Formulación y comparación de cinco métodos para el análisis de flujo de potencia en sistemas de distribución AC en el software MATLAB®

María Camila Herrera Briñez

Proyecto sometido como requisito parcial
para optar por el título de
Ingeniera Eléctrica

Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD

25 de abril de 2021
Área de sistemas eléctricos de potencia
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Documento final

Monografía presentada como requisito parcial de grado a la dirección del proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Fancisco José de Caldas

María Camila Herrera Briñez.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estudiante

Aprobado por:

Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director

Bogotá D.C., 25 de abril de 2021

Dedicatoria

Esta trabajo está dedicado a mi madre María Cristina y a mi abuelo Plinio, que con su apoyo, dedicación y amor incondicional, me brindan las fuerzas para seguir adelante y luchar por mis sueños. Las palabras nunca serán suficientes para demostrar el agradecimiento que siento por ustedes, por siempre escucharme y ser un fuerte modelo a seguir. A ustedes les debo lo que soy hoy y lo que de aquí en adelante la vida me permita lograr.

A mis amigos Viviana, Dallany, Nicolas, Jessica y Javier, que me acompañaron en los momentos de angustia, tristeza, euforia y alegría, gracias por todo su apoyo, comprensión y cariño.

A todas las personas que estuvieron conmigo a lo largo de mi proceso formativo, siempre con un consejo o una buena palabra para alentarme a seguir luchando por mis sueños.

Agradecimientos

Al director de este proyecto PhD. Oscar Danilo Montoya, por creer en mi y por ser siempre un apoyo constante en la realización de este trabajo, por compartir sus conocimientos conmigo y siempre brindarme palabras de apoyo.

A mis profesores por se un constante ejemplo de la profesional en la que quiero convertirme, por dedicar su tiempo, conocimiento y esfuerzos para que yo encontrara el amor por esta profesión.

A mis compañeros y amigos por su apoyo y compañía durante todo mi proceso de formación, sin su presencia el camino a la meta no hubiera sido tan llevadero.

Resumen

La información que arroja el análisis de flujo de potencia sobre un sistema eléctrico es fundamental para su diseño y control, por eso necesario tener certeza de la veracidad de los datos obtenidos, así como contar con técnicas que permitan realizar estos cálculos de manera eficiente, por esta razón en este trabajo se presentan múltiples metodologías para la solución de flujo de potencia, a través del modelado de cinco métodos diseñados para sistemas de distribución: Aproximaciones sucesivas, Barrido iterativo, Método triangular y Aproximaciones lineales basadas la serie de Taylor. Esto se realiza por medio de adaptaciones de la ecuación de flujo de potencia, que permiten reducir los pasos necesarios para encontrar las tensiones de los nodos de la red y por ende las pérdidas de potencia que este presenta.

Inicialmente, se muestra la formulación matemática de cada método haciendo énfasis en las ecuaciones que lo componen y como éstas se solucionan por medio de procesos iterativos. Luego, por medio de la ejemplificación con dos métodos se muestra el paso a paso y los algoritmos necesarios para el desarrollo de los mismos en un software de programación como MATLAB®.

Con el fin de validar la metodología planteada y dar solución a la pregunta problema formulada, se plantean tres casos de estudio para dos sistemas de prueba de 33 y 69 nodos, en donde se muestran las pérdidas técnicas de los sistemas y los tiempos de cómputo, esto con el fin de realizar comparaciones de despeño entre los métodos formulados y las técnicas tradicionales de cálculo de flujo de potencia como Newton-Raphson y Gauss-Seidel.

Finalmente, gracias a los resultados obtenidos con los sistemas de prueba se desarrollar parámetros comparativos para identificar las ventajas que las técnicas implementadas presentan con respecto a los métodos tradicionales para el cálculo de flujo de potencia.

Abstract

Power flow study is one of the main information sources for electrical systems, meaning it is essential for design and control, then it is especially important to have all necessary tools for getting the right data in the most efficient way. This is the reason why this work shows different techniques to resolve the load flow problem for distribution systems, such as: Successive Approximations, Back Forward Swept, Triangular Method and Linear Approximations. These techniques use modifications of the load flow equation to reduce the calculation process and to obtain more accurate data, than the ones resulting from traditional load flow methods as Newton-Raphson and Gauss-Seidel.

To begin with the formulation of the techniques, it was necessary to take a detailed approach on the equations, because the most important step to develop these methods, is knowing the step-by-step methodology used to know the voltage of each node and therefore the technical power losses of the system. One of the main goals of this work is to show the algorithm required to develop the mathematical techniques explained on the MATLAB® software, to do so, one chapter was dedicated to explaining with details the methodology used to formulate two of the methods on said software.

To corroborate the functioning of the techniques, two distribution systems were use, one with 33 nodes and the other one with 69, for each system two study cases were considered, showing power losses and processing time. The purpose of this, was getting enough information to compare the techniques developed with two of the most common methods used such as Newton-Raphson and Gauss-Seidel.

Finally, thanks to the comparative process, some parameters were defined to show the advantages of the 5 formulated techniques with the traditional ones. As a result of algorithms showed for implementing the techniques, an interactive MATLAB® application was developed, as a useful tool for students looking to learn more about load flow studies on distribution systems.

Índice general

Resumen iv

Abstract v

Índice general vii

Lista de tablas viii

Lista de figuras x

Lista de códigos de programación xi

Nomenclatura y Notaciones xii

1. Introducción 1
- 1.1. Planteamiento del problema . . . 2
- 1.2. Marco referencial . . . 3
- 1.3. Justificación . . . 5
- 1.4. Objetivos . . . 6
  - 1.4.1. Objetivo General . . . 6
  - 1.4.2. Objetivos Específicos . . . 6
- 1.5. Contribuciones del proyecto de grado . . . 6
- 1.6. Organización del documento . . . 8

2. Formulaciones matemáticas para flujo de potencia 9
- 2.1. Aproximaciones sucesivas . . . 9
- 2.2. Barrido iterativo . . . 11
- 2.3. Método triangular . . . 13
- 2.4. Aproximaciones lineales por series de Taylor . . . 14
  - 2.4.1. Primer método . . . 15
  - 2.4.2. Segundo método . . . 16

3. Metodología propuesta 18

3.1. Desarrollo método BFS 19
3.2. Desarrollo TM 23
3.3. Información sobre la metodología de las técnicas SA, LA1 y LA2 28

4. Sistema de prueba y escenarios **29**
4.1. Sistema de prueba de 33 nodos 29
4.2. Sistema de prueba de 69 nodos 31
4.3. Escenarios de estudio 33

5. Aplicación y resultados **34**
5.1. Escenario 1 35
5.2. Escenario 2 36
5.3. Escenario 3 38
5.4. Perfiles de tensión 40

6. Conclusiones y trabajos futuros **41**
6.1. Conclusiones 41
6.2. Trabajos futuros 42

Bibliografía **46**

Apéndices **47**

A. Métodos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel para flujo de potencia **48**
A.1. Formación de la matriz de admitancias: Y_{bus} 48
A.2. Ecuación de flujo de potencia 49
A.3. Método Gauss-Seidel (GS) 49
A.4. Método Newton-Raphson (NR) 50

B. Manual de usuario del la interfaz gráfica desarrollada en el software MATLAB® **52**
B.1. Instalación de la aplicación 52
B.1.1. Posible error de instalación 54
B.2. Manual de uso 56
B.2.1. Introducción a la interfaz 56
B.2.2. Uso de la aplicación 59

Índice de tablas

1.1. Recopilación de artículos publicados en los últimos 10 años sobre métodos para el cálculo de flujo de potencia en sistemas de distribución 5

3.1. Parámetros eléctricos para el sistema de 7 nodos usado explicar implementación en MATLAB® 18

4.1. Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 33 nodos 30
4.2. Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 69 nodos 31

5.1. Escenarios a implementar para los casos de estudio 34
5.2. Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 1 36
5.3. Datos del sistema de 69 nodos para el escenario 2 37
5.4. Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 2 38
5.5. Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 3 39
5.6. Reducción en los tiempos de cómputo para los sistemas de 33 y 69 nodos . 39

A.1. Composición de la matriz Jacobiana 51

Índice de figuras

2.1. Sistema radial de 5 nodos para formulación de la matriz T 13

3.1. Sistema de prueba de 7 nodos 18
3.2. Diagrama de flujo para creación de matriz A y Z_r 21
3.3. Diagrama de flujo para BFS 23
3.4. Diagrama de flujo para construcción de la matriz T y Z_r 25
3.5. Diagrama de flujo para TM 27

4.1. Sistema de prueba de 33 nodos 29
4.2. Sistema de prueba de 69 nodos 31

5.1. Sistema reconfigurado de 69 nodos tomado de [1] 37
5.2. Perfiles de tensión para el sistema de 33 nodos 40
5.3. Perfiles de tensión para el sistema de 69 nodos 40

B.1. Ilustración del archivo que se debe obtener después de la descarga 53
B.2. Ilustración ubicación “APPS” dentro del entorno del software 53
B.3. (a) Ilustración de la ventana de confirmación de instalación (b) Aviso de instalación completa 53
B.4. Ilustración de cómo aparece la aplicación instalada 54
B.5. Error en la instalación de la aplicación 54
B.6. Ejemplificación uso del comando ”cd” 55
B.7. Ilustración de la primera pestaña de la aplicación 57
B.8. Ilustración de la segunda pestaña de la aplicación 58
B.9. Ilustración de la tercera pestaña de la aplicación 59
B.10. (a) Tabla para ingresar la información (b) Información del sistema de 7 nodos ingresada a la aplicación 60
B.11. Mensaje mostrado cuando se calcula el flujo de potencia del sistema seleccionado 60
B.12. Información del flujo de potencia del sistema de 7 nodos 61
B.13. Matriz A del sistema mostrada en el Command Window 62
B.14. Matriz T del sistema mostrada en el Command Window 62
B.15. Información adicional sobre el método SA 63

B.16.Perfiles de tensión para el sistema de 7 nodos 63

Índice de códigos de programación

3.1. Información de líneas y nodos del sistema de 7 nodos 19
3.2. Formación de la matriz A 20
3.3. Método de barrido iterativo 22
3.4. Cálculo de las pérdidas barrido iterativo 22
3.5. Formación de la matriz T 24
3.6. Método triangular 26
3.7. Cálculo de pérdidas método triangular 26

Nomenclatura y Notaciones

En esta sección se presentan las principales abreviaturas empleadas en este documento, así como la nomenclatura utilizada en la formulación de cada uno de los métodos de flujo de potencia estudiados.

Abreviaciones

BFS	Barrido Iterativo
GS	Gauss-Seidel
LA	Aproximaciones Lineales
NR	Newton-Raphson
SA	Aproximaciones Sucesivas
SD	Sistema de Distribución
STD	Desviación Estandar
TM	Método Triangular

Conjuntos

Ω_i	Conjunto que contiene los nodos de envío del sistema
Ω_j	Conjunto que contiene los nodos de recibo del sistema
Ω_n	Conjunto que contiene todos los nodos del sistema
Ω_r	Conjunto que contiene las ramas o lineas del sistema

Parámetros y Subíndices

A	Matriz de incidencia
d	Índice que recorre los nodos de demanda del sistema
ε	Error de convergencia para los métodos
g	Índice que hace referencia al nodo slack del sistema
$\Im$	Parte imaginaria de una variable
NL	Número de lineas del sistema
NN	Número de nodos del sistema
o	Índice que hace referencia a valores iniciales
$\Re$	Parte real de una variable
t	Índice que hace referencia al un proceso iterativo
T	Matriz Triangular
Y	Matriz de admitancias
Z	Matriz de impedancias

Variables

I_n	Corriente neta en los nodos del sistema
I_r	Corriente por las ramas del sistema
V_d	Tensión en los nodos de demanda del sistema
V_r	Tensión en las ramas del sistema
S	Potencia aparente
S_{loss}	Pérdidas de potencia activa del sistema

Capítulo 1

Introducción

En este Capítulo se presenta una breve introducción sobre el flujo de potencia para sistemas de distribución y la importancia que este tiene dentro de los estudios para el análisis de sistemas eléctricos; para esto se realiza una revisión del estado del arte en el cual se presentan los principales métodos de flujo de potencia aplicables a sistemas de distribución, incluyendo técnicas tradicionales y los métodos expuestos en este trabajo. Además se presenta la formulación del problema para el desarrollo del trabajo y los objetivos planteados para el mismo.

El análisis de flujo de potencia es un estudio eléctrico que se realiza a los sistemas de transmisión y distribución, que en el lenguaje de los sistemas de energía es la solución de estado estable de la red del sistema de energía. La información principal obtenida de este estudio comprende las magnitudes y los ángulos de fase de los voltajes de los nodos de carga, las potencias reactivas en los nodos del generador, el flujo de potencia real y reactiva en las de las líneas [2]. Para el análisis se supone que el sistema funciona en condiciones equilibradas, con impedancias especificadas en por unidad en una base común de MVA. Las ecuaciones de la red pueden formularse sistemáticamente en una variedad de formas, sin embargo, el método de voltaje de nodo es la forma más adecuada para muchos análisis [3]. La formulación de las ecuaciones de red en la forma de admitancia nodal da como resultado ecuaciones algebraicas lineales complejas y simultáneas de las cuales se pueden obtener los voltajes, si para todos los nodos han sido especificados los valores de corriente [4]. No obstante, en un sistema de potencia, se conocen potencias en lugar de corrientes, por lo tanto, las ecuaciones resultantes en términos de potencia, conocidas como la ecuación del flujo de potencia, se vuelven no lineales y deben resolverse mediante técnicas iterativas [4].

Los estudios de flujo de energía, comúnmente conocidos como flujo de carga, son la columna vertebral del análisis y diseño de los sistemas eléctricos. Son necesarios para la planificación, operación, programación económica, monitoreo continuo del estado de un sistema y para analizar la efectividad de planes alternativos para futuras expansiones del

sistema o para enfrentar el aumento de la demanda [5]. Además, se requiere un análisis de flujo de potencia para muchos otros estudios como estabilidad de transitorios y de continuidad.

Los SD presentan características diferentes a los de transmisión, por lo que las técnicas desarrolladas para la solución del flujo de potencia de los últimos, como Newton-Raphson y Gauss-Seidel, no siempre representan la mejor respuesta para las redes con una gran cantidad de nodos y con relaciones R/X mayores que 1 , como las redes de distribución [6]. Es por eso que se han desarrollado nuevas técnicas, que tienen mejor desempeño para SD pues no generan tantos errores en los resultados y tienen una mejor convergencia. En la mayoría de casos, estos métodos para SD son modificaciones de los métodos tradicionales, esto presenta ventajas ya que estas técnicas han sido ampliamente estudiadas y por lo tanto se tiene toda la información disponible para entender de manera plena el funcionamiento de los nuevos métodos [7].

Por lo anterior, en este trabajo se realiza la formulación de cinco métodos para el análisis de flujo de potencia en sistemas de distribución AC, basado en los modelos encontrados en la literatura pero extendiendo la explicación de los mismos para facilitar su entendimiento, esto con el fin de realizar la implementación de los métodos en un software de programación para poder realizar pruebas que permitan comparar su desempeño con los métodos tradicionales.

1.1. Planteamiento del problema

En la literatura científica existen múltiples técnicas para solucionar el problema de flujo de potencia para sistemas de distribución, algunas de ellas son: el barrido iterativo [8,9], las aproximaciones sucesivas [10], el método triangular [11] y aproximaciones lineales [12], entre otras. Todas involucran operación matricial formulada especialmente para la topología de estos sistemas y un proceso iterativo que permite llegar a la solución, que en la mayoría de los casos garantiza convergencia. En la literatura científica, la información sobre la formulación y comprobación de estos métodos es variada, pero no es posible encontrar una comparación sobre la convergencia y eficiencia entre las técnicas mencionadas y las tradicionales como NR y GS.

Por las razones antes mencionadas, en este proyecto de grado se pretende resolver a la siguiente pregunta de investigación: *¿cuáles son las ventajas que presentan las cinco técnicas para el análisis de flujo de potencia en sistemas de distribución estudiadas, en comparación con los métodos tradicionales como NR y GS, en términos del número de iteraciones y tiempo de ejecución?* Es importante mencionar que el análisis comparativo antes mencionado no ha sido presentado antes en la literatura especializada, lo cual claramente presenta una oportunidad de investigación, que esta monografía pretende llenar en el estado del arte actual sobre el análisis de sistemas de distribución de energía.

1.2. Marco referencial

Para el análisis de flujo de potencia en sistemas de distribución como se mencionó anteriormente, debido a las características especiales que estos presentan, es necesaria la reformulación de los métodos clásicos implementados para este cálculo como Newton-Raphson y Gauss-Seidel. Las técnicas a analizar son: Aproximaciones sucesivas, Barrido iterativo, Método triangular, y dos aproximaciones lineales basadas en series de Taylor. A continuación, se presenta un conjunto de trabajos relevantes en el área de sistemas eléctricos de distribución en relación con el análisis de flujo de potencia.

El autor Jhon M. en [13], que es la primera referencia encontrada con respecto a flujos de potencia, menciona una forma modificada de implementar el método Gauss-Seidel por medio del análisis y solución de las ecuaciones nodales que relacionan la diferencia de tensión y la corriente de los mismos por medio de la matriz de admitacias del sistema. Teniendo en cuenta algunos valores iniciales requeridos, el proceso de solución se realiza de manera iterativa hasta encontrar las tensiones que arrojen el error deseado. El autor además muestra como por medio de dichas ecuaciones, se puede escribir el balance de potencia de cada nodo para así por medio de un proceso iterativo obtener las pérdidas del sistema.

En el artículo [3] publicado en 1964, Laughton propone una comparación entre métodos directos de cálculo de flujo de potencia y los que incluyen iteraciones en su solución, incluye además una revisión de los métodos NR, Jacobi y GS para el cálculo de flujos de potencia, realizando pruebas de convergencia para cada uno de estos. En términos generales el método Newton-Raphson consiste en la solución de un sistema de ecuaciones no lineales, para el caso de redes eléctricas, este conjunto de ecuaciones se plantea en términos del voltaje de los nodos, en donde el valor de las corrientes y potencias del sistema son vitales para la solución. Todo este proceso se lleva a cabo de manera iterativa y con ayuda de la matriz Jacobiana que contiene las derivadas parciales de las ecuaciones de flujo de potencia para los nodos, separadas en potencia activa y reactiva.

En 1995, Das y Kothari [14] introducen una nueva forma de calcular el flujo de potencia para sistemas de distribución, este basado en una formulación de corrientes que fluyen por lo nodos y las ramas del sistema, este es de los primeros artículos que se relaciona directamente con uno de los métodos propuestos. Estos autores mencionados, sirven como introducción para los métodos tradicionales que se requieren en este trabajo para realizar la comparación. Ahora es necesario hacer una revisión de la literatura disponible sobre los métodos a modelar.

La primer técnica conocida como aproximaciones sucesivas, es propuesta por [9, 15], esta basa su formulación en la separación de la ecuación de flujo de potencia en términos de generación y demanda para facilitar los cálculos. Es necesario primero conocer la matriz de admitancias del sistema para poder dividirla en nodos que involucran generación y los que son de demanda, luego por medio de la reescritura de la ecuación de flujo de potencia,

encontrar las corrientes por las ramas del sistema y las tensiones de los nodos. Realizando el proceso iterativo de lo mencionado hasta reducir el error al deseado, se llega a la solución que incluye el valor de la tensión de todos los nodos y las pérdidas de potencia del sistema.

El método BFS es presentado por Shen T. en [16], como una técnica basada en la distribución gráfica del sistema, a partir de la construcción de la matriz de incidencia que relaciona las corrientes de los nodos con las ramas por las que circula. Luego Garcés A. en [17] describe el proceso para encontrar el flujo de potencia con la ayuda de la matriz de incidencia, esto se realiza por medio de la aplicación de las leyes de Kirchhoff en los nodos de la red para obtener el flujo de corriente en los mismos y de esta manera ir actualizando los valores de tensiones encontrados hasta llegar a un error deseado.

