE SOLUCION			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Flujos de Potencia armónicos	Flujos de Potencia	Método de Newton Raphson completo	Elementos con contenido armónico	THD	saturación de transformadores	modelación de los elementos	THD de voltaje	THD de corriente	Filtros	modelación de los componentes	Series de Fourier	Algoritmos Iterativos	Newton Raphson	Algoritmo de flujo armónico	Límites de distorsión armónica	Medidas de mitigación armónica	Simulación de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson completo
10	2009	Teorías de Diseño de Filtros Activos para Mitigación de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia	6				X	X					X	X							
11	2016	Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico industrial mediante un filtro de armónico pasivo	0				X		X	X			X	X					X		
12	2013	Aplicación y especificación de filtros de armónicas en sistemas eléctricos de potencia	0					X		X	X	X	X	X					X		
13	1995	Programa digital para el análisis de propagación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia	0	X		X	X	X	X				X	X		X			X		
14	2015	Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia	1				X						X		X			X		X	
15	2015	Caracterización de armónicos en el sistema Nacional Interconectado (SNI) a partir de información del sistema de monitoreo de área extendida	1				X						X				X				
16	2001	Simulación de transformadores y contrastación con medición experimental moderna	0					X	X		X	X			X		X				X
17	2004	Flujo De Carga Armónico Para Sistemas Radiales	3	X			X			X											
18	2014	Harmonic power flow analysis for distribution system with distributed generations	0	X						X						X					
19	2015	Metodología para la identificación de transformadores de corriente saturados en un sistema de potencia	0						X								X				
20	2012	Modelo de transformadores en saturación utilizando funciones de cálculo de parámetros en EMTP-RV	3				X		X	X				X							

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA CON PRESENCIA DE CONTENIDO ARMÓNICO USANDO EL MÉTODO FRECUENCIAL

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE SOLUCION			SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Flujos de Potencia armónicos	Flujos de Potencia	Método de Newton Raphson completo	Elementos con contenido armónico	THD	saturación de transformadores	modelación de los elementos	THD de voltaje	THD de corriente	Filtros	modelación de los componentes	Series de Fourier	Algoritmos Iterativos	Newton Raphson	Algoritmo de flujo armónico	Límites de distorsión armónica	Medidas de mitigación armónica	Simulación de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson completo	Espectro armónico de voltaje y corriente
21	2011	Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo	7		X	X			X				X			X						
22	1996	Armónicas En Sistemas De Distribución De Energía Eléctrica	4				X						X				X				X	
23	2006	SVC and TCSC implemented into a newton-type harmonic power flow algorithm	0		X	X								X	X	X				X		
24	2012	Análisis de flujos de potencia y armónicos en una red de alta voltaje y diseño de filtros armónicos de potencia	0		X	X			X			X				X						
25	1988	Programa interactivo de flujo de potencia para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia	0	X	X	X								X	X	X				X		
26	2004	A new harmonic power flow method based on the instantaneous power balance	6				X		X	X			X									
27	2013	Harmonic power flow in Nigerian Power system with PV site	5	X										X		X						
28	2008	A non-iterative harmonic power flow method for accurate harmonic calculations	11	X					X							X						
			CANTIDAD:	8	6	5	18	9	8	14	6	7	11	9	7	8	3	10	8	8	5	9

