

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CARGA EN SISTEMAS DE POTENCIA BALANCEADOS PARA N NODOS REALIZADO EN MATLAB

PRESENTADO POR:

EDWIN FLOREZ BAUTISTA
JUAN CAMILO CORTES BORRAY

DIRECTOR DE PROYECTO:

ING. DIEGO ARMANDO GIRAL RAMIREZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN ELECTRICIDAD

BOGOTÁ-COLOMBIA
2019

Índice

1. INTRODUCCIÓN **3**

1.1. Estado del arte . . . 3

2. MARCO TÉORICO **4**

2.1. Flujo de carga o potencia . . . 4

2.2. Potencia neta . . . 4

2.3. Típos de nodos . . . 5

2.3.1. *Barra PQ o barra de carga* . . . 5

2.3.2. *Barra PV o barra de tensión controlada* . . . 5

2.3.3. *Barra de compensación, Slack o Swing* . . . 5

2.4. Matriz de admitancia o Ybus . . . 6

2.5. Métodos númericos para la solución de problemas no lineales . . . 6

2.6. Método de Gauss-Seidel . . . 7

2.7. Método de Newton Raphson . . . 7

2.8. Método de Newton Raphson Desacoplado . . . 10

2.9. Método de Newton Raphson Desacoplado Rápido . . . 10

2.10. Flujo de carga en DC . . . 11

3. METODOLOGÍA **12**

3.1. Etapa 1: Busqueda de la información . . . 12

3.2. Etapa 2: Programación . . . 12

3.3. Etapa 3: Diseño y construcción de Fluxtool . . . 13

3.4. Etapa 4: Pruebas y ajustes . . . 13

3.5. Etapa 5: Manual de usuario . . . 13

4. RESULTADOS **13**

4.1. Algoritmo final . . . 13

4.2. Interfaz del software . . . 14

4.2.1. *Interfaz de inicio* . . . 15

4.2.2. *Interfaz de ingreso de la matriz de admitancias* . . . 15

4.2.3. *Interfaz de información principal* . . . 16

4.2.4. *Interfaz de información de líneas y nodos* . . . 16

4.2.5. *Interfaz de resultados* . . . 17

4.2.6. *Interfaz de calculadora Fluxtool* . . . 17

4.3. Manual de usuario . . . 17

4.4. Pruebas y ajustes . . . 18

5. CASOS DE PRUEBA **18**

5.1. Caso 1 . . . 18

5.1.1. *Recopilación de datos para el caso 1* . . . 19

5.1.2. *Solución teórica del caso 1 por el método de Gauss-Seidel* . . . 19

5.1.3. *Iteración 1 método Gauss-Seidel* . . . 20

5.1.4. *Iteración 2 método Gauss-Seidel* . . . 22

5.1.5. *Iteración 3 método Gauss-Seidel* . . . 24

5.1.6. *Solución por el método de Gauss-Seidel utilizando Fluxtool* . . . 30

5.1.7. *Solución teórica del caso 1 por el método de Newton Raphson* . . . 33

5.1.8. *Iteración 1 método Newton Raphson* . . . 34

5.1.9. *Iteración 2 método Newton Raphson* . . . 38

5.1.10. *Iteración 3 método Newton Raphson* . . . 40

5.1.11. *Solución por el método de Newton Raphson con una variante en su algoritmo* . . . 46

5.1.12. *Iteración 1 método Newton Raphson con variante en su algoritmo* . . . 47

5.1.13. *Solución por el método de Newton Raphson utilizando Fluxtool* . . . 50

5.1.14. *Solución teórica por el método de Newton Raphson Desacoplado* . . . 53

5.1.15. *Iteración 1 método Newton Raphson Desacoplado* . . . 53

5.1.16. *Iteración 2 método Newton Raphson Desacoplado* . . . 57

5.1.17. *Iteración 3 método Newton Raphson Desacoplado* . . . 58

5.1.18. *Solución por el método de Newton Raphson Desacoplado utilizando Fluxtool* . . . 64

5.1.19. *Solución teórica por el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido* . . . 67

5.1.20. *Iteración 1 método Newton Raphson Desacoplado Rápido* . . . 68

5.1.21. *Iteración 2 método Newton Raphson Desacoplado Rápido* . . . 70

5.1.22. *Iteración 3 método Newton Raphson Desacoplado Rápido* . . . 72

5.1.23. *Solución por el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido utilizando Fluxtool* . . . 78