Jovanovic en [11] presenta el método triangular, que solo se puede utilizar para sistemas radiales, ya que se basa en la forma sin retornos que estos tienen. La formulación de esta técnica se basa en una matriz triangular que relaciona las corrientes de las ramas con la de los nodos por medio de la primera ley de Kirchhoff. En [18] Teng L.explica como por medio de modificaciones a la ecuación de flujo de potencia y con la ayuda de matriz triangular se pueden encontrar, por medio de procesos iterativos, los valores de las tensiones en los nodos del sistema y por ende las pérdidas de potencia.

A lo largo de la literatura se encuentran referencias como [19] y [20], que realizan modificaciones a BFS y TM, en términos de facilidad para encontrar las matrices que relacionan las características del sistema y dan información de posibles algoritmos que se pueden implementar para la organización de los nodos de una red.

En [21], se hace referencia al método de aproximaciones lineales, en este articulo el autor explica como linealizar el término de tensión de la ecuación de flujo de potencia para sistemas DC por medio de la serie de Taylor, para luego poder encontrar los valores de la tensión de los nodos por medio de la separación de la parte real e imaginaria de la ecuación lineal obtenida. De una manera similar en [12] explica como se puede aplicar este método para sistemas AC.

Es importante mencionar que, la única referencia encontrada de comparación de métodos es [22], en este Medina C. trata de formas para solucionar el flujo de carga para sistemas de potencia desde diferentes propuestas matemáticas, pero en este no se encuentra una implantación de estos en un sistema de distribución o algún caso de estudio que permita ver las ventajas que estos presentan. Finalmente, en los últimos años no se encuentran publicaciones de nuevo métodos o modificación de los existentes, pero si se encuentran algunas referencias que utilizan algunas de las técnicas mencionadas en métodos de optimización de pérdidas de potencia para sistemas de distribución.

Por último, en la Tabla 1.1 se presenta un recuento de algunos artículos relacionados con metodologías para resolver el problema de flujo de potencia en sistemas de distribución, los cuales han sido publicados en la última década. En esta tabla, se relaciona el nombre del método implementado, la referencia en donde se puede encontrar y el año de publicación

del mismo.

Tabla 1.1: Recopilación de artículos publicados en los últimos 10 años sobre métodos para el cálculo de flujo de potencia en sistemas de distribución

Método para el cálculo de flujo de potencia	**Referencia**	**Año**
Basado en ecuaciones de flujo desacopladas	[23]	2011
Basado en las matriz BIBC	[24]	2011
Modificación del barrido iterativo (BFS)	[25]	2012
Basado en la topología de la red	[26]	2012
Método Triangular - Jacobiano	[27]	2012
Flujo de carga probabilístico radial trifásico (PRTPLF)	[28]	2013
Inyección de corriente para n-conductores (NCIM)	[29]	2013
Flujo de potencia con generación dispersa	[30]	2013
Técnica sparse	[31]	2013
Flujo de carga basado en la teoría de grafos (GRLF)	[32]	2013
Modificación del BFS sin inversión de matrices	[33]	2014
Basada en la potencia de los nodos (PB/CB)	[34]	2014
BFS para redes de distribución	[35]	2015
Flujo de potencia híbrido de Gauss-Newton	[36]	2016
Flujo de potencia por inyección de corriente	[37]	2017
Modificación de la matriz de sensibilidad (MSM)	[38]	2017
Desacoplamiento híbrida de Newton-Rapson	[39]	2017
BFS híbrido	[40]	2018
Flujo lineal óptimo (LOPF-D)	[41]	2018
Algoritmo adaptativo	[42]	2018
Modificación de BFS	[43]	2019
Iterativo basado en circuitos equivalentes desacoplados	[44]	2020
BFS basado en organización de la red	[45]	2020
Algoritmo de búsqueda harmónico mejorado (IHS)	[46]	2020

1.3. Justificación

Los procesos de transmisión y distribución representan gran parte de la construcción y funcionamiento de los sistemas eléctricos, por esto se dedican grandes esfuerzos para su análisis y comprensión, lo que hace fundamental encontrar métodos adecuados para obtener la solución al flujo de potencia [47]. En los sistemas eléctricos de potencia, las redes de distribución son tan importantes como las de transmisión y por lo tanto es esencial contar con la información necesaria para su diseño y control, por contener una gran cantidad de elementos (subestaciones, tramos de línea, cargas de diferentes tipos, etc.) y por operar como redes radiales en condiciones normales, las redes de distribución entran en la categoría de sistemas de potencia mal acondicionados [48] y las técnicas tradicionales

de flujo de potencia como Newton-Raphson y Gauss-Seidel no tienen un buen desempeño numérico.

Con base a lo anterior, se decide realizar una búsqueda, análisis y modelado matemático de las técnicas existentes, con el fin de determinar cuál representa una mejor opción dependiendo de las características de la red, mostrando su implementación en dos casos de estudio (i.e., sistemas de prueba ampliamente empleados en la literatura científica). Después de una revisión exhaustiva del estado del arte, no se encontró una publicación que emplee una metodología parecida a la citada anteriormente, lo que crea la oportunidad de indagar el tema y crear un documento que lo evidencie.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Comparar cinco métodos para el cálculo de flujo de potencia en sistemas de distribución, mediante su implementación en el entorno de programación de MATLAB® a través de casos de estudio, para determinar las ventajas que estos presentan con respecto a los métodos tradicionales como NR y GS.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Modelar matemáticamente las técnicas para el cálculo de flujo de potencia: Barrido iterativo (BFS), Aproximaciones sucesivas (SA), Método triangular (TM) y Aproximaciones lineales basadas en series de Taylor (LA), con el fin de entender su funcionamiento y las variables que se involucran en su desarrollo.

2. Implementar los modelos matemáticos de los cinco métodos mencionados en el entorno de programación de MATLAB® y verificar su funcionamiento por medio de dos casos de estudio, enfocados a sistemas de distribución ampliamente estudiados en la literatura.

3. Desarrollar parámetros comparativos entre los cinco métodos de cálculo de flujo de potencia estudiados, para determinar las ventajas que estos presentan con respecto a las técnicas NR y GS implementadas en sistemas de potencia.

1.5. Contribuciones del proyecto de grado

El desarrollo de este proyecto de grado, en el cual se comparan diferentes métodos para flujo de potencia aplicables a sistemas de distribución con topología radial presenta las siguientes contribuciones a la comunidad científica y académica:

- **Artículo de investigación:** M. Herrera-Briñez., O. D. Montoya., L Alvarado-Barrios., and H. R. Chamorro., *"On the Equivalence Between the Successive Approximations and the Matricial Load Flow Formulations,"* Revista Applied Sciences, MDPI, Categoría Q1. **Estado:** En revisión. Este artículo trata sobre la comparación de las formulaciones matemáticas del método de barrido iterativo matricial recientemente desarrollado en [49] y el método de aproximaciones sucesivas presentado en [15], en el cual se demuestra que partiendo de la matriz de incidencia nodo-rama ambos métodos de flujo de potencia son completamente equivalentes.
- **Artículo de investigación:** M. Herrera-Briñez., O. D. Montoya., A. Molina-Cabrera, L. F. Grisales-Noreña, D. A. Giral-Ramirez., *"Convergence analysis of the triangular-based PF approach for AC distribution grids,"* Revista International Journal of Electrical and Computer Engineering, IJECE, Categoría Q2. **Estado:** En revisión. En este artículo se demuestra la convergencia del método de flujo de potencia triangular para redes de distribución radiales con única subestación propuesto originalmente en [50] mediante la aplicación del teorema de punto fijo de Banach.
- **Desarrollo de software:** *Interfaz de usuario para la solución del problema de flujo de potencia en sistemas de distribución radiales con representación monofásica.* Esta es una herramienta desarrollada en el entorno de programación de aplicaciones MATLAB® en la cual se implementan las metodologías de flujo de potencia: aproximaciones sucesivas, método de barrido iterativo matricial, método triangular y las dos aproximaciones lineales por series de Taylor. La aplicación desarrollada permite analizar sistemas de distribución con topología radial a través de la carga de una tabla con información estructurada de las líneas y las demandas, como resultados se reportan las pérdidas de potencia con cada uno de los métodos, el número de iteraciones, así como el nodo con peor regulación de tensión y la gráfica con las magnitudes de las tensiones en cada una de las barras del sistema e información adicional relacionada con cada método.

1.6. Organización del documento

Este trabajo está organizado de la siguiente forma.

- En el capítulo 2 se introduce la ecuación de flujo de potencia para sistemas eléctricos y además se describen los modelados matemáticos de las cinco técnicas que permiten llegar a la solución de la misma.
- En el capítulo 3 se explica la metodología utilizada para el planteamiento de dos de los cinco métodos propuestos (BFS y TM) en el software MATLAB®, por medio de un sistema de prueba de 7 nodos.
- En el capítulo 4, se presentan los dos sistemas de prueba que se utilizan para el desarrollo de los métodos, mostrando el esquema eléctrico y variables de interés de los mismos. De la misma manera, se realiza la introducción de los casos de estudio a desarrollar para cada sistema.
- En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos después de la impremeditación de los métodos en el software MATLAB®, así como las comparaciones pertinentes en términos de número de iteraciones y tiempos de ejecución con las técnicas tradicionales Newton-Raphson y Gauss-Seidel.
- Finalmente, se encuentran las conclusiones y trabajos futuros derivados de este proyecto, además la bibliografía empleada para la realización del mismo.

Capítulo 2

Formulaciones matemáticas para flujo de potencia

En el este capítulo se describen los modelos matemáticos empleados para la formulación de los métodos para el cálculo de flujo de potencia en sistemas de distribución, todos se basan en la misma ecuación escrita en (2.1), esta se conoce como la ecuación de flujo de potencia y describe la corriente de los nodos de una sistema eléctrico en términos de la matriz de admitancias del sistema Y_{bus} y las tensiones de los mismos. Vale la pena aclarar que esta igualdad representa la potencia real y compleja que existen en cada uno de los nodos y con la misma se pueden encontrar las pérdidas técnicas del sistema.

$$S_i^* = V_i^* \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \tag{2.1}$$

donde i y j representan los subíndices asociados a los nodos, S_i corresponde a la potencia aparente neta inyectada en el nodo i, V_i y V_j representan los voltajes complejos de los nodos i y j, respectivamente, y Y_{ij} es la componente compleja de la matriz de admitancias que relaciona a los nodos i y j.

Este capítulo se divide en cuatro secciones en las que se describen de forma matemática los siguientes métodos: Aproximaciones sucesivas, Barrido iterativo, Método triangular y dos formas de Aproximaciones lineales.

2.1. Aproximaciones sucesivas

Este método permite realizar cálculos en sistemas de distribución de tipo radial y mallado, se basa en diferenciar la demanda y generación de la ecuación del flujo de potencia descrita anteriormente para encontrar las pérdidas del sistema [9]. De manera general, la potencia generada en los nodos es conocida, por lo tanto solo se necesita encontrar las

demandas que dependen de las corrientes que circulan por las líneas y de las impedancias de las mismas.

$$S_i^* = S_g^* - S_d^* \tag{2.2}$$

$$S_g^* = diag(V_g^*)\,[Y_{gg}V_g + Y_{gd}V_d] \tag{2.3}$$

$$-S_d^* = diag(V_d^*)[Y_{dg}V_g + Y_{dd}V_d] \tag{2.4}$$

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) son la reescritura de forma matricial de la ecuación general (2.1), separando generación S_g^* y demanda S_d^*, V_g es la tensión en el nodo de generación o slack, que en un sistema de distribución es único y V_d es la tensión en los nodos de demanda que son los restantes del sistema, con estas tensiones además se forma una matriz diagonal que permite la correcta operación con el resto de elementos de la ecuación. Suponga que se tiene un sistema con n nodos, las matrices y vectores mostrados anteriormente son de tamaño: S_g^* y S_d^* = 1 x n, V_d = 1 x (n-1), esto ayuda a explicar porque se utiliza una matriz diagonal en vez de un vector de tensiones, para la operación. A continuación se presenta una explicación del resto de elementos de estas ecuaciones.

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix}$$

De la matriz de admitancias Y_{bus} del sistema se obtiene: $Y_{gg} = Y_{11}$, Y_{gd} el vector desde Y_{12} hasta Y_{1n}, Y_{dg} el vector desde Y_{21} hasta Y_{n1} y Y_{dd} es el resto de términos de la matriz. Y_{gg} se refiere a las admitancias de líneas conectadas al nodo slack, Y_{gd} a las admitancias de las líneas que conectan el nodo slack con los nodos de demanda, Y_{dg} a las líneas que conectan los nodos de demanda al nodo slack, debido a la simetría de la matriz los vectores Y_{gd} y Y_{dg} son iguales [15]. Finalmente el término Y_{dd} relaciona las admitancias de las líneas que conectan a los nodos de demanda entre si. Vale la pena recordar que la matriz Y_{bus} es de tamaño n x n.

De la ecuación de la potencia demandada se desconoce V_d y por lo tanto es necesario reescribir (2.4) para poder encontrar la tensión de los nodos del sistema. La ecuación (2.5) se va a utilizar para el cálculo de las tensiones en los nodos, esta igualdad es no lineal y requiere un proceso iterativo para ser solucionada.

$$V_d = -Y_{dd}^{-1}[diag^{-1}(V_d^*)S_d^* + Y_{dg}V_g] \tag{2.5}$$

$$\boxed{V_d^{(t+1)} = -Y_{dd}^{-1}[diag^{-1}(V_d^{(t)^*})S_d^* + Y_{dg}V_g]} \tag{2.6}$$

La ecuación (2.6), hace referencia al proceso mencionado y t representa el contador de iteraciones. El problema de flujo de potencia estará resuelto si, $\left|{V_d}^{(t+1)} - {V_d}^{t}\right| \leq \varepsilon$ esto quiere decir que si existen un ε, que de define como el error y se calcula como valor absoluto de la diferencia del resultado de dos iteraciones continuas, el valor de la ultima iteración ${V_d}^{(t+1)}$ es el resultado del las tensiones de los nodos del sistema.

Una vez conocidas las tensiones de los nodos del sistema, se tienen las herramientas necesarias para encontrar las pérdidas del mismo y por lo tanto resolver el flujo de potencia. Las pérdidas del sistema se representan como S_{loss} y la ecuación (2.7) permite encontrarlas por medio de la multiplicación de la corriente que pasa por las líneas y la tensión de los nodos.

$$S_{loss} = V^T I^* = V^T \left[Y_{bus} V\right]^* \tag{2.7}$$

donde, $Y^*_{bus} V^*$ es la forma de encontrar la corriente de las líneas en función de los voltajes, y V es un vector compuesto de la tensión en todos los nodos del sistema incluyendo el slack.

2.2. Barrido iterativo

Para la formulación de este método en necesario definir la topología del sistema de distribución con n nodos y r ramas (líneas) y una dirección arbitraria de las corrientes que circulan por las ramas, esto con el fin de formular la matriz de incidencia A que relaciona de manera gráfica todas las corrientes por las líneas I_r y las corrientes netas inyectadas a los nodos I_n [51]. La matriz A de nodo-rama es de tamaño n x r y se forma teniendo en cuenta qué corriente de rama I_r sale o entra al nodo i, con las filas como los nodos y las columnas las ramas del sistema, además teniendo en cuenta lo siguiente:

$$A = \begin{cases} 1 & \text{si la corriente de la rama r sale del nodo i} \\ -1 & \text{si la corriente de la rama r llega al nodo i} \\ 0 & \text{si la rama r no está conectada la nodo i} \end{cases}$$

Una característica importante de matriz es que por columna solo existen dos números diferentes de cero, esto debido a que la corriente de la rama r, solo recorre un tramo que está conectado por dos nodos. Para la formulación del método es necesario separar la matriz A en dos:

$$A = \begin{bmatrix} A_g \\ A_d \end{bmatrix}$$

En donde, A_g es la primera fila de la matriz A y representa las I_r que entran o salen del nodo slack y A_d relaciona las corrientes de rama del resto de nodos del sistema. Con esta

información se procede con la formulación del método de la siguiente manera:

$$I_n = A_d I_r \tag{2.8}$$
$$V_r = A^T V_n = A_g^T V_g + A_d^T V_d \tag{2.9}$$
$$V_r = Z_r I_r \tag{2.10}$$
$$I_r = Z_r^{-1} V_r \tag{2.11}$$

La ecuación (2.8) muestra la relación establecida en entre el vector 1 x n de corrientes de nodos y el vector 1 x r de corrientes de ramas por medio de la matriz de incidencia, las igualdades en (2.9) establecen la relación entre las tensiones de ramas (vector de tamaño 1 x r) y nodos (vector de 1 x n) por medio de la matriz transpuesta A [16], como se puede observar la tensión de los nodos V_n se divide en dos partes, V_g que es la tensión en el nodo slack y V_d que representa el voltaje en el resto de nodos del sistema. Las relaciones (2.10) y (2.11) muestran el vínculo que existe entre las tensiones y corrientes de las líneas y la matriz primitiva de impedancias Z_r de tamaño r x r, que contiene en su diagonal la impedancia serie de cada línea y en el resto de posiciones cero.

$$I_n = A_d Z_r^{-1}(A_g^T V_g + A_d^T V_d) \tag{2.12}$$
$$I_n = A_d Z_r^{-1} A_g^T V_g + A_d Z_r^{-1} A_d^T V_d \tag{2.13}$$

Reemplazando las ecuaciones (2.9) a (2.11) en la ecuación (2.8), se llega a las igualdades (2.12) y (2.13), que representan la corriente de los nodos en término de las tensiones, la matriz primitiva de impedancias y la matriz de incidencia. Por facilidad en el desarrollo del método se define, $Y_{dg} = A_d Z_r^{-1} A_g^T$ y $Y_{dd} = A_d Z_r^{-1} A_d^T$ teniendo en cuenta que estas matrices depende de la topología del sistema y no se modifican con el cálculo, lo que permite reescribir la ecuación (2.13) como la (2.14), esta se expresa como (2.15), de tal manera que se puede utilizar para encontrar las tensiones desconocidas del sistema.

$$I_n = Y_{dg} V_g + Y_{dd} V_d \tag{2.14}$$
$$V_d = Y_{dd}^{-1}(I_n - Y_{dg} V_g) \tag{2.15}$$

De la ecuación (2.1), se obtiene $I_n = -diag(V_d^*)^{-1} S_d^*$, reemplazando en (2.15), se obtiene la ecuación (2.16), que se utiliza para resolver el flujo de carga. Esta ecuación es no lineal y por lo tanto es necesario iterar para encontrar su solución, por medio de la ecuación (2.17).

$$V_d = -Y_{dd}^{-1}[diag^{-1}(V_d^*) S_d^* + Y_{dg} V_g] \tag{2.16}$$
$$\boxed{V_d^{(t+1)} = -Y_{dd}^{-1}[diag^{-1}(V_d^{(t)^*}) S_d^* + Y_{dg} V_g]} \tag{2.17}$$

Como se puede observar estas ecuaciones presentan una estructura similar a las del método anterior, por lo que se solucionan de la misma manera que la ecuación (2.6). Conociendo

las tensiones de los nodos, es posible calcular las pérdidas totales del sistema, con la ayuda de (2.8), en donde i representa cada nodo del sistema.

$$S_{loss} = [Z_r|I_r|]^T |I_r| \tag{2.18}$$

Esta fórmula representa la potencia que se pierde en cada línea del sistema y por lo tanto las pérdidas del mismo.

2.3. Método triangular

Para la formulación de este método se utiliza una matriz que relaciona las corrientes en las líneas con la suma de corrientes de los nodos, esta matriz es triangular y se designa por la letra T [18]; a diferencia de los métodos anteriores este solo funciona con sistemas de distribución radial, ya que la formulación de la matriz T depende de las ramas que recorre la corriente de un nodo i para llegar al nodo slack, este recorrido debe darse sin retornos para que la matriz sea triangular. El primer paso es obtener la matriz T para el sistema, para ilustrar el procedimiento, se utiliza el circuito de la figura 2.1.