6.2 Resumen de Indicadores

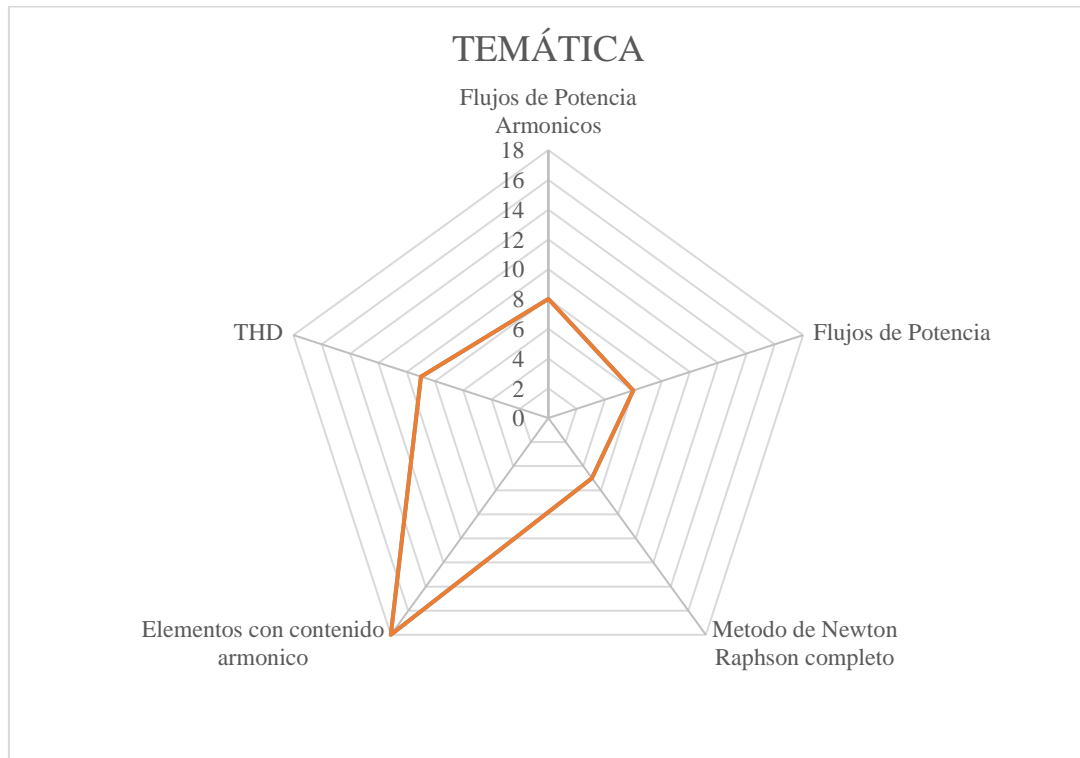


Figura 25. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

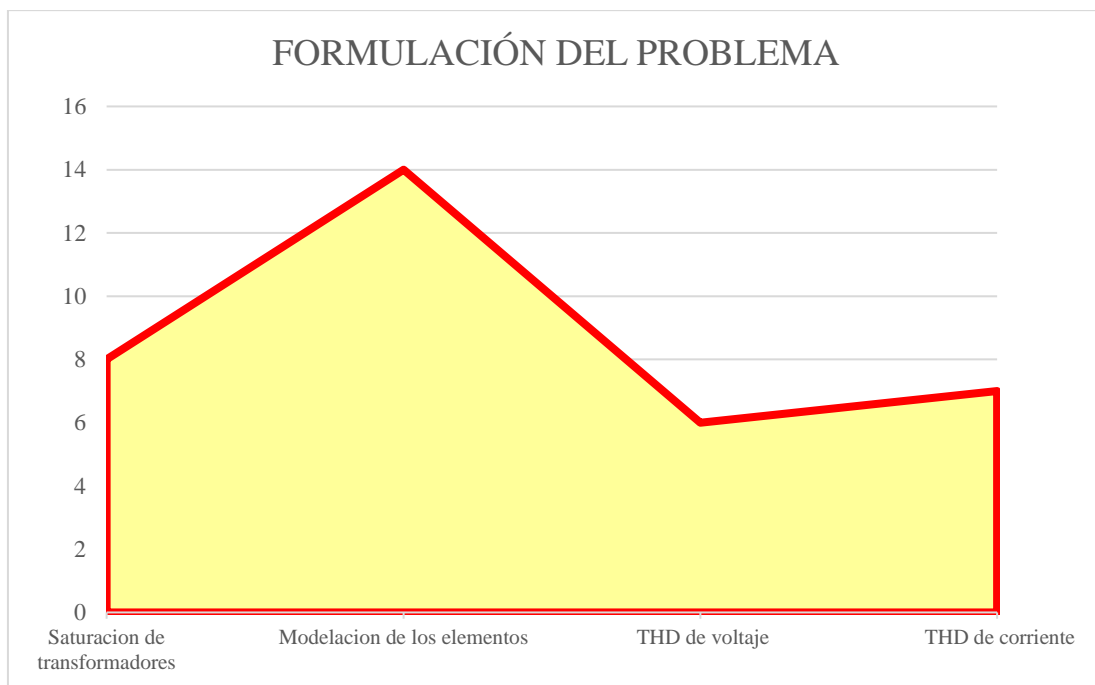


Figura 26. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

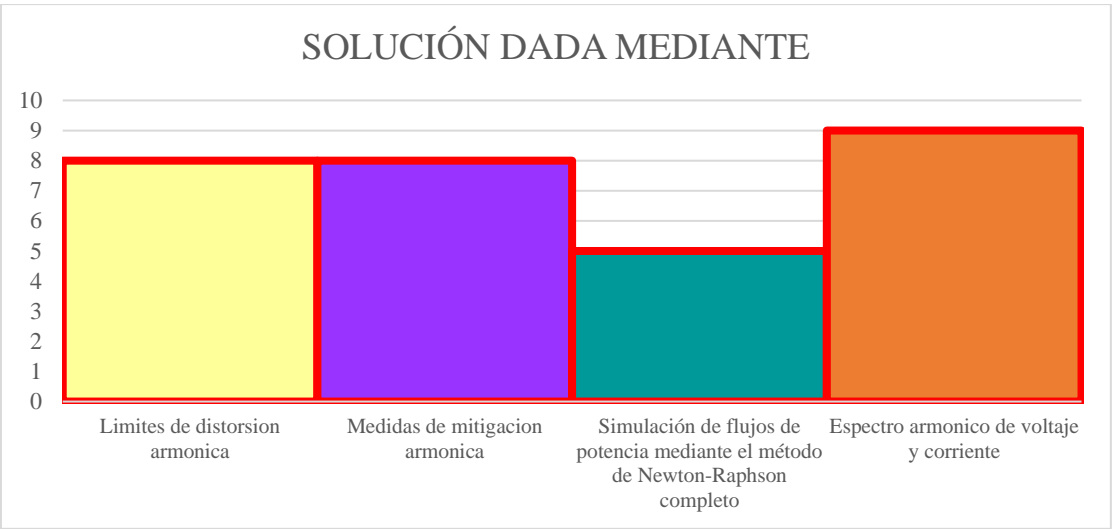


Figura 27. Indicador de solución - Estado del arte

7 ANEXOS

7.1 Datos del sistema de prueba 1

Tabla 18. Número del tipo de barra y de la conexión de los transformadores

Numero	Tipo	Conexión
1	Slack	YY
2	PV	DD
3	PQ	YD

Tabla 19. Datos del Sistema IEEE de 14 barras

Barra N°	Voltaje [p.u.]	Ángulo [°]	Pg [p.u.]	Qg [p.u.]	Pc [p.u.]	Qc [p.u.]	Tipo	Vreal	Carga no lineal
1	1.060	0	0	0	0	0	1	230	0
2	1.045	0	18.3	0	0	0	2	230	0
3	1.000	0	0	0	0	0	3	230	0
301	1.000	0	0	0	59.505	3.363	3	35.4	1
302	1.000	0	0	0	59.505	3.363	3	35.4	1
4	1.000	0	0	0	47.79	-3.9	3	230	0
5	1.000	0	0	0	7.599	1.599	3	230	0
6	1.070	0	-11.2	0	0	0	2	230	0
7	1.000	0	0	0	0	0	3	230	0
8	1.000	0	0	0	0	12.9	3	13.8	1
9	1.000	0	0	0	29.499	16.599	3	115	0
10	1.000	0	0	0	9	5.799	3	115	0
11	1.000	0	0	0	3.501	1.8	3	115	0
12	1.000	0	0	0	6.099	1.599	3	115	0
13	1.000	0	0	0	13.5	5.799	3	115	0
14	1.000	0	0	0	14.901	5.001	3	115	0

Tabla 20. Datos de los generadores del sistema IEEE de 14 barras

Barra I	R(pu)	X(pu)
1	0	0.25
2	0	0.25
8	0	0.25

Tabla 21. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras

Barra i	Barra j	R(pu/km)	X(pu/km)	Y(pu/km)	L(km)
8	13	0.09495	0.19887	0	1
8	14	0.12285	0.25575	0	1
8	15	0.06613	0.13024	0	1
11	12	0.03181	0.08448	0	1
11	16	0.0127	0.27033	0	1
12	13	0.08203	0.19202	0	1
14	15	0.22087	0.19985	0	1
15	16	0.17089	0.34795	0	1
1	2	0.01937	0.05916	0.0633	1
1	7	0.05402	0.223	0.0528	1
2	3	0.04697	0.19794	0.0492	1
2	6	0.0581	0.17628	0.0438	1
2	7	0.05693	0.17384	0.0374	1
3	6	0.067	0.17099	0.0339	1
6	7	0.01335	0.04209	0.0346	1

Tabla 22. Datos de los transformadores del sistema IEEE de 14 barras

Barra i	Barra j	R(pu)	X(pu)	Conexión
6	9	0	0.209	1
6	11	0	0.55618	1
7	8	0	0.2502	1
9	10	0	0.17615	3
9	11	0	0.11	1
3	4	0	0.028	1
3	5	0	0.028	3

Tabla 23. Datos de los compensadores del sistema IEEE de 14 barras

Barra	R(pu)	X(pu)	B(pu)	Armónico
11	0	0	0.0633	0
10	0.5251	8.31233	0.03015	2
10	0.5251	1.32635	0.03015	5
10	0.5251	0.67307	0.03015	7
10	0.5251	0.27515	0.03015	11
3	0.00136	0.02772	0.24916	11
3	0.00136	0.02772	0.24916	11

7.2 Datos del sistema de prueba 2

Tabla 24. Datos del sistema de 2 barras

Barra N°	Voltaje [p.u.]	Ángulo [°]	Pg [MW]	Qg [Mvar]	Pc [MW]	Qc [Mvar]	Tipo	Vreal	Lugar del Armónico
1	1.00	0	0	0	0	0	1	230	0
2	1.00	0	0	0	40	10	3	230	1

Tabla 25. Datos de la línea del sistema de 2 barras

Barra i	Barra j	R(pu/km)	X(pu/km)	L(km)
1	2	0.01	0.17	1

Tabla 26. Datos del generador del sistema de 2 barras

Barra I	R(pu)	X(pu)
1	0	0.01