5.2. Caso 2 . . . 81

5.2.1. *Recopilación de datos para el caso 2* . . . 82

5.2.2. *Simulación del caso 2 en ETAP* . . . 83

5.2.3. *Solución del caso 2 utilizando Fluxtool* . . . 84

5.3. Caso 3 . . . 93

5.3.1. *Recopilación de datos para el caso 3* . . . 94

5.3.2. *Simulación del caso 3 en ETAP* . . . 96

5.3.3. *Solución del caso 3 utilizando Fluxtool* . . . 97

5.4. Caso 4 . . . 111

5.4.1. *Recopilación de datos para el caso 4* . . . 112

5.4.2. *Solución teórica del flujo de carga en DC para el caso 4.* . . . 113

5.4.3. *Solución del flujo en DC utilizando Fluxtool* . . . 114

6. CONCLUSIONES **115**

7. BIBLIOGRAFÍA **116**

8. ANEXOS **116**

Resumen

Contexto

Este documento presenta los resultados alcanzados en el desarrollo del proyecto SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CARGA EN SISTEMAS DE POTENCIA BALANCEADOS PARA N NODOS REALIZADO EN MATLAB, donde se planteó la siguiente pregunta problema :¿Existe la posibilidad de implementar un software de carácter académico en Matlab usando los métodos numéricos de flujo de carga en sistemas de potencia balanceados para N nodos?

El proyecto se realizó como complemento a lo que sería un programa global, el cual abarcaría los 3 capítulos de la asignatura Análisis de Sistemas de Potencia. Para el capítulo 1, en el año 2017 se realizó el proyecto "Diseño de una Aplicación para el Modelamiento de Elementos de Sistemas de Potencia y Construcción de la Matriz de Admitancias Nodal para Flujo de Carga". En el año 2019 se desarrolló el proyecto del capítulo 3 llamado "Software en MATLAB para el Flujo Optimo Clásico en el Despacho Hidrotérmico".

Metodología

Para cumplir el objetivo principal del proyecto, se realizó en primera instancia la busqueda bibliográfica de los métodos tradicionales para calcular el flujo de carga. Cuando se obtuvo la información necesaria, se sintetizaron dichos métodos en algoritmos computacionales y fueron llevados al software MATLAB, donde por medio de la herramienta GUIDE, fue posible construir el software descrito en los objetivos planteados, por medio de interfaz gráficas, que permitían resolver problemas del flujo de carga en sistemas de potencia. Además, se logró la elaboración de un manual de usuario para cada interfaz, para comprender de mejor manera el funcionamiento del programa.

Resultados

El software elaborado es llamado FLUXTOOL, se define como una herramienta de carácter académico para el cálculo del flujo de carga en sistemas de potencia balanceados para N nodos, por medio de los métodos numéricos Gauss-Seidel, Newton Raphson y análisis bajo corriente directa. Su enfoque principal es ser una herramienta de ayuda y orientación para un mejor aprendizaje hacia sus usuarios, principalmente estudiantes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para determinar que el software era funcional en su totalidad, se tomaron 4 casos de prueba variando sus principales características, como el número de nodos, transformadores, líneas y capacitancias en dichas líneas. El valor de error que se logró obtener fue menor al 1 % para las tensiones y ángulos nodales, el flujo de carga y la pérdida de potencia en los elementos del sistema. Tambíen se aclaró que en algunos casos, cuando se realizó la comparación de resultados con el software ETAP, las respuestas que sobrepasaban el limite de error del 1 %, fueron por ajustes internos del error de convergencia de dicho software, especialmente para el método de Gauss-Seidel.

Abstract

Context

This document presents the results obtained in the development of the project SOFTWARE FOR THE CALCULATION OF THE LOAD FLOW IN BALANCED POWER SYSTEMS FOR N NODES REALIZED IN MATLAB, where the following question was posed: Is there the possibility of implementing an academic software in Matlab using the numerical methods of load flow in balanced power systems for N nodes?