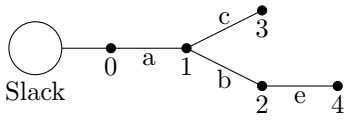


Figura 2.1: Sistema radial de 5 nodos para formulación de la matriz T

Se supone que existe una carga conectada en todos los nodos menos en el nodo cero o slack, en la ecuación (2.19) se escriben estas demandas de corrientes en términos de las corrientes que circulan por las ramas a, b, c y d.

$$\begin{aligned} I_a &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \\ I_b &= I_2 + I_4 \\ I_c &= I_3 \\ I_e &= I_4 \end{aligned} \tag{2.19}$$

De una manera similar se puede encontrar una relación entre las tensiones de los nodos y de las ramas, en este caso se escriben las diferencias de tensión que existen entre el nodo i y el slack, para el ejemplo esta relación se muestra en (2.20).

$$\begin{aligned} V_1 &= V_g - V_a \\ V_2 &= V_g - V_a - V_b \\ V_3 &= V_g - V_a - V_c \\ V_4 &= V_g - V_a - V_b - V_e \end{aligned} \tag{2.20}$$

El siguiente paso es escribir las ecuaciones anteriores de forma matricial como se muestra en la ecuación (2.21) para las corrientes y en (2.22) para las tensiones.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_g \\ V_g \\ V_g \\ V_g \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_e \end{pmatrix} \tag{2.22}$$

La matriz triangular que relaciona las corrientes en (2.21), es la matriz T para el sistema de 5 nodos mostrado, gracias a estas ecuaciones se puede escribir las siguientes igualdades [47].

$$I_r = TI_n \tag{2.23}$$
$$V_d = V_g - T^T V_r \tag{2.24}$$
$$V_r = Z_r Ir \tag{2.25}$$
$$V_d = V_g - T^T Z_r T I_r \tag{2.26}$$

La ecuaciones (2.23) y (2.24) se obtiene de la relación de matrices en (2.21) y (2.22), siendo V_g un vector de tamaño 1 x n (n es la cantidad de nodos) compuesto por la tensión del nodo slack. Reemplazando (2.23) en (2.25) y esta a su vez en (2.24), se obtiene la ecuación (2.26) que se conoce como la ecuación del método triangular para el flujo de potencia.

$$V_d = V_g - T^T Z_r T diag(V_d^*)^{-1} S_d^* \tag{2.27}$$
$$\boxed{V_d^{(t+1)} = V_g - T^T Z_r T diag(V_d^{(t)^*})^{-1} S_d^*} \tag{2.28}$$
$$S_{loss} = [Z_r |I_r|]^T |I_r| \tag{2.29}$$

Por ultimo haciendo $I_n = diag(V_d^*)^{-1} S_d^*$, se obtiene (2.27) que es la ecuación que se utiliza para calcular las tensiones en todos los nodos de demanda del sistema. Esta ecuación no es lineal y por lo tanto es necesario realizar iteraciones por medio de la recuación (2.28), hasta que se encuentre un valor ε tal que, $\left|{V_d}^{t+1} - {V_d}^t\right| \leq \varepsilon$. La fórmula necesaria para calcular las pérdidas totales del sistema es (2.29), que es la misma utilizada en el método anterior.

2.4. Aproximaciones lineales por series de Taylor

Con la ayuda de la serie de Taylor se estudian dos formas de linealizar la ecuación de flujo de potencia, vale la pena recordar que esta serie proporciona una buena forma de

aproximar el valor de una función, en términos del valor de la misma en un punto conocido como centro y sus derivadas en otro punto. Lo anterior implica que por medio de ella se pueden reescribir funciones no lineales en términos del valor de la misma en un punto conocido y de sus enésimas derivadas, esto se muestra en forma general en la ecuación (2.30).

Para el desarrollo de de los métodos, se decide trabajar la serie con $n = 1$, ya que se desea linealizar las funciones y basta con reescribirlas términos de la primera derivada y su valor en punto tomado como centro, para obtener una buena aproximación.

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} (x - x_0)^n \tag{2.30}$$

2.4.1. Primer método

Sea (2.31) la función definida para linealizar por medio de la serie de Taylor, el desarrollo de la serie se muestra en (2.32).

$$f(V_i^*) = \frac{1}{V_i^*} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned} f(V_i^*) &= \frac{1}{V_{i0}^*} - \frac{1}{V_{i0^2}^*}(V_i^* - V_{i0}^*) \\ f(V_i^*) &= \frac{2}{V_{i0}^*} - \frac{1}{V_{i0^2}^*} V_i^* \end{aligned} \tag{2.32}$$

Si se reescribe (2.1) como (2.33), se puede ver que se puede reemplazar en esta la ecuación que se linealizó en (2.32). Además, solo la parte de demanda de esta ecuación es la no lineal, por lo que en este caso $S_i^* = S_d^*$, de la ecuación (2.4) se conoce esta expresión. Con estas consideraciones se encuentra la igualdad (2.34) que representa la forma de calcular el flujo de potencia después de linealizar [20], en donde la matriz diagonal $V_{do} = V_{i0}$ representa la condición inicial de la tensión el los nodos del sistema sin tener en cuenta el slack; el lado izquierdo de esta expresión requiere ciertas modificaciones para tener coherencia en la operación de los vectores y matrices, después de esto la expresión se convierte en (2.35).

$$\frac{1}{V_i^*} S_i^* = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \tag{2.33}$$

$$-(\frac{2}{V_{do}^*} - \frac{1}{V_{do^2}^*} V_d^*) S_d^* = [Y_{dg} V_g + Y_{dd} V_d] \tag{2.34}$$

$$-[2diag^{-1}(V_{do}^*) - diag^{-2}(V_{do}^*) diag^{-1}(V_d^*)] S_d^* = [Y_{dg} V_g + Y_{dd} V_d] \tag{2.35}$$

$$-2diag^{-1}(V_{do}^*) S_d^* + diag^{-2}(V_{do}^*) diag(S_d^*) V_d^* - Y_{dg} V_g - Y_{dd} V_d = 0 \tag{2.36}$$

Después de organizar y agrupar términos asegurándose de que las dimensiones de las matrices y vectores son correctos, se puede escribir la ecuación resultante (2.36) como $AV_d^* + BV_d + C = 0$, la solución propuesta a esta ecuación lineal es (2.37), el subíndice $\Im$ hace referencia a la parte imaginaria y $\Re$ a la parte real [12]. Las equivalencias para A, B y C se encuentran en (2.38).

$$-\begin{pmatrix} A_\Re + B_\Re & A_\Im - B_\Im \\ A_\Im + B_\Im & B_\Re - A_\Re \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_\Re \\ C_\Im \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{d\Re}^{(t)} \\ V_{d\Im}^{(t)} \end{pmatrix} \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned} A &= diag^{-2}(V_{do}^*)diag(S_d^*) \\ B &= -Y_{dd} \\ C &= -(2diag^{-1}(V_{do}^*)S_d^* + Y_{\mathrm{dg}}V_{\mathrm{g}}) \end{aligned} \tag{2.38}$$

De la solución de este sistema matricial se obtiene un vector que se divide en dos, la primera parte contiene la parte real de la tensión de los nodos y la segunda la parte imaginaria. Una vez obtenido este primer valor, es necesario realizar iteraciones por medio de la ecuación (2.39), hasta que $\left|{V_d}^{t+1} - {V_d}^{t}\right| \leq \varepsilon$, con las mismas condiciones que en los métodos anteriores. La fórmula para calcular las pérdidas con este método se muestra en (2.40).

$$\begin{aligned} \boxed{\begin{pmatrix} V_{d\Re}^{(t+1)} \\ V_{d\Im}^{(t+1)} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} A_\Re + B_\Re & A_\Im - B_\Im \\ A_\Im + B_\Im & B_\Re - A_\Re \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_\Re \\ C_\Im \end{pmatrix}} \\ A = diag^{-2}(V_d^{(t)^*})diag(S_d^*) \\ B = -Y_{dd} \\ C = -(2diag^{-1}(V_d^{(t)^*})S_d^* + Y_{\mathrm{dg}}V_{\mathrm{g}}) \end{aligned} \tag{2.39}$$

$$S_{loss} = V_d^T \left[Y_{bus}V_d\right]^* \tag{2.40}$$

2.4.2. Segundo método

Basado en (2.1), se obtiene la siguiente ecuación:

$$-S_d^* = diag(V_d^*)Y_{dg}V_g + diag(V_d^*)Y_{dd}V_d \tag{2.41}$$

El segundo término de (2.41) es no lineal, por tanto se utiliza la serie de Taylor mostrada en (2.30) para una función de la forma $f(x, y)$, para este caso es $f(diag(V_d^*), V_d) = diag(V_d^*)Y_{dd}V_d$, el desarrollo de la serie da como resultado:

$$f(diag(V_d^*), V_d) = diag(V_d^*)Y_{dd}V_{do} + diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_d - diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_{do} \tag{2.42}$$

Reemplazando en (2.41) y organizando términos se obtiene:

$$\begin{gathered} -S_d^* = diag(V_d^*)[Y_{dg}V_g + Y_{dd}V_{do}] + diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_d - diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_{do} \\ diag(Y_{dg}V_g + Y_{dd}V_{do})V_d^* + diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_d + (S_d^* - diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_{do}) = 0 \end{gathered} \tag{2.43}$$

La ecuación (2.43), tiene la forma $AV_d^* + BV_d + C = 0$, por lo que la solución propuesta en (2.37), se puede aplicar pero con los siguientes valores:

$$\begin{aligned} A &= diag(Y_{dg}V_g + Y_{dd}V_{do}) \\ B &= -diag(V_{do}^*)Y_{dd} \\ C &= S_d^* - diag(V_{do}^*)Y_{dd}V_{do} \end{aligned}$$

Una vez solucionada la ecuación, es necesario iterara con la ecuación (2.44) y los valores mostrados en (2.45) hasta encontrar el valor ε tal que $\left|{V_d}^{t+1} - {V_d}^t\right| \leq \varepsilon$ y con estos valores de tensión obtenidos, se puede calcular las pérdidas del sistema con (2.40).

$$\boxed{\begin{pmatrix} V_{d\Re}^{(t+1)} \\ V_{d\Im}^{(t+1)} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} A_\Re + B_\Re & A_\Im - B_\Im \\ A_\Im + B_\Im & B_\Re - A_\Re \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_\Re \\ C_\Im \end{pmatrix}} \tag{2.44}$$

$$\begin{aligned} A &= diag(Y_{dd}V_g + Y_{dd}V_d^{(t)}) \\ B &= -diag(V^{(t)^*})Y_{dd} \\ C &= S_d^* - diag(V^{(t)^*})Y_{dd}V_d^{(t)} \end{aligned} \tag{2.45}$$

Capítulo 3

Metodología propuesta

En este capítulo se va a explicar la implementación paso a paso de los métodos de barrido iterativo y el método triangular[1] en el software MATLAB®, que representa una poderosa herramienta para el desarrollo de modelos matemáticos como los expuestos en el capítulo anterior. Para facilitar la explicación, se utiliza el sistema mostrado en la figura 3.1 que fue tomado de [52], que consta de 7 nodos siendo el primero el slack, con una base de tensión y de potencia de 23 kV y 1 MVA respectivamente, en la Tabla 3.1 se encuentran los valores de resistencia y reactancia de las líneas y la potencia demandada en cada nodo.

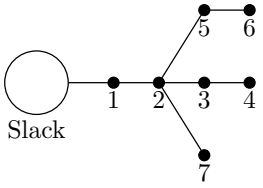


Figura 3.1: Sistema de prueba de 7 nodos

Tabla 3.1: Parámetros eléctricos para el sistema de 7 nodos usado explicar implementación en MATLAB®

Nodo i	**Nodo** j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j [**kW**]	Q_j [**kvar**]
1	2	0.5025	0.3025	1000	600
2	3	0.4020	0.2510	900	500
3	4	0.3660	0.1864	2500	1200
2	5	0.3840	0.1965	1200	950
5	6	0.8190	0.7050	1050	780
2	7	0.2872	0.4088	2000	1150

[1]Estos métodos se seleccionan debido a que resumen en gran medida los principales aspectos de implementación que tienen todos los métodos de flujo de potencia estudiados en este proyecto de grado.

Para todos los métodos mencionados lo primero que se requiere es la información de nodos y de lineas, esta se escribe por medio de las matrices *Lineas* y *Nodos* que se muestran en el código 3.1, además se requiere la tensión y potencia base para poder trabajar el sistema en por unidad.

```
Sbase = 1000; %kVA
Vbase = 23; %kV
%% Lineas [i  j   R[ohm]  X[ohm]]
Lineas = [1  2   0.5025  0.3025;
          2  3   0.4020  0.2510;
          3  4   0.3660  0.1864;
          2  5   0.3840  0.1965;
          5  6   0.8190  0.7050;
          2  7   0.2872  0.4088];
%% Nodo  [i  Tipo  V   P[kW]  Q[kW]]
Nodos = [1   0    1   0       0
         2   1    1   1000    600;
         3   1    1   900     500;
         4   1    1   2500    1200;
         5   1    1   1200    950;
         6   1    1   1050    780;
         7   1    1   2000    1150];
%% Cambio a Por Unidad
Zbase = ((Vbase)^2)/(Sbase);
Lineas(:,3:4) = Lineas(:,3:4)/Zbase;
Nodos(:,4:5) = Nodos(:,4:5)/Sbase;
```

Código de programación 3.1: Información de líneas y nodos del sistema de 7 nodos

Como se puede observar la matriz *Lineas* contiene la información de la resistencia y la reactancia de cada rama y los nodos que ésta conecta, en donde i es el nodo de recibo y j es el nodo de envío. Por otra parte, la matriz *Nodos* contiene la demanda de potencia activa y reactiva de cada nodo del sistema y la tensión inicial. Vale la pena recordar que para el cálculo de flujo de potencia, es necesario establecer una tensión inicial para todos los nodos PQ del sistema, este valor por lo general se toma como 1 p.u. y para el nodo slack en esta posición de la matriz se debe utilizar el valor de tensión asignada. Por último, se realiza el cambio de valores reales a por unidad en las líneas 19 a 21.

3.1. Desarrollo método BFS

Como se explicó anteriormente la implementación de este método requiere estructurar la matriz de incidencia A, para este caso la dirección que se le da a la corriente es saliendo

del nodo slack, de izquierda a derecha para todas las ramas, teniendo en cuenta esto la lógica con la que se forma esta matriz se encuentra en el código 3.2.

```
%% Formacion de la matriz A
NN=size(Nodos,1);
NL=size(Lineas,1);
A=zeros(NN,NL);
Zr=zeros(NL,NL);
for i=1:NL
    Ni=Lineas(i,1); Nj=Lineas(i,2);
    A(Ni,i)=1;
    A(Nj,i)=-1;
    Zr(i,i)= Lineas(i,3)+1j*Lineas(i,4);
end
```

Código de programación 3.2: Formación de la matriz A

Lo primero que se necesita son las dimensiones de la matriz A, como ésta es de tipo nodo-rama las filas son el número de nodos y las columnas son el número de ramas, en la línea 4 se crea la matriz de ceros del tamaño indicado. La matriz A se llena con 1 o -1 dependiendo del nodo que recibe o envía la corriente, en la matriz *Lineas* se encuentra consignada la información de los nodos de envío y recibo para cada rama, por lo que solo es necesario ubicar las posiciones de los números de las primeras dos columnas de ésta en la matriz A.

Esto se realiza por medio de un ciclo *for* que se ejecuta con el contador i de uno en uno hasta el número de lineas, las variables N_i y N_j entregan en número que se encuentra en la posición i de la primera y segunda columna de *Lineas* respectivamente y luego en la posición $A(N_i, i)$ se posiciona un 1 y en la $A(N_j, i)$ un -1. En (3.1) se presenta la matriz A para el sistema de 7 nodos desarrollada en MATLAB®. En la Figura 3.2, se muestra el diagrama de flujo del proceso para crear la matriz A.

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

De manera paralela, se crea Z_r que es la matriz primitiva de impedancias que contiene los valores de la impedancia de cada línea en su diagonal y cero en el resto de posiciones, con ayuda del mismo ciclo *for* se puede crear esta matriz extrayendo de cada posición de la matriz *Lineas* la columna 3 y 4 para obtener la resistencia y reactancia de cada linea,

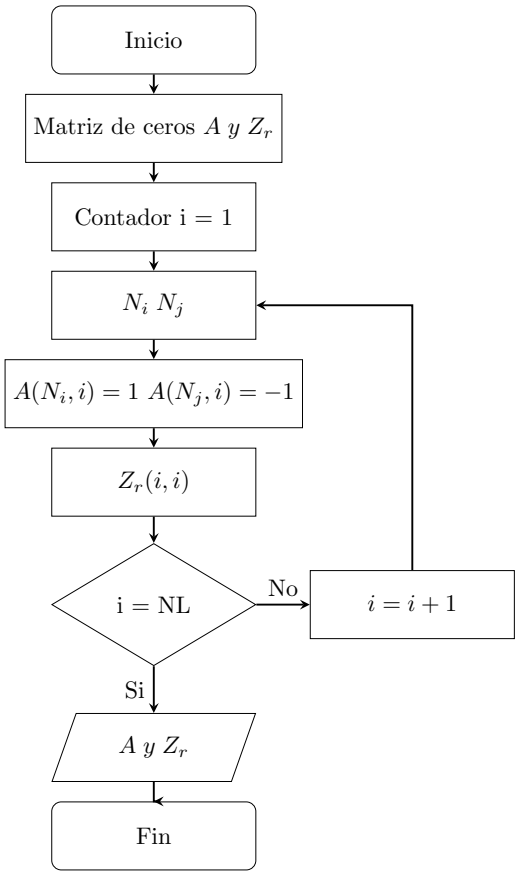


Figura 3.2: Diagrama de flujo para creación de matriz A y Z_r

esta matriz es diagonal y por lo tanto cuadrada. La matriz de impedancias primitivas multiplicada por $1 * 10^{-3}$ para el sistema de la figura 3.1 se presenta en (3.2).

$$Z_r = \begin{pmatrix} 0{,}9 + 0{,}6i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}8 + 0{,}5i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}7 + 0{,}4i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}7 + 0{,}4i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}5 + 1{,}3i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}5 + 0{,}8i \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

En el código 3.3 se definen los parámetros necesarios para solucionar el flujo de potencia, en donde *tol* hace referencia a ε que es la diferencia que debe existir entre dos valores de tensión de dos iteraciones contiguas para que el método se resuelva. De la línea 3 a la 10 se extrae información de las matrices ya creadas para escribir la ecuación (2.16), el detalle de estas variables se encuentra en la sección 2.2.

```
%% Metodo de barrido iterativo
tol=1e-6;
Ao=A(1,:);
Ad=A(2:end,:);
Ydd=Ad*inv(Zr)*Ad.';
IYdd=inv(Ydd);
Ydg=Ad*inv(Zr)*Ao.';
Vdo=Nodos(2:end,3);
Vg=Nodos(1,3);
Sd=Nodos(2:end,4) + 1j*Nodos(2:end,5);
itermax=100;
for t=1:itermax
    Vd=-IYdd*((inv(diag(conj(Vdo))))*conj(Sd)+Ydg*Vg);
    if max(abs((abs(Vd)-abs(Vdo))))<=tol
        V=[Vg;Vd];
        break
    else
        Vdo=Vd;
    end
end
```

Código de programación 3.3: Método de barrido iterativo

El proceso iterativo que se mencionó, se realiza por medio de un ciclo *for* y para esto es necesario crear un limite de iteraciones en las que este se puede ejecutar, esta es la función de la variable *itermax*. Dentro del ciclo *for* se fórmula la ecuación (2.16) con la tensión V_{do} sacada de la matriz *Nodos*, la línea 14 se encarga de verificar que la tensión calculada V_d de la iteración t restada de la tensión de la iteración $t+1$ sea menor al valor de tolerancia descrito, de no cumplirse la tensión de la iteración $t+1$ es el nuevo valor de V_{do} para la iteración $t+2$ y así sucesivamente hasta cumplir con el valor de tolerancia. Una vez este valor se cumpla, se resuelve el flujo y se forma el vector V con las tensiones encontradas.

```
%% Perdidas
Vr=Ao.'*Vg+Ad.'*Vd;
Ir=inv(Zr)*Vr;
Sloss=(sum(Zr*(abs(Ir)).^2))*Sbase;
```

Código de programación 3.4: Cálculo de las pérdidas barrido iterativo

Finalmente, en el código 3.4 se muestra como se calculan las pérdidas del sistema implementando la ecuación (2.18), no sin antes calcular las tensiones y corrientes de rama de la forma como se mostró en la sección 2.2. Para este sistema las pérdidas son de

128.057 kW. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo que sintetiza el proceso para el cálculo de pérdidas con el método BFS [16].

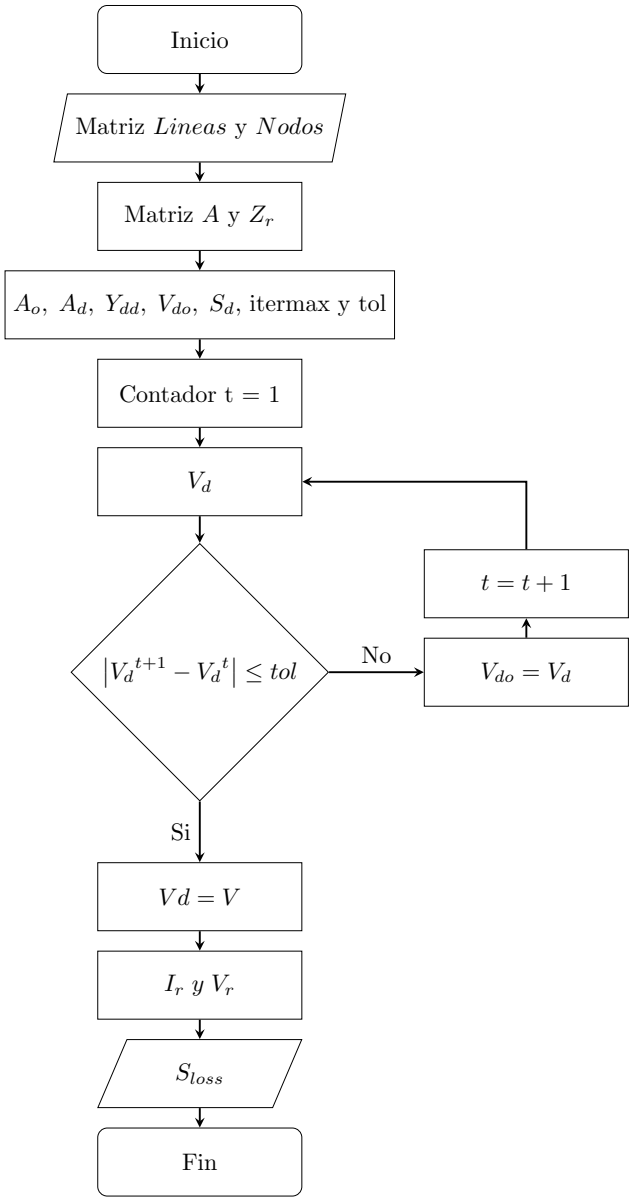


Figura 3.3: Diagrama de flujo para BFS

3.2. Desarrollo TM

El desarrollo de este método se basa en la formulación de la matriz triangular T que se menciona en la primera parte de la sección 2.3, como allí se explicó la forma en la que

ésta se obtiene, solo resta explicar la lógica utilizada en MATLAB®, en 3.5 se muestra el código utilizado.

```
%% Formacion de la matriz T
NL=size(Lineas,1);
T=zeros(NL,NL);
Zr=zeros(NL,NL);
for i=NL:-1:1
    Zr(i,i)= Lineas(i,3)+1j*Lineas(i,4);
    T(i,i)=1;
    Ni=Lineas(i,1);
    while Ni ~= 1
        Ni=Ni-1;
        T(Ni,i)=1;
        Ni=Lineas(Ni,1);
    end
end
```

Código de programación 3.5: Formación de la matriz T

En la segunda columna de la matriz *Lineas* se encuentra el nodo de recibo y estos se ordenan de menor a mayor, con sus respectivos valores de nodo de envío y de impedancia para cada linea, esto se hace con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los procesos implementados en el software para el cálculo de la matriz T.

Lo primero que se debe saber es que esta matriz se llena por columnas de derecha a izquierda y de abajo hacia arriba, esto quiere decir que se empieza por la ultima columna y la ultima posición de esta. El tamaño de esta matriz cuadrada se define por número de líneas del sistema NL, y por esta razón el ciclo for utilizado para su construcción inicia desde NL y va disminuyendo de uno en uno. El primer paso dentro del ciclo for es poner los unos en la diagonal de la matriz, que son necesarios debido a la naturaleza de la misma, luego se crea la variable N_i que regresa el valor de la posición i de la primera columna de *Lineas*, esto se realiza para ayudar a la ejecución del ciclo *while* que se realiza mientras que N_i sea diferente de uno.

Dentro de este ciclo se modifica el posible valor de N_i ya que es necesario que se recorran varias filas de la matriz *Lineas* para formación de la matriz T, la función principal de este ciclo es encontrar el valor de $N_i - 1$ en la matriz líneas y poner un uno en esta posición de fila y en el valor de i de columna, luego de esto modificar a N_i de tal manera que tome el valor que tiene la matriz *Lineas* en esa fila, de esta manera se garantiza que con este ciclo se realice el recorrido de la matriz *Lineas* de abajo hacia arriba posicionando unos a medida que se encuentra la relación entre las filas de esta, la matriz T para el sistema de 7 nodos propuesto se presenta en (3.3).

De manera paralela se construye la matriz primitiva de impedancias con las impedan-

cias de cada línea en la diagonal dependiendo de la posición de la línea en la matriz *Lineas* y de la misma manera que se hizo en el anterior método, por lo tanto la matriz Z_r es la misma presentada en (3.2).

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo guía para la construcción de estas matrices.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

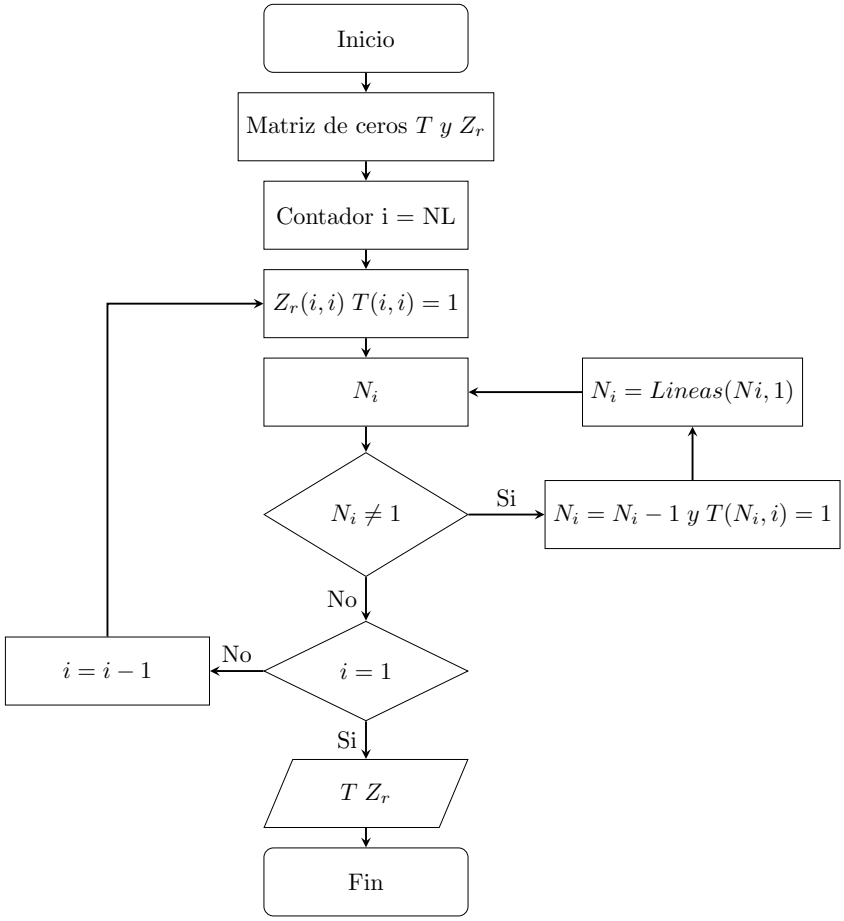


Figura 3.4: Diagrama de flujo para construcción de la matriz T y Z_r

```
%% Metodo triagular
tol=1e-6;
Vdo=Nodos(2:end,3);
Vg=Nodos(1,3);
Tt=T.';
Sd=Nodos(2:end,4) + 1j*Nodos(2:end,5);
Vo=ones(NL,1)*Vg;
Z=Tt*Zr*T;
itermax=100;
for t=1:itermax
    Vd=Vo-Z*((inv(diag(conj(Vdo))))*conj(Sd));
    if max(abs((abs(Vd)-abs(Vdo))))<=tol
        V=[Vg;Vd];
        break
    else
        Vdo=Vd;
    end
end
```

Código de programación 3.6: Método triangular

Luego en el código 3.6 en las primeras 9 líneas se definen las variables que se van a utilizar para el método, V_{do} es la tensión inicial de los nodos que se define en la matriz Nodos, V_g es la tensión del nodo slack que luego se transforma en el vector columna V_o esto para cumplir con las dimensiones de la ecuación (2.26), T_t es la matriz T transpuesta que se utiliza en la ecuación (2.24), S_d es la potencia aparente de cada nodo tomada de la matriz $Nodos$, Z se define como $T_t * Z_r * T$ para facilidad en los cálculos y finalmente se tiene $itermax$ y tol que cumplen la misma función que en el método explicado anteriormente.

En la línea 10, se inicia el proceso iterativo por medio de un ciclo for que se ejecuta de uno en uno hasta $itermax$, dentro este ciclo se define la ecuación (2.27) con las variables mencionadas y el condicional if permite realizar la verificación que la resta de dos tensiones obtenidas en dos iteraciones contiguas cumplan con el valor de tolerancia descrito, de no ser así el vector de tensión de la ultima iteración pasa a ser el vector V_{do} para asi obtener nuevos valores de V_d. Una vez se cumpla con la condición se forma el vector V con las tensiones de esa iteración y se da por terminado el ciclo for por medio del comando $break$.

```
%% Perdidas
In=inv(diag(conj(Vd)))*conj(Sd);
Ir=T*In;
Sloss=(sum(Zr*(abs(Ir)).^2))*Sbase;
```

Código de programación 3.7: Cálculo de pérdidas método triangular

Finalmente, en el código 3.7 se calculan las corrientes de nodo I_n y de rama I_r como se muestra en las ecuaciones (2.27) y (2.23) respectivamente, para poder calculas las pérdidas totales del sistema. En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de flujo para el proceso iterativo del método triangular. Se verifica que el valor de pérdidas para este sistema es de 128.057 kW y con esto se comprueba la correcta implementación de los dos métodos descritos en el software MATLAB®. .

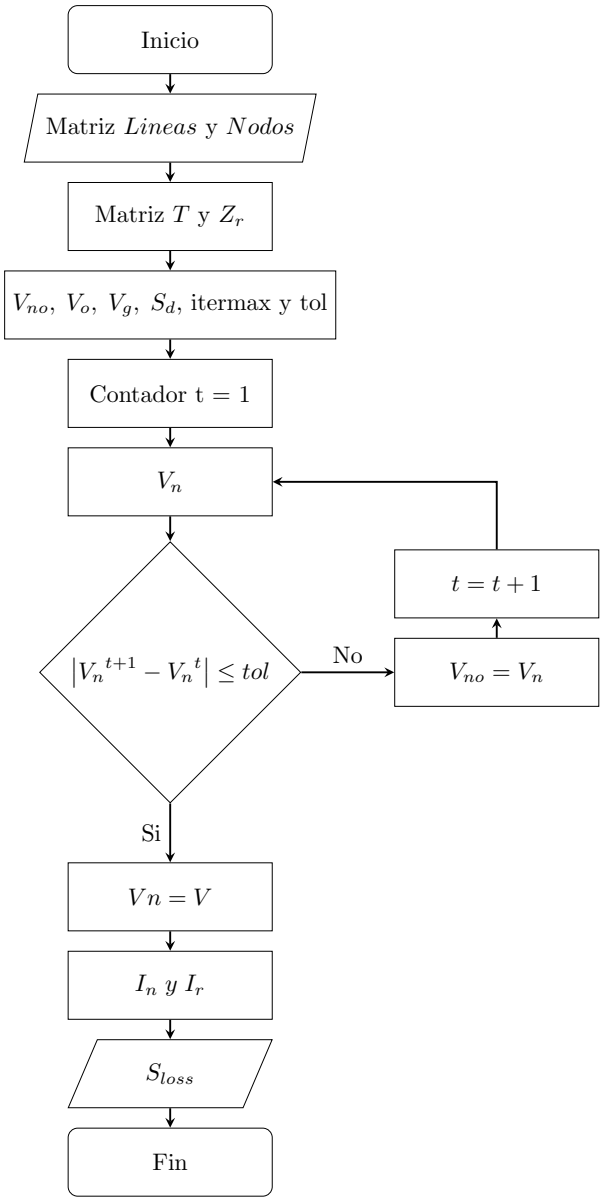


Figura 3.5: Diagrama de flujo para TM

3.3. Información sobre la metodología de las técnicas SA, LA1 y LA2

Debido a la similitud en el proceso iterativo de los métodos formulados, no se muestra la metodología de implementación en el software MATLAB® de las técnicas Aproximaciones Sucesivas y Lineales, ya que con los procedimientos mostrados en la metodología del Barrido Iterativo y el Método Triangular se presentan las bases suficientes para que las técnicas restantes puedan ser desarrolladas en el software.

Como se puede observar en el capítulo 2, las técnicas SA, LA1 y LA2 se desarrollan con la reescritura y separación de la matriz de admitancias del sistema (Y_{bus}), su desarrollo se estudia ampliamente en los cursos de análisis de sistemas de potencia, por lo cual se hace innecesaria su explicación en esta sección. No obstante en en apéndice A, se realiza una breve introducción de como se obtiene esta matriz para cualquier sistema eléctrico, ya sea de transmisión o distribución.

Una vez se tiene la matriz de admitancias del sistema, para implementar el método SA solo basta separarla como se indica en la sección 2.1, para obtener Y_{dd} y Y_{dg}. Con esta información se formula la ecuación (2.6) y se iniciar el proceso iterativo con un ciclo for para obtener las tensiones de los nodos y finalmente las pérdidas de potencia del sistema.

Para los métodos de aproximaciones lineales el proceso es similar, una vez se obtiene la matriz Y_{bus}, es necesario extraer de esta los términos Y_{dd} y Y_{dg}. Luego se forman las matrices A B y C, mostradas en la sección 2.4.1 y 2.4.2 para cada método. El siguiente paso es separar la parte real e imaginaria de cada matriz, para formar la ecuación (2.41) que se resuelve de manera iterativa con un ciclo for para obtener las tensiones de los nodos y con esto las pérdidas de potencia del sistema.

Por último, el lenguaje usado en el código para los métodos SA, LA1 y LA2 y la forma como se escriben las ecuaciones necesarias para la formulación en el software, por ejemplo la fórmula para obtener las pérdidas, se realiza de manera similar a la mostrada en este capitulo, por lo que sería redundante mostrar el paso a paso de la metodología de estos métodos.

Capítulo 4

Sistema de prueba y escenarios

En este capítulo se presentan los sistemas de prueba utilizados para el desarrollo de los métodos formulados en el capítulo 2. Para cada sistema se relacionan las principales características eléctricas como tensión y potencia, así como los valores de resistencia y reactancia de las líneas y la potencia activa y reactiva demanda en cada nodo.

4.1. Sistema de prueba de 33 nodos

Este sistema de prueba se compone de 33 nodos y 32 líneas con una tensión de operación de 12.6kV. El nodo slack está localizado en el nodo 1 y su configuración se presenta en la figura 4.1. Se consideran bases de tensión y de potencia de 12.66 kV y 1000kVA, respectivamente. La información de las lineas, así como la carga demandada de los 33 nodos se muestra en la tabla 4.1. Este sistema fue tomado de [52].

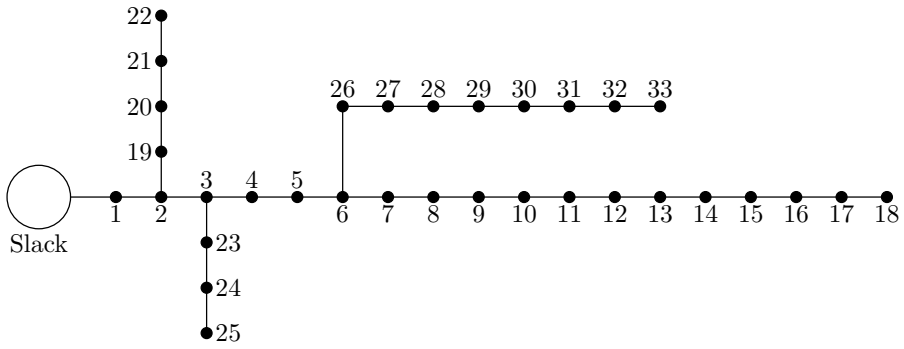


Figura 4.1: Sistema de prueba de 33 nodos

Tabla 4.1: Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 33 nodos

Nodo i	**Nodo** j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j [**kW**]	Q_j [**kvar**]
1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	4	0.3660	0.1864	120	80
4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	6	0.8190	0.7070	60	20
6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	8	1.7114	1.2351	200	100
8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	10	1.0400	0.7400	60	20
10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	13	1.4680	1.1550	60	35
13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	18	0.7320	0.5740	90	40
2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	22	0.7089	0.9373	90	40
3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	25	0.8960	0.7011	420	200
6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	33	0.3410	0.5302	60	40

4.2. Sistema de prueba de 69 nodos

Este sistema de prueba se compone de 69 nodos y 68 líneas con una tensión de operación de 12.6 kV [52]. El nodo slack está localizado en el nodo 1 y su configuración se presenta en la figura 4.2. Se consideran bases de tensión y de potencia de 12.66 kV y 1000 kVA, respectivamente. La información de las lineas, así como la carga demandada de los 33 nodos se muestra en la tabla 4.2.