The project was realized as a complement to what would be a global program, which would cover the 3 chapters of the subject Power Systems Analysis. For Chapter 1, in 2017 the project "“Diseño de una Aplicación para el

Modelamiento de Elementos de Sistemas de Potencia y Construcción de la Matriz de Admitancias Nodal para Flujo de Carga" was carried out. In 2019, the project of Chapter 3 called "Software en MATLAB para el Flujo Optimo Clásico en el Despacho Hidrotérmico" was carried out.

Methodology

To fulfill the main objective of the project, the bibliographic search of the traditional methods to calculate the load flow was carried out in the first instance. When the necessary information was obtained, these methods were synthesized in computational algorithms and were taken to the MATLAB software, where through the GUIDE tool, it was possible to build the software described in the proposed objectives, through graphical that allowed solving problems of the load flow in power systems. In addition, the development of a user manual for each interface was achieved, to better understand the operation of the program.

Results

The software developed is called FLUXTOOL, it is defined as a tool of academic character for the calculation of the load flow in balanced power systems for N nodes, by means of the numerical methods Gauss-Seidel, Newton Raphson and analysis under direct current. Its main focus is to be a help and guidance tool for better learning for its users, mainly students of the Francisco José de Caldas District University.

To determine that the software was functional in its entirety, 4 test cases were taken varying its main characteristics, such as the number of nodes, transformers, lines and capacitances in those lines. The error value that was obtained was less than 1 % for the voltages and nodal angles, the load flow and the power loss in the elements of the system. It was also clarified that in some cases, when the results were compared with the ETAP software, the answers that exceeded the error limit of 1 % were due to internal adjustments of the convergence error of said software, especially for the Gauss-Seidel method.

1. INTRODUCCIÓN

Desde que los sistemas eléctricos tomaron un camino de crecimiento y expandieron su interconexión a más lugares, se hizo necesario el uso de la planificación de su operación a través de cálculos más complejos por la naturaleza de los mismos. Ya que desarrollar problemas de flujo de carga de forma manual para sistemas de potencia donde involucraban mas de 100 puntos nodales, se convertía en una tarea extenuante para los ingenieros, siendo esta una solución poco eficiente, y más aún cuando se necesitaban obtener resultados en períodos de tiempo cortos. Partiendo de esta premisa, la tendencia que se tomó al paso de los años, fue la de implementar herramientas computacionales que contenian los algoritmos tradicionales que se usaban para dar solución al flujo de potencia, los cuales eran el método iterativo de Gauss-Seidel y el método iterativo de Newton Raphson junto con sus derivados como el método Desacoplado y Desacoplado Rápido. Todo esto se realizó para suplir la demanda de dicho crecimiento y las cuales hacian más eficaz el analísis y respuesta, no solamente ante la entrada de nuevos proyectos, sino que también ante posibles fallas o contingencias en un sitema de potencia.

1.1. Estado del arte

De acuerdo a la búsqueda de proyectos, artículos, trabajos de grado e investigaciones relacionados con la solución el flujo de carga, se encuentra una tendencia al desarrollo de programas y algoritmos computacionales en diferentes plataformas y lenguajes de programación para dar resultados más eficientes a dicho problema. La mayoría de esta documentación está enfatizada en usar el software MATLAB; algunas fuentes consultadas son presentadas a continuación en orden cronológico y clasificados por proyectos a nivel mundial, Latinoamérica y en Colombia.

En Malasya, Mohd Shahimi, Bin Mohamad Isa en su tesis “POWER FLOW ANALYSIS SOFTWARE USING MATLAB”[8] en la cual plantean principalmente la importancia del flujo de carga en el desarrollo técnico y económico de un sistema de potencia. En este proyecto crean un software usando la herramienta GUIDE de Matlab para el análisis de flujo de carga, ayudando a que el análisis sea más fácil de realizar a medida que este aumenta su tamaño y sus métodos de solución son los comúnmente conocidos Newton Raphson, Desacoplado rápido y Gauss-Seidel.

En Estados Unidos, Yunxu Liang en su tesis de maestría “IMPROVED GAUSS-SEIDEL ITERATIVE METHOD ON POWER NETWORKS”[9] del 2004, propone un método eficiente para resolver problemas de flujo de carga de potencia en las redes del sistema de potencia. Los objetos de la investigación son las redes de potencia, enfatizando en la matriz Ybus. Analizan la relación entre el número de bloques y el rendimiento del método de Gauss-Seidel y proponer un método mejorado que tenga un mejor rendimiento. Como segunda instancia crean un algoritmo paralelo que facilita la comunicación entre procesadores. Ahora bien, estos 3 métodos son implementados al tiempo para al final poner los resultados enfatizados en el modelo de Gauss-Seidel mejorado.

En Turquía U. Eminglu, T. Gozel y M.H. Hhocaoglu en su artículo “DSP AFP: DISTRIBUTION SYSTEMS POWER FLOW ANALYSIS PACKAGE USING MATLAB GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI)”[10] del 2007, realizan un paquete de software como herramienta en cursos de sistemas de potencia por medio de la herramienta GUIDE de Matlab, el cual tiene como característica principal hacer el flujo de carga tanto en niveles de transmisión como en niveles de distribución por medio de algoritmos de barrido y usando los métodos convencionales de Newton Raphson y Gauss-Seidel. Además de eso, se puede investigar el efecto de los modelos de carga dependientes de tensión y los efectos de las DG en la solución de flujo de carga de los sistemas de distribución utilizando el programa.

En Ecuador, Quille Pinto, Freddy Simón en su tesis de pregrado ”OPTIMIZACIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO CON PROGRAMACIÓN NO LINEAL BAJO MATLAB”[11] publicado en febrero del 2015, diseñan un programa en MATLAB que es capaz de resolver un flujo de carga por el método de Newton Raphson, que es alimentado por el modelamiento del sistema al que se le desee realizar el cálculo de un flujo óptimo de potencia, esto con el fin de determinar puntos óptimos del sistema en eléctrico ecuatoriano.

En México, Pérez Jorge, Ortega Oscar, Corchado Néstor, Ortiz Raúl, Quezada Abel, Madrigal Lidia, Sandoval Osiel en su artículo titulado ”INTERFAZ GRÁFICA PARA EL CÁLCULO DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES ELÉCTRICAS”[12] publicado en agosto del 2015, diseñan un conjunto de interfaz que calculan el flujo de potencia de un sistema de potencia por el método de Newton Raphson desglosando variables o cálculos involucrados en el método de Newton Raphson Clásico.

En Colombia Maecha Jhon, Morales Jairo en su tesis "DESARROLLO DE UN SOFTWARE QUE REALICE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE CARGA EN N NODOS PARA SISTEMAS RADIALES" desarrollada para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el 2009, presentan un método de resolución del flujo de potencia para la planificación de redes de distribución eléctrica radial. Esto lo hacen a través de un programa informático desarrollado con la herramienta Visual Basic. El algoritmo modela el esquema monofásico del sistema y el método iterativo en el que se basan para solucionar el flujo de carga es la formulación básica de reducción de Gauss.

En Colombia Bedoya Jhon, Isaza Wilson en su tesis "ESTABILIDAD DE TENSIÓN POR EL MÉTODO DEL ANÁLISIS MODAL EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE PEREIRA"[13] publicado en el 2011, realizan un análisis de un sistema eléctrico regional, puntualmente en la ciudad de Pereira, para el cual modelan los elementos del sistema eléctrico y luego emplean el software de Matlab para determinar si este es estable en eventuales circunstancias a las que se puede ver sometido el sistema.

2. MARCO TÉORICO

2.1. Flujo de carga o potencia

Cuando se requiere planificar y ejecutar proyectos eléctricos de sistemas de potencia de gran magnitud, se da inicio tomando información de alta importancia comparando el diseño y operación de sistemas ya existentes con los que están en proceso de planeación y los efectos que se puedan presentar. Partiendo del hecho que se conocen los modelos en admitancia o susceptancia de los elementos del sistema de potencia, así como los valores de carga, y por lo menos más de una variable de tensión y ángulo nodal, se procede a desarrollar el problema de flujo de potencia [1].

El estudio que se realiza en sistemas de potencia ya existentes por medio del flujo de carga, se le conoce como estudio base, que consiste en conocer los cambios que se presenten en la red, y las anomalías en las tensiones bajo condiciones de contingencia con el fin de encontrar lo siguiente [2]:

- Sobretensiones y subtensiones.
- Sobrecargas en los conductores.
- Incógnitas de magnitud de la tensión y ángulo en todas las barras del sistema de potencia.
- Potencia activa y reactiva en los nodos de generación.
- Dirección del flujo de potencia a través de cada elemento del sistema para cada barra.
- Cuantificar las pérdidas de potencia activa y reactiva del sistema de potencia, en función de los elementos conectados.