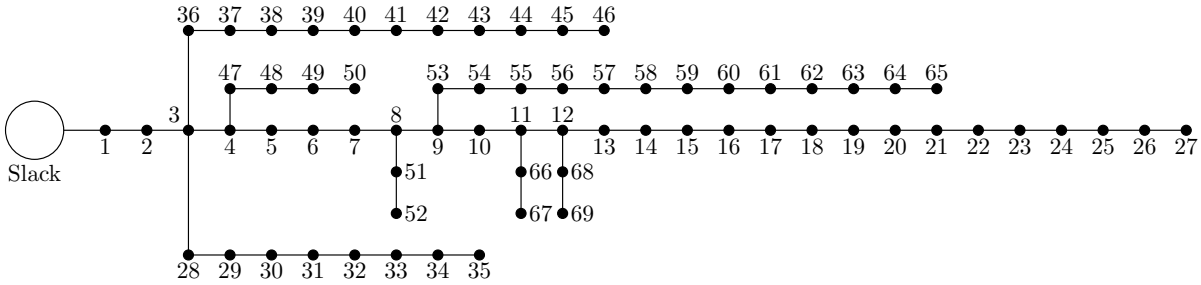


Figura 4.2: Sistema de prueba de 69 nodos

Tabla 4.2: Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 69 nodos

Nodo i	**Nodo** j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j **[kW]**	Q_j **[kvar]**
1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	5	0.0251	0.0294	0	0
5	6	0.3660	0.1864	2.6	2.2
6	7	0.3811	0.1941	40.4	30
7	8	0.0922	0.0470	75	54
8	9	0.0493	0.0251	30	22
9	10	0.8190	0.2707	28	19
10	11	0.1872	0.0619	145	104
11	12	0.7114	0.2351	145	104
12	13	1.0300	0.3400	8	5
13	14	1.0440	0.3450	8	5
14	15	1.0580	0.3496	0	0
15	16	0.1966	0.0650	45	30
16	17	0.3744	0.1238	60	35
17	18	0.0047	0.0016	60	35
18	19	0.3276	0.1083	0	0
19	20	0.2106	0.0690	1	0.6
20	21	0.3416	0.1129	114	81

Nodo i	**Nodo** j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j [**kW**]	Q_j [**kvar**]
21	22	0.0140	0.0046	5	3.5
22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	24	0.3463	0.1145	28	20
24	25	0.7488	0.2475	0	0
25	26	0.3089	0.1021	14	10
26	27	0.1732	0.0572	14	10
3	28	0.0044	0.0108	26	18.6
28	29	0.0640	0.1565	26	18.6
29	30	0.3978	0.1315	0	0
30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	32	0.3510	0.1160	0	0
32	33	0.8390	0.2816	10	10
33	34	1.7080	0.5646	14	14
34	35	1.4740	0.4873	4	4
3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	37	0.0640	0.1565	26	18.55
37	38	0.1053	0.1230	0	0
38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	41	0.7283	0.8509	102	1
41	42	0.3100	0.3623	0	0
42	43	0.0410	0.0478	6	4.3
43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	50	0.0822	0.2011	384.7	274.5
8	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	52	0.3319	0.1140	3.6	2.7
9	53	0.1740	0.0886	4.35	3.5
53	54	0.2030	0.1034	26.4	19
54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	58	0.7837	0.2630	0	0
58	59	0.3042	0.1006	100	72
59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	61	0.5075	0.2585	1244	888

Nodo i	**Nodo** j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j [**kW**]	Q_j [**kvar**]
61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	63	0.1450	0.0738	0	0
63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	65	1.0410	0.5302	59	42
11	66	0.2012	0.0611	18	13
66	67	0.0047	0.0014	18	13
12	68	0.7394	0.2444	28	20
68	69	0.0047	0.0016	28	20

4.3. Escenarios de estudio

Con respecto al sistema de 33 nodos presentado, se revisa el funcionamiento de los cinco métodos descritos encontrando las pérdidas del sistema tal y como se muestra en la figura 4.1. Los otros dos casos de estusio son la adicción de generadores distribuidos en algunos nodos tomado de [52] y de capacitores para compensación reactiva tomando como ejemplo los resultados obtenidos en [53].

Para el sistema de 69 nodos, se realiza la implementación de los cinco métodos con el sistema sin modificaciones, es decir como se muestra en la Figura 4.2 y con los resultados de reconfiguración obtenidos por [1].

Capítulo 5

Aplicación y resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos gracias de la ejecución de los modelos planteados en un software de programación, esto por medio del desarrollo de 3 casos de estudio encontrados en la literatura, con el fin de corroborar convergencia de los métodos y tiempos de ejecución, para poder determinar las ventajas que estos presentan con respecto a los tradicionales. Es importante mencionar que los métodos comparativos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson se emplean como punto de referencia para verificar la eficiencia de los cinco métodos propuestos. Sin embargo, este proyecto de grado no pretende dar a entender que estos métodos no presentan soluciones adecuadas para sistemas de distribución, sino que por el contrario se consideran exactos en términos de la solución del problema de flujo de potencia.

Para verificar el modelado de los métodos explicados, en el capítulo 5 se plantearon algunos escenarios de estudio que se resumen en la Tabla 5.1. El desarrollo y ejecución de los métodos se realizo en el software MATLAB® R2020a, versión: 9.8.0.1396136 y en un computador portátil con Intel® Core™ i5-8300H 2.3 Ghz y 4 GB RAM a 64 bits.

Tabla 5.1: Escenarios a implementar para los casos de estudio

	Escenario 1	**Escenario 2**	**Escenario 3**
Sistema de prueba de 33 nodos	Flujo de potencia para los circuitos mostrados en las Figuras 4.1 y 4.2	Adición de generadores distribuidos tomada de [52]	Inclusión de capacitores tomada de [53]
Sistema de prueba de 69 nodos		Reconfiguración, tomada de [1]	NA

Para todos los escenarios se tomaron muestras de tiempo de 1000 ejecuciones de cada uno de los modelos desarrollados en MATLAB®, esto con el fin de tener una muestra amplia de los tiempos de ejecución y encontrar un valor que se ajustara a la realidad. Se utilizo la función *tic toc* para medir el tiempo de cómputo, la función *tic* registra el tiempo actual y la función *toc* usa este valor para calcular el tiempo transcurrido desde que se

ejecuto el *tic*. Después de realizar varias pruebas, se pudo comprobar que ésta función toma el tiempo que se demora MATLAB® en completar las operaciones, esto quiere decir que los demás procesos que se ejecutan en el computador están involucrados en esta medición.

Es importante hacer la claridad que en las versiones de MATLAB® superiores a 2015b, se tiene una forma de compilación llamada Just in time (JIT) , que pretende reducir el tiempo de procesamiento reutilizando información que no cambia de una ejecución a otra en los ciclos for, esto por lo tanto ayuda a reducir los tiempos de procesamiento de los códigos implementados.

Finalmente los parámetros evaluados para cada método bajo los escenario, son: primero el número de iteraciones necesarias para la convergencia del método con un error $\varepsilon = 1 * 10^{-10}$, el significado de este valor se introdujo en la sección 2.1, denotadas por NI. Segundo el valor medio de los tiempos tomados para las 1000 iteraciones y por ultimo algunos datos que permiten entender el comportamiento de estos tiempos como el valor máximo, mínimo la desviación estándar y el coeficiente de variación que es el valor porcentual de la STD con respecto a la media. Así mismo en los resultados se incluye el valor de las pérdidas técnicas de potencia activa para cada uno de los sistemas, que representan un parámetro importante obtenido a partir del flujo de potencia.

5.1. Escenario 1

Como se mencionó anteriormente, en este escenario se realiza el cálculo de flujo de potencia para el sistema de 33 y 69 nodos mostrado en sección 4. En la Tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos, el valor de las pérdidas de potencia en cada método coincide con el obtenido por medio de NR y GS que son los referentes pues son comúnmente utilizados para este tipo de cálculos, lo que prueba que las técnicas modeladas funcionan de manera correcta. En término del número de iteraciones, los métodos que presentan una convergencia más rápida son los de aproximaciones lineales basados en series de Taylor, esto se debe a la forma lineal de las ecuaciones que se presento en 2.4. Esta medida es esencial, pues permite determinar que método es mas efectivo en cuanto a reducción de error en los valores de tensión en los nodos por iteración, entre menos iteraciones requiera el método para llegar a la solución este se considera más eficiente.

Con respecto a los tiempos de ejecución, para el sistema de 33 nodos el método con menor tiempo es LA2 con una media de 0.608 [ms], comparando los tiempos de los modelos implementados con NR, se puede encontrar una reducción del mismo de hasta del 79 % con respecto al método de aproximaciones lineales y de aproximadamente 48 % para el método con una media mayor que es LA1. Para el sistema de 69 nodos el tiempo menor es de 0.758 [ms] que corresponde al método SA, este presenta una reducción de procesamiento con respecto a NR del 97 % aproximadamente y el método con mayor tiempo de ejecución (LA1) representa un disminución del 79 % con respecto a NR.

Es evidente que para los dos sistemas, la técnica de solución GS es la que más tiempo de

procesamiento toma, esto debido a la complejidad y múltiples ecuaciones que este necesita y es por esto que no se toma como referencia para realizar comparaciones de tiempos de ejecución. Si se requiere entender la forma como se implementa esta técnica en el análisis de flujo de potencia en [54] se desarrolla con detalle.

Los coeficientes de variación indican porcentualmente la variación de los datos de tiempo medidos con respecto a la media, en el caso de NR y GS los coeficientes de variación son menores al 10 % por la forma como estos fueron estructurados en MATLAB®, ya que fueron desarrollados en forma de función, mientras que los métodos implementados para este trabajo se hicieron por medio de un script que la forma mas sencilla de programación dentro del entorno, lo que aumenta las variaciones de los tiempos de ejecución.

Tabla 5.2: Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 1

Sistema de prueba de 33 nodos							
Método	**Pérdidas (kW)**	**NI**	**Información de tiempo de cómputo**				
			Media (ms)	**Max (ms)**	**Min (ms)**	**STD (ms)**	**Coef Var (%)**
NR	210.097	5	2.923	5.606	2.759	0.224	7.675
GS	210.098	2313	248.574	396.338	243.111	18.912	7.577
SA	210.098	10	0.837	2.022	0.806	0.102	12.191
BFS	210.098	10	1.248	3.490	1.028	0.345	27.687
TM	210.098	10	0.820	4.025	0.7142	0.187	22.842
LA1	210.098	4	1.535	6.214	0.788	0.398	25.968
LA2	210.098	5	0.608	2.893	0.502	0.240	39.577
Sistema de prueba de 69 nodos							
Método	**Pérdidas (kW)**	**NI**	**Información de tiempo de cómputo**				
			Media (ms)	**Max (ms)**	**Min (ms)**	**STD (ms)**	**Coef Var (%)**
NR	225.071	5	21.835	33.302	19.677	1.949	8.926
GS	225.071	32687	8430.077	9753.645	7980.820	721.952	8.564
SA	225.071	10	0.758	2.554	0.546	0.214	28.270
BFS	225.071	10	1.744	4.481	1.698	0.401	22.984
TM	225.071	10	1.713	8.218	1.481	0.495	28.909
LA1	225.071	4	4.609	9.243	3.308	1.055	22.890
LA2	225.071	5	3.583	7.244	2.563	0.699	19.508

5.2. Escenario 2

Para el sistema de 33 nodos, se realiza la implementación de generadores distribuidos en los nodos 14, 24 y 30 con potencias entregadas al sistema de 770.9 kW, 1096.9 kW y 1065.8 kW respectivamente. Para el sistema de 69 nodos se realiza la extracción y adición de algunas líneas para cumplir con los criterios de reconfiguración y se adicionan generadores distribuidos en los nodos 21, 33, 46 y 62 con capacidades nominales de 300, 100, 200 y 400 kW respectivamente. En [1] se realiza un estudio para determinar la potencia entregada por cada generador distribuido para optimizar las pérdidas del sistema, por lo que estos terminan entregando potencias diferentes a las nominales, estos valores así como los cambios en las lineas, se relacionan en la Tabla 5.3, en la figura 5.1 se muestra el

diagrama del sistema reconfigurado.

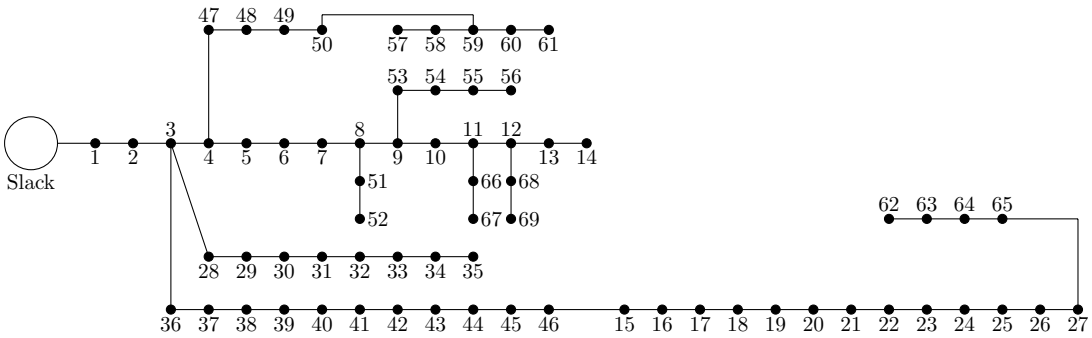


Figura 5.1: Sistema reconfigurado de 69 nodos tomado de [1]

Tabla 5.3: Datos del sistema de 69 nodos para el escenario 2

Generadores distribuidos		**Lineas fuera de servicio**		**Líneas nuevas**			
Nodo j	**P (kW)**	**Nodo i**	**Nodo j**	**Nodo i**	**Nodo j**	$\boldsymbol{R_{ij}}[\Omega]$	$\boldsymbol{X_{ij}}[\Omega]$
21	96.90	14	15	15	46	1	0.5
33	60.70	56	57	50	59	2	1
46	200	61	62	27	65	1	0.5
62	50						

Los resultados obtenidos con cada uno de los métodos para este escenario se muestran en la Tabla 5.4. Revisando el número de iteraciones que toma cada método para converger, los métodos lineales basados en series de Taylor son los que presentan el valor mas bajo, gracias al proceso de linealizar las ecuaciones del flujo de potencia, estos métodos pueden reducir la diferencia de los valores de tensión en los nodos entre iteraciones de manera más rápida que las otras técnicas.

Para los tiempos de cómputo se toma como base el tiempo del método NR, ya que como se explico anteriormente GS presenta tiempos elevados y un numero mayor de iteraciones por su formulación. Si se requiere más información sobre el desarrollo del método Newton-Raphson en [7] se encuentra la explicación pertinente. Teniendo en cuenta esto, el tiempo de ejecución más bajo para el sistema de 33 nodos corresponde a SA con un valor de 0.257 [ms], esto simboliza una reducción aproximada del 93 % en el tiempo de cómputo y el valor mas alto es de 2.7 [ms] que pertenece al método LA1 y que representa una reducción de casi el 32 % en los tiempos. Para el sistema de 69 nodos, el tiempo de 0.748 [ms] que es el más rápido también pertenece a SA, mostrando una reducción del tiempo de ejecución del 94 % y el más lento pertenece a LA1 con un tiempo de 3.564 [ms], representando una reducción del 74 %.

Como se puede evidenciar por los datos mostrados en la Tabla 5.4, para ningún método

dentro de este escenario algún tiempo de ejecución superó el tiempo promedio de la técnica NR, lo que significa que estos son efectivos para reducir los tiempos de procesamiento que se requieren para solucionar el flujo de potencia de sistemas con una cantidad apreciable de nodos.

Con respecto al ultimo parámetro mostrado en los resultados, existe otra razón para el incremento del coeficiente de variación, esto se debe a los cálculos que se realizan aparte de los ciclos for, para NR y GS existen pocas líneas de código por fuera de los ciclos, mientras que para el resto de métodos existen líneas entre estos que facilitan el entendimiento de la programación, como JIT esta diseñado solo para reciclar la información dentro de los ciclos loop, muchos de los procesos desarrollados por fuera de estos se vuelven a calcular en algunas iteraciones, alterando la variabilidad de los tiempos de ejecución.

Tabla 5.4: Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 2

Sistema de prueba de 33 nodos							
Método	**Pérdidas (kW)**	**NI**	**Información de tiempo de cómputo**				
			Media (ms)	**Max (ms)**	**Min (ms)**	**STD (ms)**	**Coef Var (%)**
NR	72.789	4	3.952	8.157	3.866	0.339	8.592
GS	72.789	2148	233.329	342.674	225.863	20.923	8.967
SA	72.789	8	0.257	0.492	0.231	0.029	11.571
BFS	72.789	8	0.895	1.946	0.809	0.182	20.349
TM	72.789	8	0.695	2.011	0.585	0.175	25.191
LA1	72.789	4	2.700	10.466	1.632	0.669	24.786
LA2	72.789	4	0.616	1.101	0.431	0.213	34.641
Sistema de prueba de 69 nodos							
Método	**Pérdidas (kW)**	**NI**	**Información de tiempo de cómputo**				
			Media (ms)	**Max (ms)**	**Min (ms)**	**STD (ms)**	**Coef Var (%)**
NR	82.274	5	13.530	25.105	11.571	1.469	10.859
GS	82.227	26193	6472.203	65153.189	6415.482	764.675	4.949
SA	82.274	8	0.748	1.259	0.554	0.156	20.958
BFS	82.274	7	3.421	4.239	2.163	0.499	14.609
TM	82.274	7	1.289	1.985	0.917	0.231	17.943
LA1	82.274	3	3.564	5.521	2.463	0.677	19.014
LA2	82.274	4	2.739	4.895	2.074	0.516	18.839

5.3. Escenario 3

En este caso de estudio, se realiza la implementación de capacitores para compensación reactiva tomada de [53] en el sistema de 33 nodos presentado originalmente en 4, en este estudio se incluyen capacitores en los nodos 30, 13 y 24 de 900 kW para el primero de 450 kW para los otros dos, las pérdidas totales de este sistema son de 139.072 kW.

Para el número de iteraciones que se necesitaron para convergencia en este caso de estudio, los métodos de aproximaciones lineales presentan el menor número aunque éste similar al número de iteraciones que se obtuvieron con NR, lo que significa que LA1 y LA2 son los métodos mas eficientes para este caso.

Tabla 5.5: Pérdidas y tiempos de cómputo para el escenario 3

Sistema de prueba de 33 nodos							
Método	**Pérdidas (kW)**	**NI**	**Información de tiempo de cómputo**				
			Media (ms)	**Max (ms)**	**Min (ms)**	**STD (ms)**	**Coef Var (%)**
NR	139.072	5	2.866	6.272	2.753	0.192	6.736
GS	139.072	2201	137.738	193.343	135.537	2.895	2.107
SA	139.072	9	0.149	0.363	0.142	0.019	12.751
BFS	139.072	9	1.193	1.596	0.519	0.312	26.141
TM	139.072	9	1.618	2.753	1.116	0.391	24.174
LA1	139.072	4	1.557	4.703	0.997	0.287	18.433
LA2	139.072	5	1.315	3.347	0.537	0.391	29.783

Teniendo en cuenta que la media del tiempo registrado para el método NR es el valor de referencia para revisar las mejorías en los tiempos de ejecución se tiene lo siguiente: para el método con mayor tiempo que es TM con 1.618 [ms] la se logró disminuir en un 44 % y para el menor tiempo que le corresponde a SA con 0.149 [ms] la reducción de tiempos fue de aproximadamente 95 %.

Tabla 5.6: Reducción en los tiempos de cómputo para los sistemas de 33 y 69 nodos

Sistema de 33 nodos							Sistema de 69 nodos				
Método	**Reducción de tiempo de ejecución (%)**						**Método**	**Reducción de tiempo de ejecución (%)**			
	Escenario 1		**Escenario 2**		**Escenario 3**			**Escenario 1**		**Escenario 2**	
	NR	**GS**	**NR**	**GS**	**NR**	**GS**		**NR**	**GS**	**NR**	**GS**
SA	71.365	99.663	93.496	99.889	94.801	99.891	**SA**	96.528	99.991	94.471	99.988
BFS	57.304	99.497	77.353	99.616	58.374	99.133	**BFS**	92.012	99.979	74.715	99.947
TM	71.946	99.670	82.413	99.702	43.545	98.825	**TM**	92.154	99.979	90.473	99.980
LA1	47.485	99.382	31.680	98.842	45.673	98.869	**LA1**	78.891	99.945	73.658	99.944
LA2	79.199	99.755	84.412	99.735	54.117	99.045	**LA2**	83.590	99.957	79.756	99.957

Finalmente en la Tabla 5.6 se presentan los resultados de las reducciones porcentuales de tiempos para los dos sistemas. Lo que muestra la gran mejoría en tiempos de ejecución que tienen los métodos implementados con respecto a NR y GS.

Para el número de iteraciones con respecto a GS se tiene una reducción de éstas del 95 % aproximadamente para todos los métodos y escenarios, lo que implica que estos son mas eficientes. Para NR, en los métodos de aproximaciones lineales se pueden ver reducciones en el escenario 1 y 2 y en algunos casos el numero de iteraciones es igual, esto significa que estos dos métodos son tan eficientes para la solución de flujos de potencia como Newton-Raphson, para el resto de métodos este número es superior lo que indica que pueden no ser tan eficientes para reducir el error de los resultados de una iteración a otra.

5.4. Perfiles de tensión

Uno de los propósitos del flujo de potencia, es encontrar los valores de la tensión en los nodos, es por esto que es importante mostrar los perfiles de tensión para los casos estudiados. En la Figura 5.2 se muestran estos perfiles para el sistema de 33 nodos y los tres escenarios estudiados, para el sistema de 69 nodos esto se muestra en la Figura 5.3. Aunque la mejoría en los perfiles de tensión en los sistemas estudiados está por fuera del ámbito de este trabajo, estas figuras permiten entender el motivo por el cual es importante diseñar y controlar los sistemas eléctricos y la gran herramienta que el flujo de potencia representa para entender el comportamiento de los mismos.

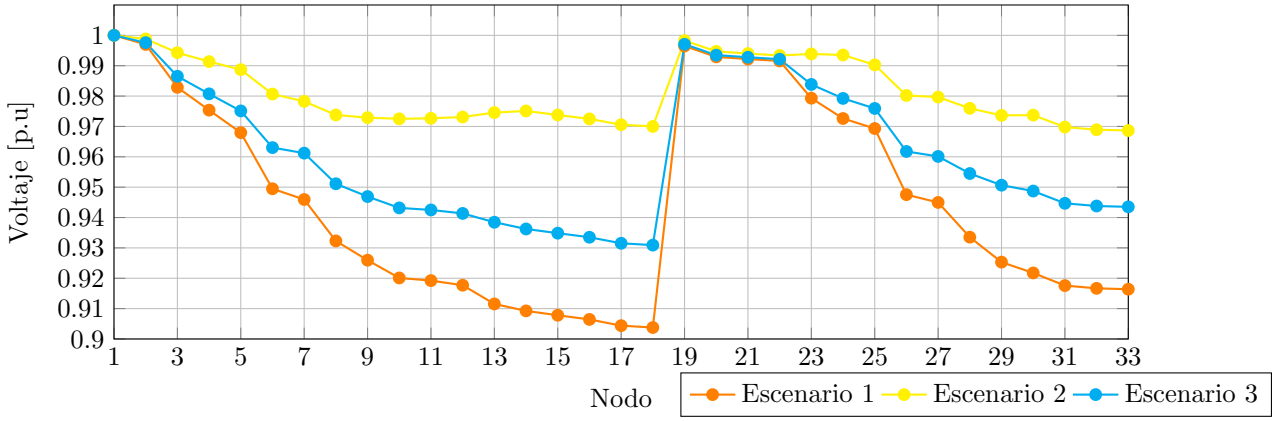


Figura 5.2: Perfiles de tensión para el sistema de 33 nodos

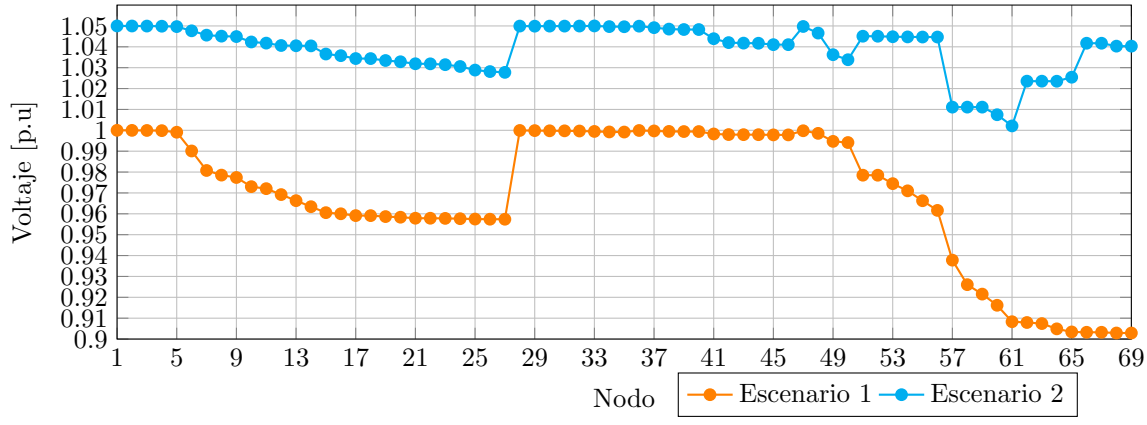


Figura 5.3: Perfiles de tensión para el sistema de 69 nodos

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

Se modelaron y desarrollaron cinco métodos para el cálculo de flujo de potencia en sistemas AC de distribución, luego con la ayuda de dos redes de 33 y 69 nodos y tres escenarios de estudio, se encontraron dos parámetros comparativos para determinar las ventajas de que presentan dichos métodos con respecto a los tradicionales como Newton-Raphson y Gauss-Seidel.

Los parámetros comparativos encontrados son el número de iteraciones para llegar a la convergencia y el tiempo promedio de ejecución de las técnicas desarrolladas en MATLAB®, gracias a estos parámetros se pudo determinar que los métodos implementados presentan alta reducción de tiempos de ejecución, en la mayoría de casos superior al 50 %. Se evidenció además que para el sistema de 69 nodos la reducción porcentual de los tiempos es mayor que la del sistema de 33 nodos, esto indica que se pueden reducir ampliamente los tiempos de ejecución para grandes de sistemas de distribución, esto ayuda a reducir los esfuerzos computacionales que se hacen para el análisis de redes.

La eficiencia de las técnicas, se determina por el número de iteraciones que se necesitan para llegar a un error determinado, en tres de los cinco métodos implementados (AS, BFS y TM) este número aumento con respecto a NR, pero para los que se basan en aproximaciones lineales es valor se mantuvo y en algunas ocasiones disminuyó, esto quiere decir que estos tienen una alta eficiencia y unos tiempos de procesamiento menores a los de NR por que lo se aconseja su uso para sistemas de múltiples nodos.

Por otra parte existe un dato sobre los sistemas que se calculó durante todo el proceso de aplicación y resultados, las pérdidas técnicas de potencia activa representan un valor de extrema importancia dentro del análisis de sistemas eléctricos, pero para interés de este estudio éstas solo permiten identificar si la implementación de los métodos se hizo de manera correcta, ya que como se puede evidenciar en los resultados mostrados no

existe diferencias entre las pérdidas encontradas por los métodos tradicionales y los cinco desarrollados en este trabajo.

Finalmente, se pudo determinar el que número de iteraciones es independiente del tiempo de procesamiento, esto representa una ventaja ya que en la mayoría de casos dependiendo de los recursos computacionales disponibles, se quieren modelos con tiempos de ejecución menores sin importar la eficiencia de los mismos. Este estudio entrega la base para que los cinco métodos implementados se puedan desarrollar en un software de programación mas avanzado para así ajustarse a las necesidades de análisis de redes de cualquier tamaño.

6.2. Trabajos futuros

Realizar las modificaciones necesarias a los métodos propuestos para la inclusión de nodos en los que se conoce la potencia y la tensión o nodos PV, esto con el fin de ampliar el rango de redes para las cuales son aplicables los modelos.

Realizar la implementación del la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB®, en un software que permita su utilización sin necesidad de tener una licencia como Pyton que es de libre descarga y uso. Además modificar la plataforma que se desarrolló para permitir su uso con nodos PV.

Emplear herramientas computacionales más avanzadas que el software MATLAB®, para implementar los cinco modelos con el fin de reducir significativamente los tiempos de ejecución. También se pueden desarrollar los códigos en el mismo software pero empleando un lenguaje mas eficiente para reducir los tiempos de cómputo.

Bibliografía

[1] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Feeder reconfiguration with dispatchable distributed generators in distribution system by tabu search," in *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009, pp. 1–5.

[2] U. H. Ramadhani, M. Shepero, J. Munkhammar, J. Widén, and N. Etherden, "Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, no. March, p. 106003, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106003

[3] M. Laughton and M. Humphrey Davies, "Numerical techniques in solution of power-system load-flow problems," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 111, no. 9, p. 1575, 1964.

[4] M. Tostado, S. Kamel, and F. Jurado, "An effective load-flow approach based on Gauss-Newton formulation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 113, no. March, pp. 573–581, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.006

[5] B. Muruganantham, R. Gnanadass, and N. P. Padhy, "Performance analysis and comparison of load flow methods in a practical distribution system," *2016 National Power Systems Conference, NPSC 2016*, 2017.

[6] S. Mousavizadeh and M. R. Haghifam, "Load flow calculations in AC/DC distribution network including weakly mesh, distributed generation and energy storage units," *IET Conference Publications*, vol. 2013, no. 615 CP, pp. 10–13, 2013.

[7] Mishra Sivkumar and Das Debapriya, "Distribution System Load Flow Methods-A Review," *ICFAI University Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 7–25, 2008.

[8] W. Liu, W. H. Ning, and D. S. Huang, "A modified power flow calculation method for radial distribution system," *2008 China International Conference on Electricity Distribution, CICED 2008*, vol. 1, pp. 2–6, 2008.

[9] M. L. Manrique, O. D. Montoya, V. M. Garrido, L. F. Grisales-Noreña, and W. Gil-González, "Sine-Cosine Algorithm for OPF Analysis in Distribution Systems to Size Distributed Generators," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1052, pp. 28–39, 2019.

[10] H. Feshki Farahani, A. Kazemi, and S. M. Hosseini, "A new algorithm for identifying branch and node after any bus to use load-flow in radial distribution systems," *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, no. 1, pp. 1129–1133, 2007.

[11] S. Jovanovic and F. Milicevic, "Triangular distribution load flow," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no. 5, pp. 60–62, 2000.

[12] O. D. Montoya Giraldo, "On Linear Analysis of the Power Flow Equations for DC and AC Grids with CPLs," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 66, no. 12, pp. 2032–2036, 2019.

[13] M. John, "A general method of digital network analysis particularly suitable for use with low-speed computers," *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*, vol. 108, no. 41, p. 369, 1961.

[14] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam, "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 17, no. 5, pp. 335–346, 1995.

[15] O. D. Montoya and W. Gil-González, "On the numerical analysis based on successive approximations for power flow problems in AC distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 187, no. May, p. 106454, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106454

[16] T. Shen, Y. Li, and J. Xiang, "A graph-based power flow method for balanced distribution systems," *Energies*, vol. 11, no. 3, pp. 1–11, 2018.

[17] A. Garces Ruiz, M. Granada Echeverri, and R. Gallego Rendon, "Flujo De Carga Trifásico Para Sistemas Radiales De Distribución." *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 24, pp. 19–24, 2004.

[18] J. H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882–887, 2003.

[19] O. D. Montoya and W. Gil-González, "Dynamic active and reactive power compensation in distribution networks with batteries: A day-ahead economic dispatch approach," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 85, no. 40, 2020.

[20] A. Garces, "A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, 2016.

[21] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, D. González-Montoya, C. A. Ramos-Paja, and A. Garces, "Linear power flow formulation for low-voltage DC power grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 163, no. March, pp. 375–381, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.003

[22] C. Medina Rueda, "Comparación De Métodos De Programación Matemática Aplicados a La Solución Del Problema De Flujo De Potencia Óptimo," *Scientia Et Technica*, vol. XV, no. 42, pp. 29–34, 2009.

[23] H. Sun, D. Nikovski, T. Ohno, T. Takano, and Y. Kojima, "A fast and robust load flow method for distribution systems with distributed generations," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 236–244, 2011. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.033

[24] J. Olamaei, M. A. Ghasemabadi, and M. H. Kapourchali, "An efficient method for load flow analysis of distribution networks including PV nodes," *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2011*, pp. 3–8, 2011.

[25] A. Memaripour, "Power Flow in Distribution System with consideration of Distributed Generation," *International Journal of Academic Research in Applied science*, vol. 1, no. 3, pp. 60–67, 2012.

[26] A. R. Abul'Wafa, "A network-topology-based load flow for radial distribution networks with composite and exponential load," *Electric Power Systems Research*, vol. 91, pp. 37–43, 2012. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.04.016

[27] K. a. A. Al-anbarri, "A Reliable Load Flow Method for Radial Distribution Systems ," vol. 16, no. 2, pp. 248–265, 2012.

[28] M. Gomez-Gonzalez, F. J. Ruiz-Rodriguez, and F. Jurado, "A binary SFLA for probabilistic three-phase load flow in unbalanced distribution systems with technical constraints," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 48–57, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.11.030

[29] D. R. R. Penido, L. R. D. Araujo, S. Carneiro Junior, and J. L. R. Pereira, "A new tool for multiphase electrical systems analysis based on current injection method," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 410–420, 2013.

[30] R. Prenc, D. Škrlec, and V. Komen, "A novel load flow algorithm for radial distribution networks with dispersed generation," *Technical Gazette*, vol. 20, no. 6, pp. 969–977, 2013.

[31] T. Ramana, V. Ganesh, and S. Sivanagaraju, "Simple and fast load flow solution for electrical power distribution systems," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 245–255, 2013.

[32] S. Xie, X. Wang, C. Qu, X. Wang, and J. Guo, "Impacts of different wind speed simulation methods on conditional reliability indices," *International transactions on electrical energy systems*, vol. 20, no. June 2015, pp. 1–6, 2013.

[33] A. C. Lisboa, L. S. Guedes, D. A. Vieira, and R. R. Saldanha, "A fast power flow method for radial networks with linear storage and no matrix inversions," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 901–907, 2014. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.002

[34] V. V. Murty, B. Ravi Teja, and A. Kumar, "A contribution to load flow in radial distribution system and comparison of different load flow methods," *2014 International Conference on Power Signals Control and Computations, EPSCICON 2014*, no. January, pp. 8–10, 2014.

[35] Maya K.N. and Jasmin E.A., "A Three Phase Power Flow Algorithm for Distribution Network Incorporating the Impact of Distributed Generation Models," *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 326–331, 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.040

[36] K. Peng, C. Zhang, S. Wang, X. Yan, Z. Liu, X. Lu, and K. Wang, "Gauss-Newton hybrid power flow algorithm for AC-DC distribution system," *China International Conference on Electricity Distribution, CICED*, vol. 2016-September, no. Ciced, pp. 10–13, 2016.

[37] U. Ghatak and V. Mukherjee, "An improved load flow technique based on load current injection for modern distribution system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 84, pp. 168–181, 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.05.008

[38] M. S. Mousavizadeh, M. H. Shariatkhah, and M. R. Haghifam, "Load Flow Analysis for AC/DC Distribution Systems with Distributed Generations," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 10, pp. 1057–1067, 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1080/15325008.2017.1318321

[39] P. Wirasanti and E. Ortjohann, "Active distribution grid power flow analysis using asymmetrical hybrid technique," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1738–1748, 2017.

[40] M. A. Abdelkader, M. A. Elshahed, and Z. H. Osman, "A new power flow algorithm for passive and active radial distribution networks," *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 40, pp. 101–118, 2018.

[41] H. Yuan, F. Li, Y. Wei, and J. Zhu, "Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 438–448, 2018.

[42] V. Kumar, S. Swapnil, and V. R. Singh, "Adaptive Algorithm for Solving the Load Flow Problem in Distribution System," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 377–391, 2018.

[43] M. Quintero-Duran, J. E. Candelo, and J. Soto-Ortiz, "A modified backward/forward sweep-based method for reconfiguration of unbalanced distribution networks," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 85–101, 2019.

[44] Z. A. Memon, R. Trinchero, Y. Xie, F. G. Canavero, and I. S. Stievano, "An Iterative Scheme for the Power-Flow Analysis of Distribution Networks based on Decoupled Circuit Equivalents in the Phasor Domain," *Energies*, vol. 13, no. 2, pp. 1–16, 2020.

[45] S. Ouali and A. Cherkaoui, "An Improved Backward/Forward Sweep Power Flow Method Based on a New Network Information Organization for Radial Distribution Systems," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2020, 2020.

[46] A. Tyagi, K. Kumar, M. A. Ansari, and B. Kumar, "An efficient load flow solution for distribution system with addition of distributed generation using improved harmony search algorithms," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 7, no. 1, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1186/s43067-020-00014-7

[47] O. Pathak and P. Prakash, "Load flow solution for radial distribution network," *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2018*, pp. 176–181, 2018.

[48] A. N. Kurlns and D. K. T.wzukus, "A powerful algorithm for distribution systems analysis," *University of I'atras Electrical Engineering & Computer Technology Dept.*, p. 4, 1999.

[49] O. D. Montoya, W. Gil-González, and D. A. Giral, "On the Matricial Formulation of Iterative Sweep Power Flow for Radial and Meshed Distribution Networks with Guarantee of Convergence," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 17, p. 5802, aug 2020.

[50] A. Marini, S. Mortazavi, L. Piegari, and M.-S. Ghazizadeh, "An efficient graph-based power flow algorithm for electrical distribution systems with a comprehensive modeling of distributed generations," *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 229–243, may 2019.

[51] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, W. T. Amin, L. A. Rojas, and J. Campillo, "Vortex Search Algorithm for Optimal Sizing of Distributed Generators in AC Distribution Networks with Radial Topology," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1052, pp. 235–249, 2019.

[52] O. D. Montoya, W. Gil-González, and L. F. Grisales-Noreña, "An exact MINLP model for optimal location and sizing of DGs in distribution networks: A general algebraic modeling system approach," *Ain Shams Engineering Journal*, no. xxxx, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.011

[53] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, and X. S. Yang, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 2775–2786, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.01.004

[54] R. Verma and V. Sarkar, "Application of Modified Gauss-Zbus Iterations for Solving the Load Flow Problem in Active Distribution Networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 168, no. October 2018, pp. 8–19, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.11.005

[55] A. Vijayvargia, S. Jain, S. Meena, V. Gupta, and M. Lalwani, "Comparison between Different Load Flow Methodologies by Analyzing Various Bus Systems," *International Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 127–138, 2016. [Online]. Available: http://www.irphouse.com

[56] C. M. C. Florentin and M. R. Gonz, "Formación y alteración de la matriz de admitancia nodal . Técnica de sobreposición de redes ." *Facultad Politécnica - UNE.*

Apéndices

Apéndice A

Métodos de Newton-Raphson y Gauss-Seidel para flujo de potencia

El flujo de potencia consiste en la determinación de las variables de estado de un sistema eléctrico en condiciones de estado estacionario, i.e., magnitudes y ángulos de los voltajes en cada una de las barras de sistema para una condición de demanda específica. La forma más común de resolver el flujo de potencia es por medio de la formulación del balance de potencia activa y reactiva en cada barra del sistema. Estas se expresan como ecuaciones algebraicas no lineales y por lo tanto se requieren procesos iterativos para su solución [55]. Los métodos Newton-Raphson y Gauss-Seidel son los más conocidos y utilizados a lo largo de la literatura y academia para resolver el problema del flujo de potencia.

Los dos métodos mencionados, utilizan la matriz de admitancias del sistema y es por eso que la primera parte de esta sección se dedica a una breve explicación de como obtenerla para cualquier sistema eléctrico, ya sea de transmisión o distribución. Luego de esto se realiza la formulación de estos métodos mencionados.

A.1. Formación de la matriz de admitancias: Y_{bus}

Esta matriz muestra la conexión física que existe entre los nodos de un sistema. Siempre es cuadrada y de tamaño $n \times n$, en donde n es el número de nodos del sistema. Se obtiene aplicando el método de voltajes de nodo a cada barra del sistema, teniendo en cuenta la ecuación (A.1), en donde r_{ij} y x_{ij} son respectivamente la resistencia y reactancia de la línea que conecta a los nodos i y j.