Estas inconsistencias se identifican al realizar el estudio de flujo de carga al sistema en estudio, para luego, proceder a dar solución y así reestablecer la normalidad en la operación del flujo de carga.

2.2. Potencia neta

Para cualquier nodo de un sistema de potencia, se tiene que se le puede inyectar una potencia denominada potencia generada S_{gi} y también se puede extraer potencia de dicho nodo cuya potencia se declara como potencia demandada S_{Di}, se llama demandada pues es la potencia que requieren las cargas que están asociadas a este nodo por medio de conductores que a su vez también consumen parte de esta potencia [3].

Esta interacción de potencias se le denomina Potencia Neta inyectada o potencia neta S_{Ni} , y su modelo matemático se expresa en la ecuación (1).

$$S_{Ni} = S_{Gi} - S_{Di} \tag{1}$$

Esta potencia fasorial puede ser expresada de modo rectangular, obteniendo la ecuación (2).

$$S_{Ni} = P_{Ni} - jQ_{Ni} \tag{2}$$

Dando origen a la potencia activa neta y la potencia reactiva neta que están dadas por las ecuaciones (3) y (4).

$$P_{Ni} = P_{Gi} - P_{Di} \tag{3}$$

$$Q_{Ni} = Q_{Gi} - Q_{Di} \tag{4}$$

Donde P_{gi} y Q_{gi}, son las potencias activa y reactiva generadas. Los términos P_{Di} y Q_{Di} corresponden a las potencias activa y reactiva demandadas en el nodo sub i.

Sin embargo, cada nodo puede tener comportamientos diferentes según su interacción de potencias en el sistema al que pertenece, por esto se clasifican en los siguientes tipos de nodos [2]:

2.3. Típos de nodos

2.3.1. *Barra PQ o barra de carga*

Es llamada barra PQ ya que se conocen los valores de potencias activa y reactiva inyectadas en la barra, por lo tanto, la magnitud de la tensión y su ángulo serán variables desconocidas. La barra se encuentra conectada a una carga y la potencia generada será cero, quedando con un valor negativo [2].

2.3.2. *Barra PV o barra de tensión controlada*

El propósito de estas barras es mantener el perfil de tensiones del sistema, en estas se sabe la magnitud de la tensión, esto se obtiene variando los reactivos generados o consumidos en la barra. Teniendo en cuenta que la barra de referencia será la única donde se puede fijar el valor del ángulo δ_{ref}, entonces será imposible saber el valor del ángulo en las barras de tensión controlada y será necesario especificar la potencia generada P_g [4].

2.3.3. *Barra de compensación, Slack o Swing*

En esta barra se conoce la magnitud de la tensión y su ángulo, el cual servirá de referencia para los otros nodos del sistema. Por esta razón, no será necesario incluir la barra de compensación en la solución del problema de flujo de potencia ya que se toma la potencia activa y reactiva que sale del generador que puede ser ajustado, con el fin de tener un escenario de perdidas controladas hasta tener el solucionado el flujo de potencia final [1].

El resumen de variables conocidas y desconocidas en los 3 tipos de barras se encuentra en la Tabla 1.

Típo de barra	Variables	
	Conocidas	Desconocidas
Barra PQ o de carga	$P_{d,}Q_d, P_g, Q_g$	$\|V\|, \delta$
Barra PV o de tensión controlada	$P_{d,}Q_d, P_g, \|V\|$	Q_g, δ
Barra de compensación, slack o swing	$\|V\|, \delta$	P_n, Q_n

Tabla 1: Típos de nodos y variables ímplicitas. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Matriz de admitancia o Ybus

Este arreglo matricial de dimensiones NxN,donde, N es el número de nodos del sistema; está constituido por las conexiones eléctricas entre nodos y es de suma importancia ya que los métodos numéricos tradicionalmente empleados para el análisis de los sistemas de potencia involucran a está matriz también llamada como $Ybus$ o $Ybarra$.

La diagonal de esta matriz se compone por la sumatoria de admitancias que tiene asociado el nodo i y para las demás componentes que están fuera de la diagonal, le corresponde la impedancia de la línea que interconecta el nodo i hasta el nodo j. Sí no hay conexión eléctrica se registra un cero vectorial en la posición correspondiente [3] .

La matriz YBUS tiene la particularidad de que es una matriz simétrica y su modelo general se presenta en la ecuación (5).

$$Ybus = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ij} \end{bmatrix} \tag{5}$$

2.5. Métodos númericos para la solución de problemas no lineales

El comportamiento no lineal en sistemas de potencia y en otros casos físicos, pueden ser definidos por medio de una familia de funciones representadas como:

$$F_i(x_1, x_2 \dots x_n)$$

$$F_l(x_1, x_2 \dots x_n)$$

$$F_n(x_1, x_2 \dots x_n)$$

El anterior sistema es la representación de una serie de funciones de orden n, donde X_n será el vector de variables definidas en cualquier momento de tiempo. En la mayoría de casos no es posible encontrar una respuesta directa para este vector, por lo cual es necesario tomar coordenadas de partida para iniciar los cálculos, esto lo convierte en un proceso iterativo cuyos resultados pueden contener múltiples soluciones, tomando como respuesta final el valor más cercano al error previamente establecido. Si los valores de coordenadas iniciales están más cercanas a una posible respuesta, se tendrá una mayor convergencia, lo que quiere decir que se acelera el proceso para dar solución al problema [3].

A continuación, se presentan los métodos numéricos que comúnmente se usan para la solución de sistemas eléctricos de potencia:

- Método iterativo de Gauss-Seidel.
- Método de Newton Raphson Acoplado.
- Método de Newton Raphson Desacoplado.
- Método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

2.6. Método de Gauss-Seidel

Para el método de Gauss-Seidel, a todos los valores desconocidos de tensión se les asigna normalmente el valor de $1[p.u.]$ y para sus respectivos ángulos δ_k el valor de $0°$ [2].

Para la barra PQ donde se pueden programar las potencias activas y reactivas, se usará la ecuación (6) para calcular el valor de tensión:

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^{*(i-1)}} - \sum_{j=1}^{k-1} Y_{kj} V_j^{(i)} \sum_{j=k+1}^{n} Y_{kj} V_j^{(i-1)} \right] \tag{6}$$

El superíndice $(i+1)$ simboliza la actual iteración que se está haciendo, y la que podría venir si es necesario. En el lado derecho se tiene $(i-1)$ el cual será el índice de la iteración anterior, por lo tanto los valores de tensión corresponde al resultado más reciente en la barra.

P_k y Q_k, representan la potencia activa y reactiva neta en la barra; ya sea por generación o demanda, lo cual se deduce de las ecuaciones (7) y (8):

$$P_k = P_{generada} - P_{demandada} \tag{7}$$

$$Q_k = Q_{generada} - Q_{demandada} \tag{8}$$

Para una barra PV se puede tener el valor de la potencia activa inyectada como también la magnitud de la tensión, pero como se vio anteriormente en la definición de este tipo de barras, no se puede tener el valor de la potencia reactiva inyectada, por lo cual es necesario determinarla a partir de la siguiente ecuación (9) [2]:

$$Q_k^{(i+1)} = -imag \left[V_k^{*(i-1)} \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{kj} V_j^{(i)} \sum_{j=k+1}^{n} Y_{kj} V_j^{(i-1)} \right) \right] \tag{9}$$

Aquí se tomará la parte imaginara de la respuesta, representada por [-imag] y posterior a esto se toma el valor de la potencia reactiva obtenida y se reemplaza en la ecuación (10). A partir de esta, se obtiene el verdadero valor de tensión corregido en el nodo.

$$V_{icorregido}^{(i+1)} = \sqrt{(\mid V_i \mid)^2 - \left(imag\left(V_i^{i+1}\right)\right)^2} \tag{10}$$

Este será el sucesor a la siguiente iteración en la ecuación general de tensión. Este proceso se repetirá hasta que se cumpla el error planteado por el ejercicio.

2.7. Método de Newton Raphson

Es un método numérico de orden cuadrático, que busca dar solución al problema de encontrar un valor de convergencia en una función no lineal. Para esto, se debe calcular la derivada de la función no lineal, para obtener una recta tangente a dicha función, este proceso se realiza de manera iterativa actualizando el valor aproximado al que se desea converger [5]. Para su uso en los sistemas de potencia, cuyos problemas planteados consisten en resolver el flujo de potencia emplea ecuaciones de potencia activa y reactiva para cada barra o nodo. El voltaje en magnitud y ángulo son las dos variables de tipo eléctrico que conforman dichas ecuaciones de potencias.