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \tag{A.1}$$

Pero existe una convención sencilla que permite formar esta matriz, siendo i y j nodos de un sistema eléctrico se tiene que:

- El valor de un elemento Y_{ij} cualquiera de la matriz corresponde al negativo del valor de la admitancia equivalente entre las barras i y j [56]. Si no existe conexión entre ambas barras Y_{ij} es igual a cero, es decir:

$$Y_{ij} = -y_{ij} \tag{A.2}$$

- La diagonal de la matriz o los términos Y_{ii}, se obtienen por la suma de las admitancias de las conexiones que concurren a la barra i [56]. Teniendo en cuenta que si la conexión no existe $y_{ij} = 0$. Es decir:

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^{n} y_{ij}. \tag{A.3}$$

Con ayuda de esta convención se puede formar la matriz de admitancias de cualquier sistema eléctrico. Es importante mencionar que los elementos a tierra modelados como admitancia se adicionan al elemento de la diagonal.

A.2. Ecuación de flujo de potencia

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff a los nodos del sistema, se obtiene la ecuación (A.4) para cualquier nodo i del sistema. Además, la potencia aparente del nodo i está dada por (A.5), que se puede reescribir para encontrar la corriente como (A.6).

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j, \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.4}$$

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^*, \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.5}$$

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^*, \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.6}$$

Combinando las ecuaciones (A.4) y (A.6), se obtiene la ecuación de flujo de potencia que se muestra en (A.7).

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \tag{A.7}$$

A.3. Método Gauss-Seidel (GS)

El método de Gauss-Seidel consiste en reorganizar la ecuación (A.7) en términos de V_i, como se muestra en la ecuación (A.8) y se comienza el proceso iterativo empleando el

contador de iteraciones k, como sigue:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j=1, j<i}^{n} Y_{ij} V_j^{k+1} - \sum_{j=1, j>i}^{n} Y_{ij} V_j^{k} \right), \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.8}$$

Nótese que la ecuación A.8 se aplica para todas las barras del sistema, excepto a aquella donde está conectada el nodo slack, ya que en esta la tensión y el ángulo son perfectamente conocidos. Además, es importante mencionar que en los nodos de demanda la potencia neta inyectada está precedida de un signo negativo, ya que en estos nodos, la potencia sale del nodo. Finalmente el proceso iterativo del método de Gauss-Seidel termina cuando en dos iteraciones continuas el máximo error entre las tensiones es menor que una tolerancia específica ϵ, i.e., $\text{máx}_i \left| V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \right| \leq \epsilon$.

A.4. Método Newton-Raphson (NR)

Debido a la convergencia cuadrática, este método es matemáticamente superior a GS. La matriz Jacobiana J, que es la base de la formulación de NR, da una relación lineal entre los cambios pequeños de tensiones y ángulos y los pequeños cambios de potencia activa y reactiva en el proceso iterativo [55]. Este método parte de separar la ecuación general balance de potencia (A.6) en sus componentes real e imaginaria, como se muestra a continuación.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_i V_j \cos\left(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}\right), \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.9}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_i V_j \sin\left(\theta_j - \delta_i + \theta_{ij}\right), \ \forall i = 1, 2, ..., n \tag{A.10}$$

La solución del flujo de potencia por medio de NR está dada por (A.11), en donde P es la potencia activa, Q es la potencia reactiva, V es la magnitud de la tensión en los nodos y δ es el ángulo de la tensión en los nodos. De esta ecuación se despejan V y δ y se comienza el proceso iterativo.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^k \\ \Delta Q_i^k \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i^k \\ \Delta V_i^k \end{bmatrix} \tag{A.11}$$

En este caso, el proceso iterativo se lleva a acabo con las ecuaciones (A.12) a (A.15). Las dos primeras ecuaciones se conocen como la potencia residual, en donde P_{prog} y Q_{prog} son la potencia activa y reactiva programada para el sistema. En las últimas dos ecuaciones $\delta_i^{(k+1)}$ y $V_i^{(k+1)}$, representan los nuevos valores de tensión en magnitud y ángulo para la

siguiente iteración.

$$\Delta P_i^{(k+1)} = P_{prog} - P_i^k \tag{A.12}$$

$$\Delta Q_i^{(k+1)} = Q_{prog} - Q_i^k \tag{A.13}$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^k - \Delta\delta_i^k \tag{A.14}$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^k - \Delta V_i^k \tag{A.15}$$

Además, es importante aclarar como se construye la matriz J, en (A.16), se muestra la división de la misma.

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \tag{A.16}$$

Tabla A.1: Composición de la matriz Jacobiana

	Orden	Elementos diagonales	Elementos no diagonales
J_1	$(n-1)\times(n-1)$	$\frac{\partial P_i}{\partial\lvert\delta_i\rvert}$	$\frac{\partial P_i}{\partial\lvert\delta_j\rvert}$
J_2	$(n-1)\times(n-1-n_{pv})$	$\frac{\partial P_i}{\partial\lvert V_i\rvert}$	$\frac{\partial P_i}{\partial\lvert V_j\rvert}$
J_3	$(n-1-n_{pv})\times(n-1)$	$\frac{\partial Q_i}{\partial\lvert\delta_i\rvert}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial\lvert\delta_j\rvert}$
J_4	$(n-1-n_{pv})\times(n-1-n_{pv})$	$\frac{\partial Q_i}{\partial\lvert V_i\rvert}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial\lvert V_j\rvert}$

En la tabla A.1, se muestra la forma de calcular cada uno de los componentes de la matriz Jacobiana. Aquí, ∂ hace referencia a la derivada parcial y n_{pv} al número de nodos PV del sistema. El proceso iterativo continua hasta que como en GS, exista una ε, que en este caso se representa con ΔV que cumpla con el valor de tolerancia establecido.

Apéndice B

Manual de usuario del la interfaz gráfica desarrollada en el software MATLAB®

En en siguiente manual se especifican los pasos a seguir para la instalación de la aplicación en el software MATLAB®. Así como el uso de la misma por medio de un ejemplo y la solución de un posible error que se puede presentar en la instalación de la interfaz. Es importante aclarar que se sugiere seguir los pasos indicados uno a uno para garantizar el buen funcionamiento de la aplicación y así obtener resultados adecuados. Para la utilización de esta aplicación es necesario contar con la versión 2020a de MATLAB® o superiores.

B.1. Instalación de la aplicación

La aplicación fue diseñada para utilizarse dentro del entorno "APPS" de MATLAB®, por lo que se sugiere seguir los siguientes pasos para su instalación.

1. Descargue el archivo adjunto que se llama "Flujo de potencia para sistemas de distribución" y guárdelo en una ubicación conocida. Se recomienda la carpeta predeterminada de archivos de MATLAB®. Para más información sobre como encontrar esta carpeta consulte este enlace. El archivo que debe ver guardado en la ubicación seleccionada, se muestra en la figura B.1

2. Con su aplicación MATLAB® abierta, diríjase a la pestaña "APPS" que se encuentra en la parte superior del entorno del software. Y de clic a la opción "Install app". En la figura B.2 se encuentra una ilustración sobre este paso. Una ventana se abrirá, por favor seleccione el archivo que descargó y guardó en el paso 1.



Figura B.1: Ilustración del archivo que se debe obtener después de la descarga

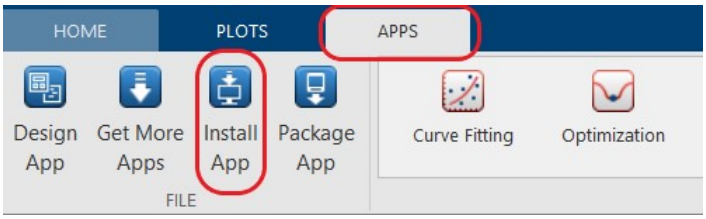
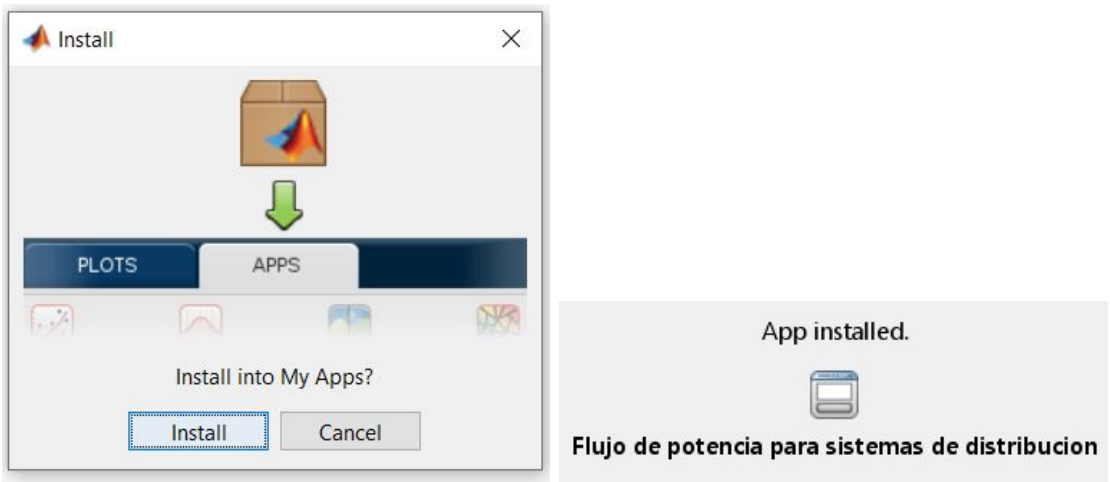


Figura B.2: Ilustración ubicación "APPS" dentro del entorno del software

3. Una vez seleccionado el archivo, por favor de clic en instalar en la ventana que aparece para confirmar la instalación. La aplicación se instalará luego de esto y se mostrará una ventana con la confirmación de instalación. Este proceso se ilustra en la figura B.3.



(a) (b)

Figura B.3: (a) Ilustración de la ventana de confirmación de instalación (b) Aviso de instalación completa

4. En la sección "APPS" del entorno de MATLAB®, encontrará una flecha que le permite ver las aplicaciones instaladas, si el proceso se realizó de manera correcta,

usted debería ver la aplicación como se muestra en la figura B.4.

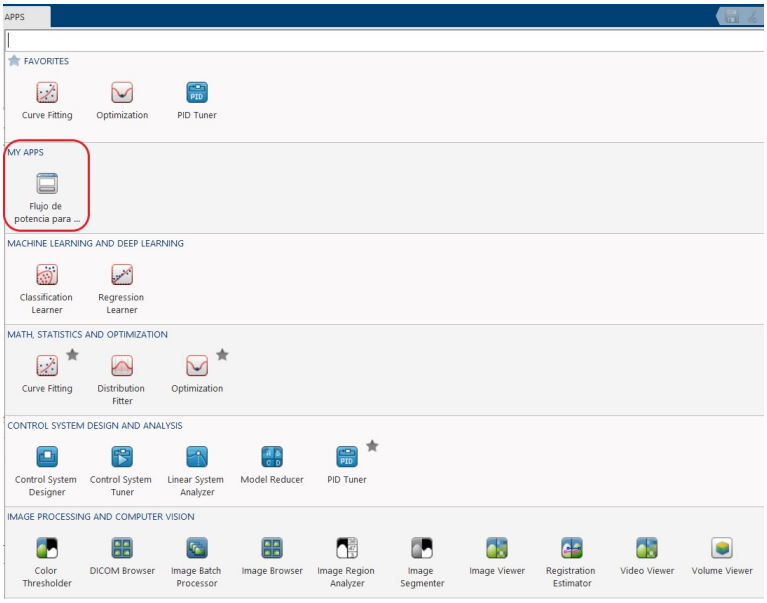


Figura B.4: Ilustración de cómo aparece la aplicación instalada

5. Si lo desea, puede dar clic derecho sobre el icono de la aplicación y agregarla a sus favoritos, para que pueda verla en la barra al inicio de la pestaña “APPS”.

Con estos 5 pasos se completa la instalación de la aplicación en el entorno de MATLAB®. Luego de esto la aplicación está lista para ser usada, lo que significa que cada vez que necesite usarla estará disponible en la pestaña “APPS”. Por favor diríjase a la sección B.2 para información relacionada con el uso de la misma.

B.1.1. Posible error de instalación

Después de realizar los pasos mostrados en la sección B.1, al momento de ejecutar la aplicación se puede presentar el error mostrado en la figura B.5

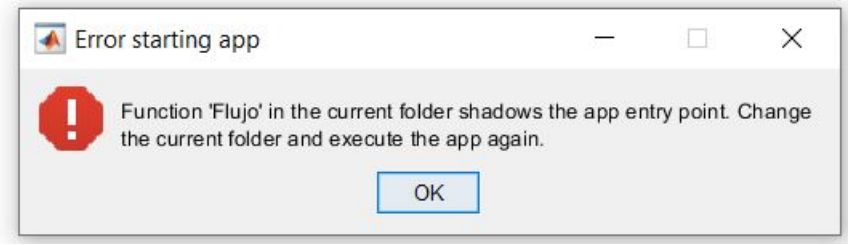


Figura B.5: Error en la instalación de la aplicación

Este error se presenta porque el lugar en donde se descargó y guardo el archivo de la aplicación, no se encuentra predeterminado en la ruta de MATLAB®. Para solucionarlo es necesario buscar la ruta del lugar en donde se encuentra el archivo, para esto se siguiere seguir los siguientes pasos si se cuenta con un computador con Windows:

1. En el explorador de archivos busque el archivo "Flujo de potencia para sistemas de distribución" que es el que contiene la aplicación.
2. Haga clic derecho sobre el archivo y seleccione la opción propiedades.
3. Copie la ruta que se encuentra al frente de la palabra Ubicación.

Si se tiene otro sistema operativo y no conoce los pasos para encontrar la ruta de un archivo, por favor consúltelo en internet. Con la ruta copiada, es necesario escribir el comando "cd" en el Command Window de MATLAB®, seguido de la ubicación entre comillas. Un ejemplo de esto se puede ver la figura B.6. Luego presione la tecla enter.

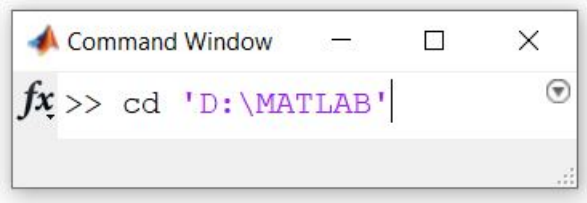


Figura B.6: Ejemplificación uso del comando "cd"

Después de que el comando sea aceptado por MATLAB®, es decir que aparezca de nuevo el símbolo >> en el Command Window, se procede a abrir la aplicación nuevamente como se indicó en la sección B.2 y esta debería funcionar de manera correcta.

B.2. Manual de uso

Luego de que se complete la instalación, el primer paso es ejecutar la aplicación haciendo clic sobre el icono que aparece en la figura B.4 señalado con un recuadro rojo. En las siguientes secciones, después de realizar una pequeña introducción a la interfaz, se ejemplifica el uso de la aplicación por medio del sistema de 7 nodos mostrado en la sección 3.

B.2.1. Introducción a la interfaz

Una vez ejecutada la aplicación, en su pantalla aparecerá una interfaz como la que se muestra en la figura B.7. La descripción de los componentes de esta pestaña por los números señalados en la imagen es la siguiente:

1. Botón de información: Métodos utilizados para el cálculo de flujo de potencia.
2. Selección del sistema bajo estudio: Dos sistemas precargados (IEEE de 33 y 69 nodos). Opción para ingresar el número de nodos de cualquier sistema radial del que se requiera calcular el flujo de potencia.
3. Información para el cálculo: El cálculo se realiza en sistema por unidad, por lo que las bases utilizadas son requeridas. Además se pide la tensión de referencia para el nodo slack que por lo general es 1 y la tolerancia para convergencia o el error que se quiere tener entre dos iteraciones contiguas para terminar el proceso iterativo.
4. Tabla de datos del sistema: Si se utiliza alguno de los sistemas precargados, aquí aparece la información del sistema seleccionado. Si se desea utilizar otro sistema, después de se introducir el número de nodos y presionar la tecla enter, en esta sección se genera una tabla en la que se pueden poner los datos como resistencia y reactancia de las líneas y potencia demandada en los nodos. Para llenar esta tabla se hacen las siguientes aclaraciones:
   - Ni: Nodo de envío - Nj: Nodo de recibo. Esto hace referencia a la conexión física de cada línea asociada a un par nodos. Para la implementación de los métodos utilizados, es necesario dar una dirección a las corrientes que pasan por las líneas, se siguiere saliendo del nodo slack y hacia las cargas. De aquí se puede tomar la referencia del nodo de envío y recibo.
   - El nodo slack se toma como el nodo número uno.
   - Pj y Qj es la potencia demandada en el nodo de envío. Ya que por lo general no se conectan cargas al nodo slack, la primera fila de esta tabla debería contener la potencia demandada en el nodo dos.
   - Se recomienda, que la información de la líneas sea puesta en orden ascendente con respecto al nodo de envío, ya que algunos cálculos de los métodos requieren

esta configuración (aplicar algún método de ordenamiento nodal).



Figura B.7: Ilustración de la primera pestaña de la aplicación

A continuación se explica la información disponible en las dos pestañas restantes de la interfaz:

- Métodos: En la figura B.8, se muestra una ilustración de como se ve esta pestaña. La explicación de los componentes enumerados es la siguiente:

  1. Botón de información: Breve explicación del contenido de la pestaña y de como obtener los parámetros para cada método.

  2. Botón Y_{bus}: Muestra la matriz de admitancias del sistema en el Command Window de MATLAB®.

  3. Nombre de los métodos usados para el cálculo.

  4. Pérdidas: Presenta las pérdidas de potencia activa arrojadas por cada método en por unidad.

5. Número de iteraciones: Muestra el número de iteraciones que requirió cada método para alcanzar el valor de tolerancia.

6. Parámetros del método: Listas de selección con parámetros importantes utilizados en cada método. Una vez seleccione un ítem de la lista este se mostrará en el Command Window.

7. Información adicional: Al presionar este botón, se muestra una breve descripción de cada método. Además, al presionar el botón "Artículo", contenido en la ventana más información, se abre en su navegador un artículo de referencia sobre el método.

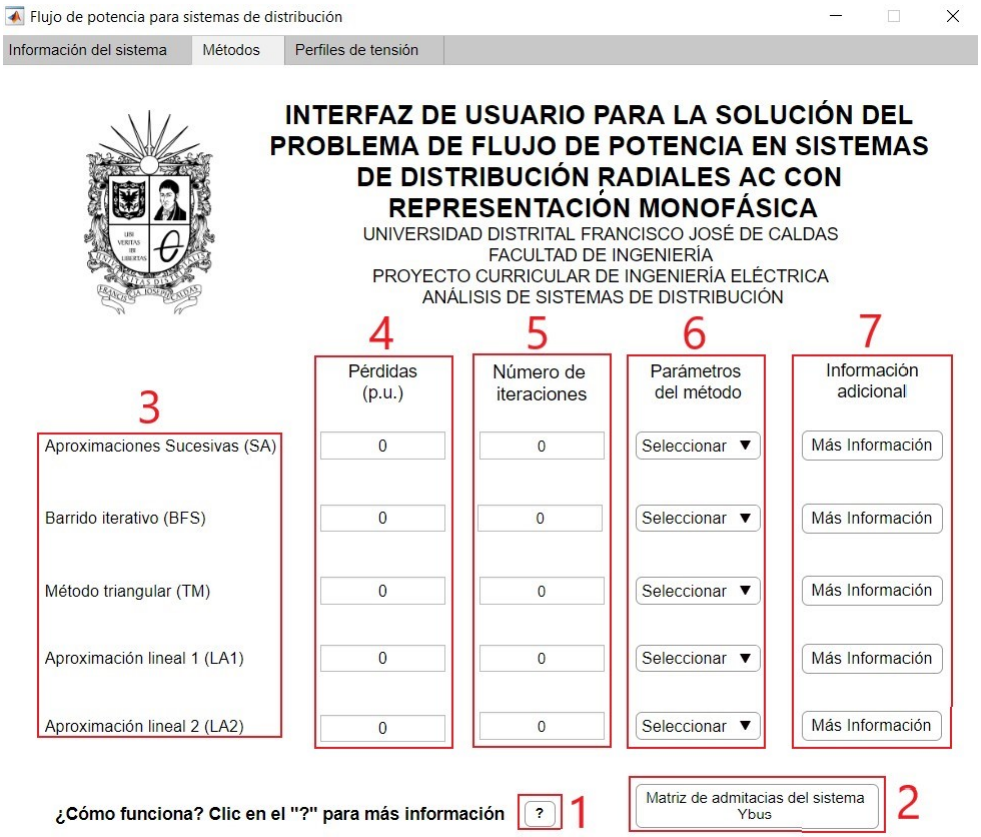


Figura B.8: Ilustración de la segunda pestaña de la aplicación

- Perfiles de tensión: En la figura B.9 se muestra una ilustración de esta pestaña. En el recuadro 1, se observará la gráfica de los perfiles de tensión y en la sección 2 se puede ver los valores de tensión máxima y mínima del sistema.