A continuación, se describe el método de Newton Raphson, y las variantes que se derivan de éste para dar solución al flujo de carga en los sistemas de potencia [4].

Para esté método, se sigue el modelo matemático descrito en la ecuación (11).

$$C = J^{-1} * D \tag{11}$$

Donde,

- J : es la matriz Jacobiana de dimensiones $2x2$, cuyos componentes son sub-matrices, como se puede ver en la ecuación (12).
- D : es el vector de deltas de potencia activa y reactiva, donde se hace la diferencia entre la potencia calculada dada por las ecuaciones (21) y (22) y la potencia establecida en cada nodo.
- C : es el vector donde se definen los resultados de tensión y ángulo incógnitos para cáda nodo.

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \tag{12}$$

Estas cuatro matrices, se construyen de la siguiente manera [6]:

- Submatriz H:

Los elementos de la diagonal H_{kk}, son calculadas mediante la ecuación (13):

$$H_{kk} = -B_{kk} * V_k^2 - Q_k \tag{13}$$

Para los elementos fuera de la diagonal H_{km},se emplea el modelo matemático de la ecuación (14).

$$H_{km} = -B_{km} * V_k * V_m * cos(\theta_{km}) + G_{km} * V_k * V_m Sen(\theta_{km}) \tag{14}$$

- Submatriz N

Los elementos de la diagonal N_{kk}, son calculadas mediante la ecuación (15):

$$N_{kk} = G_{kk} * V_k^2 + P_k \tag{15}$$

Para los elementos fuera de la diagonal N_{km},se emplea el modelo matemático de la ecuación (16).

$$N_{km} = G_{km} * V_k * V_m * cos(\theta_{km}) + B_{km} * V_k * V_m * Sen(\theta_{km}) \tag{16}$$

- Submatriz J

Los elementos de la diagonal J_{kk}, son calculadas mediante la ecuación (17):

$$J_{kk} = -G_{kk} * V_k^2 + P_k \tag{17}$$

Para los elementos fuera de la diagonal J_{km},se emplea el modelo matemático de la ecuación (18).

$$J_{km} = -G_{km} * V_k * V_m * cos(\theta_{km}) - B_{km} * V_k * V_m * Sen(\theta_{km}) \tag{18}$$

- Submatriz L

Los elementos de la diagonal L_{kk}, son calculadas mediante la ecuación (19):

$$L_{kk} = -B_{kk} * V_k^2 * -Q_k \tag{19}$$

Para los elementos fuera de la diagonal L_{km},se emplea el modelo matemático de la ecuación (20).

$$L_{km} = -B_{km} * V_k * V_m cos(\theta_{km}) + G_{km} * V_k * V_m * Sen(\theta_{km}) \tag{20}$$

Por otra parte, se puede obtener la matriz Jacobiano mediante la herramienta matemática de la derivación parcial, realizando la derivación de P y Q (ecuaciones 21 y 22) respecto a la variable correspondiente según el cuadrante en el que se esté trabajando, la matriz expuesta en la ecuación (23), permite ver con claridad el modelo matemático a seguir por dicho método [2].

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i| * |V_k| * |Y_{ik}| cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \tag{21}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i| * |V_k| * |Y_{ik}| sen(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \tag{22}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \vdots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \tag{23}$$

Estas se derivan respecto con magnitud como también con respecto a ángulo de las tensiones nodales cuándo estos datos son desconocidos.

C : es el vector respuesta y es donde se realiza la suma entre el valor anterior con el actual para cada una de las incógnitas como lo describe la ecuación (24).

$$C = \begin{bmatrix} \triangle \delta_1^k \\ \vdots \\ \triangle \delta_n^k \\ \triangle |V|_1^k \\ \vdots \\ \triangle |V|_n^k \end{bmatrix} \tag{24}$$

D : es el vector de corrección, el cual está compuesto por la resta de la potencia específica y la potencia calculada en la iteración correspondiente. Su modelo matemático se expresa en la ecuación (25).