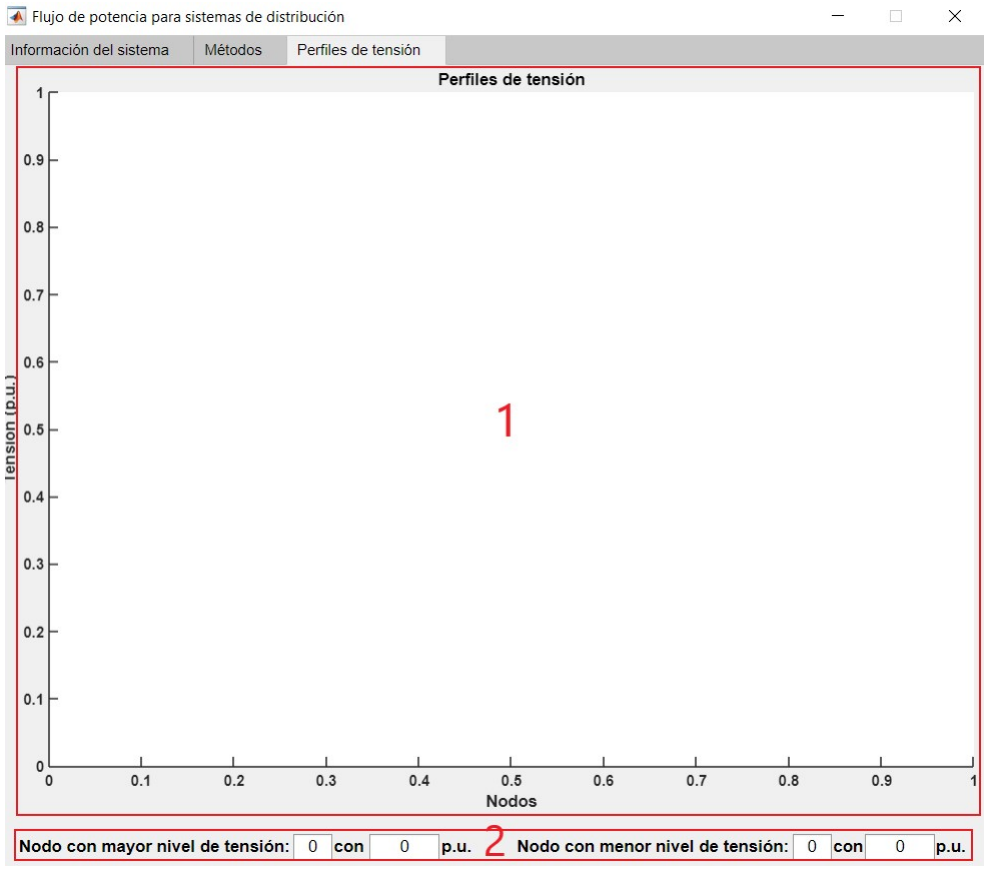
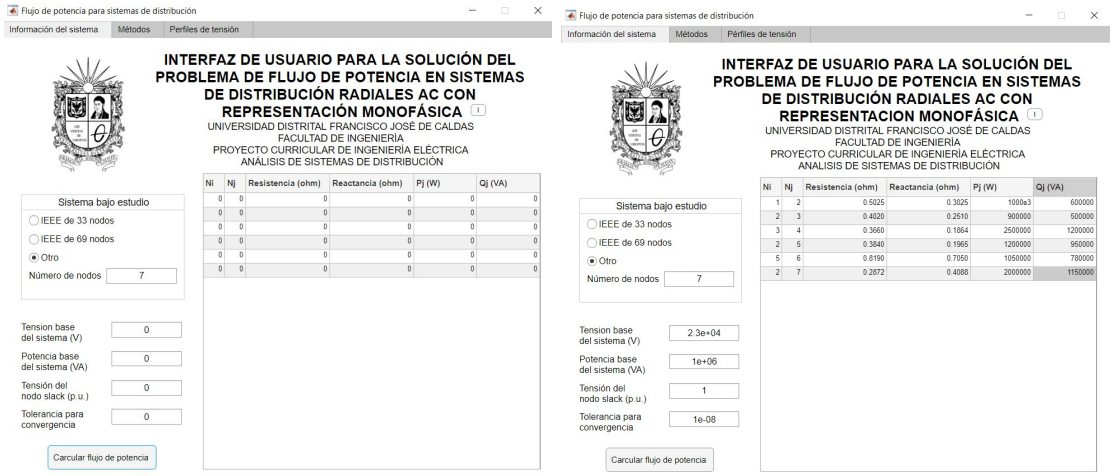


Figura B.9: Ilustración de la tercera pestaña de la aplicación

B.2.2. Uso de la aplicación

Para explicar las funcionalidades de la interfaz, se va a realizar el paso a paso del cálculo de flujo de potencia para un sistema de 7 nodos. Para la información sobre los parámetros de este sistema, refiérase a la sección 3. Los pasos a seguir son:

1. Abrir la aplicación
2. En la pestaña "Información del sistema" seleccione la opción "Otro", ingrese el número de nodos y presione la tecla entrer. Una tabla como la que se muestra en la figura B.10 aparecerá. Ingrese los valores de las líneas y potencia demandada del sistema, para el ejemplo estos valores se muestran en la figura B.10. Además, ingrese la información de tensión base, potencia base, tensión del nodo slack y tolerancia como se muestra en la figura.



(a) (b)

Figura B.10: (a) Tabla para ingresar la información (b) Información del sistema de 7 nodos ingresada a la aplicación

3. Presione el botón “Calcular flujo de potencia”. Después de unos segundos, el mensaje mostrado en el figura B.11 aparecerá, indicándole que el flujo fue calculado de manera exitosa.

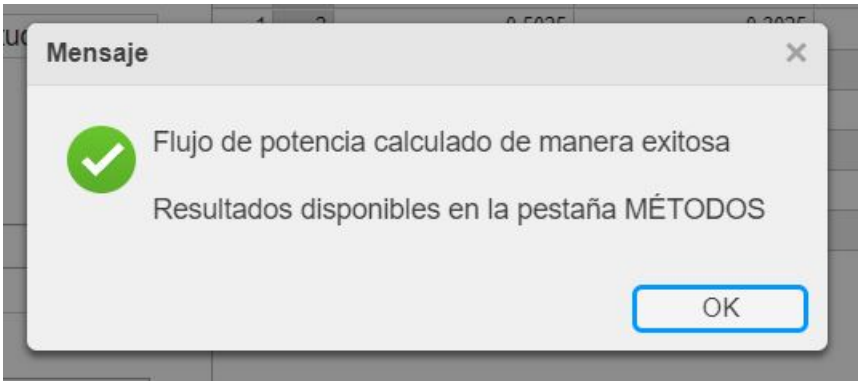


Figura B.11: Mensaje mostrado cuando se calcula el flujo de potencia del sistema seleccionado

4. Una vez se encuentre en la pestaña “Métodos” la información que observará es la mostrada en la figura B.12. Como se puede ver, las pérdidas del sistema son 0.1281 p.u. Si se quiere algún parámetro de los métodos, basta con seleccionarlo de la lista en la sección de “Parámetros del método”. En la figura B.13, se muestra a manera de ejemplo la matriz A del método SA y la matriz T de TM se muestra en la figura B.14, vale la pena recordar que esto se muestra en el Command Window.

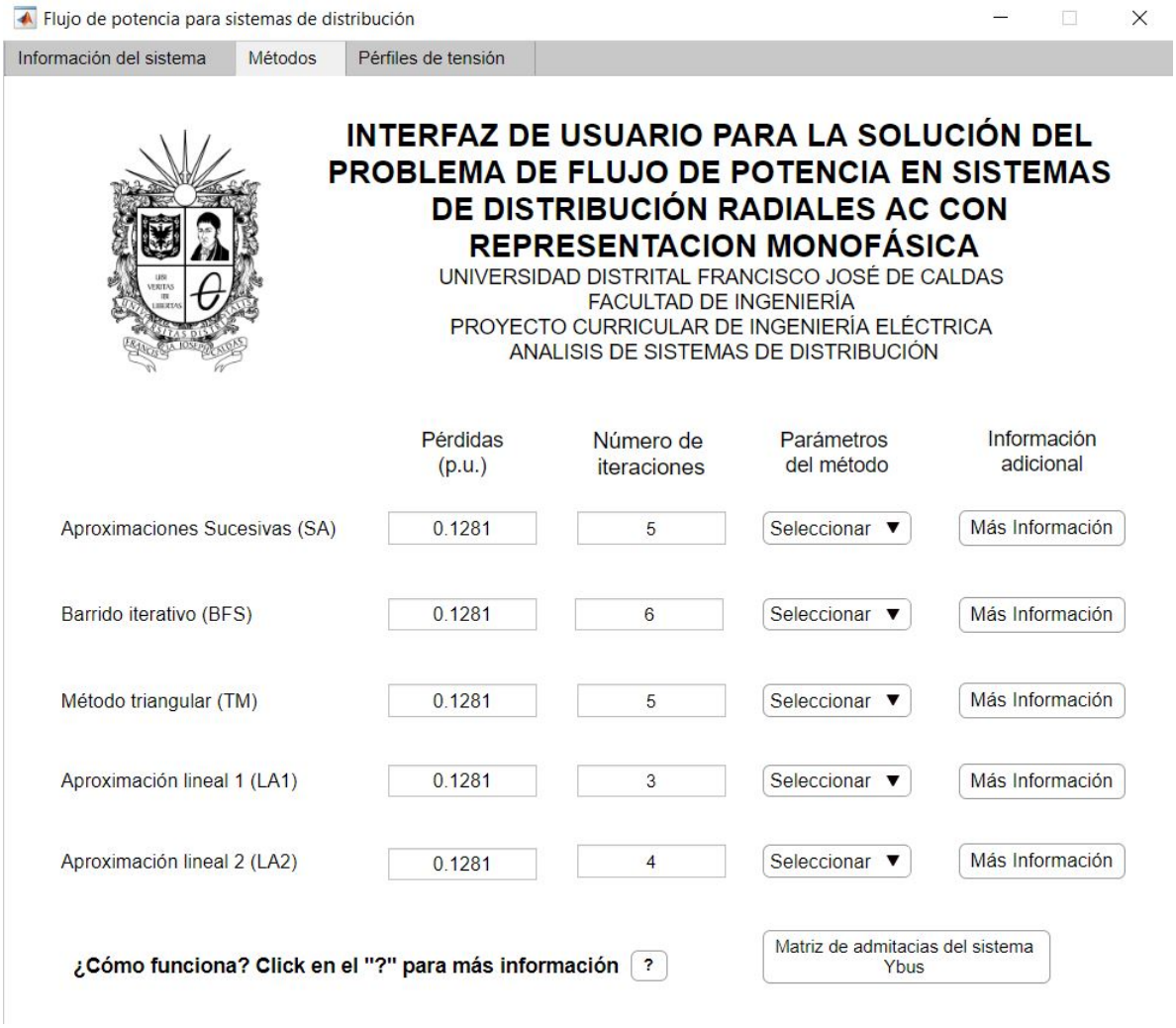


Figura B.12: Información del flujo de potencia del sistema de 7 nodos

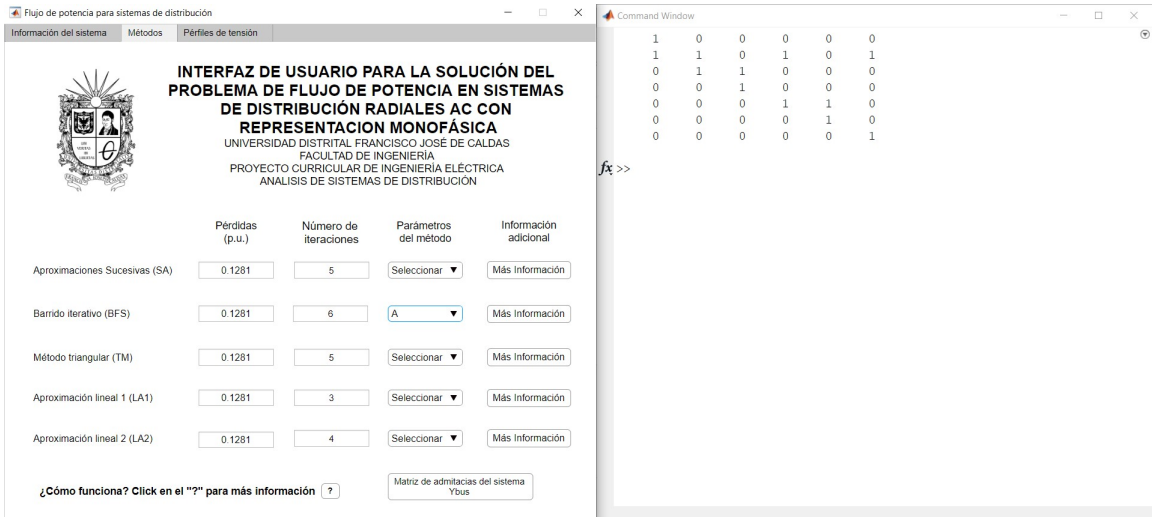


Figura B.13: Matriz A del sistema mostrada en el Command Window

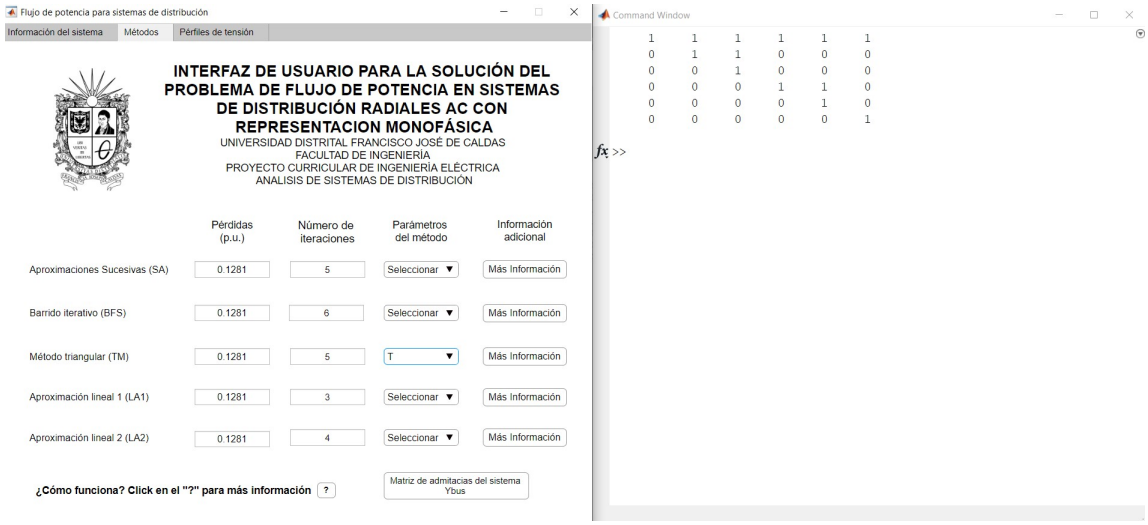


Figura B.14: Matriz T del sistema mostrada en el Command Window

5. Para obtener información sobre los métodos, presione el botón “Más información” y una ventana como la que se muestra en la figura B.15 aparecerá. Recuerde que dando clic en el botón “Articulo”, se abrirá un enlace con una publicación de referencia para el método.

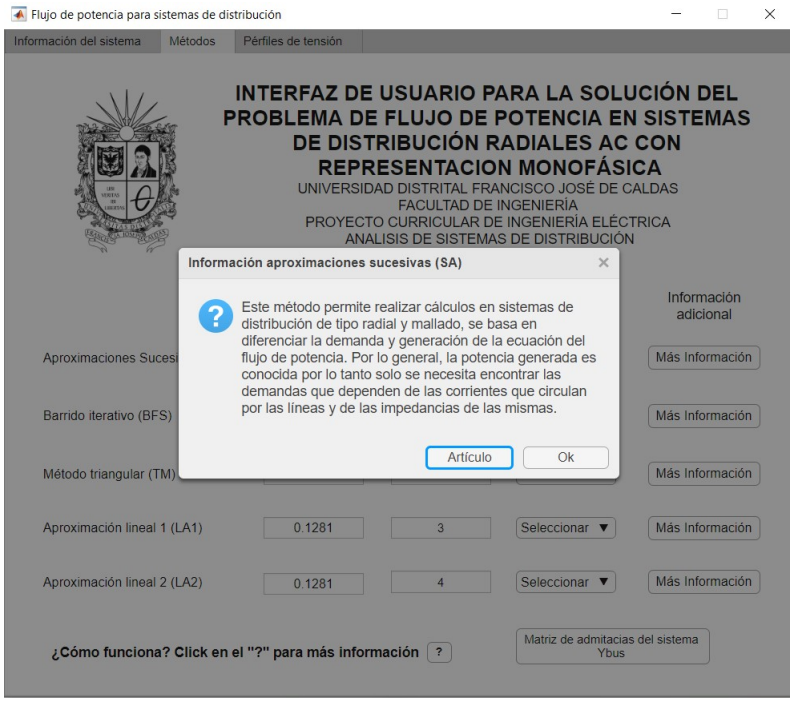


Figura B.15: Información adicional sobre el método SA

6. En la pestaña “Perfiles de Tensión” se observa la gráfica de los perfiles y además información sobre la regulación de tensión. Para el ejemplo esto se ilustra en la figura B.16.

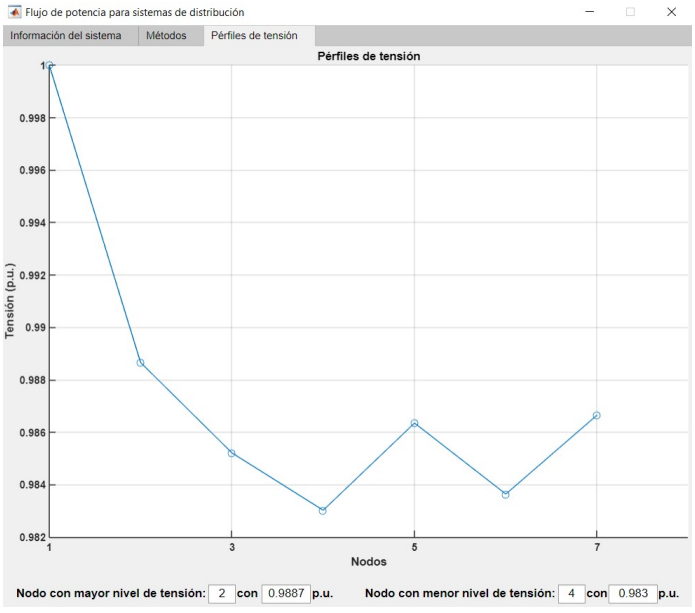


Figura B.16: Perfiles de tensión para el sistema de 7 nodos

Con esta pequeña guía se cubren las principales funcionalidades de la aplicación. Si en algún momento usted realiza una acción no permitida, un mensaje de advertencia saldrá, por favor presione el botón de “Ok” para continuar.