$$D = \begin{bmatrix} P_{esp1} - (P_{cal1}^{(1)}, \ldots, P_{cal1}^{(k+1)}) \\ \vdots \\ P_{espn} - (P_{caln}^{(1)}, \ldots, P_{caln}^{(k+1)}) \\ Q_{esp1} - (Q_{cal1}^{(1)}, \ldots, Q_{cal1}^{(k+1)}) \\ \vdots \\ Q_{espn} - (Q_{caln}^{(1)}, \ldots, Q_{caln}^{(k+1)}) \end{bmatrix} \tag{25}$$

2.8. Método de Newton Raphson Desacoplado

Este método sigue los mismos principios y el algoritmo planteado para el método de Newton Raphson, solo que busca reducir cálculos y recursos de memoria cuando se realizan estos con ayuda de un software. Por lo tanto, se toman la siguiente premisa:

Entre las susceptancias B_{ik} y conductancias G_{ik}de las líneas, se sabe que la primera de estas tiende a ser mucho más grande que la otra, entonces se expresa la ecuación (26):

$$(B_{ik}cos(\delta_i - \delta_k) >> G_{ik}sen(\delta_i - \delta_k)) \tag{26}$$

Se puede decir entonces, que las submatrices son componentes de cada una de las razones de cambio que se tienen en este análisis de potencia [7], entonces:

- H : las susceptancias B_{ik} están relacionadas con coseno y la conductancia G_{ik} están relacionadas con seno, por tanto se obtienen valores relativamente grandes.
- N : las susceptancias B_{ik} están relacionadas con seno y la conductancia G_{ik} están relacionadas con coseno, por tanto se obtienen valores relativamente pequeños.
- J : las susceptancias B_{ik} están relacionadas con seno y la conductancia G_{ik} están relacionadas con coseno, por tanto se obtienen valores relativamente pequeños.
- L : las susceptancias B_{ik} están relacionadas con coseno y la conductancia G_{ik} están relacionadas con seno, por tanto se obtienen valores relativamente grandes.

Ahora se puede asumir un valor de cero para las submatrices N y J que conforman el Jacobiano como se expresa en la ecuación (27).

$$J = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \tag{27}$$

Donde, H, es la submatriz compuesta por los las derivadas parciales de las funciones de potencia activa respecto a los ángulos delta. L, es la submatriz compuesta por las funciones de potencia reactiva derivadas respecto a las magnitudes de tensión que se establecieron como incógnitas.

2.9. Método de Newton Raphson Desacoplado Rápido

El método Desacoplado puede abreviarse aún más con el fin de hacer una estimación más rápida al flujo de potencia, aunque toma un mayor número de iteraciones encontrar la solución, resulta más fácil de plantear su desarrollo matemático. Es posible hacer esto ya que se toma provecho del comportamiento de los parámetros en los elementos del sistema planteado anteriormente para el método Desacoplado, además de esto se aplican más cambios tales como [2]:

- Cuando se inyecta potencia reactiva a cualquier barra en el sistema operando con normalidad, se verá que es mucho menor dicha potencia que la potencia en todas las barras en un estado de cortocircuito, lo que será la ecuación (28):

$$Q_i \ll |V_i|^2 B_{ii} \tag{28}$$

Por lo tanto, se podrá simplificar elementos de la matriz Jacobiana, tales como los elementos que se encuentran fuera de la diagonal H_{11} y L_{22}, esto está dado por la ecuación (29):

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |V_k| \frac{\partial Q_i}{\partial |v_k|} = -|V_i V_k| [B_{ik} cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} sen(\delta_i - \delta_k) \tag{29}$$

Aplicando los términos dados anteriormente, esta ecuación queda simplificada como se muestra en la ecuación (30):

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |V_k| \frac{\partial Q_i}{\partial |v_k|} = -|V_i V_k| B_{ik} \tag{30}$$

Ahora bien, se tendrán los elementos que componen la diagonal de H_{11} y L_{22} dada por la desigualdad mostrada en la ecuación (31), por lo tanto:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |V_k| \frac{\partial Q_i}{\partial |v_k|} = -|V_i|^2 B_{ii} \tag{31}$$

Cuando se realiza la multiplicación por la corrección del error para $|V_i|$ en la matriz resultante del Jacobiano, las magnitudes de tensión que acompañan las susceptancias serán todas igual a 1 en por unidad, dando como resultado las ecuaciones (32) y (33):

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & -B_{24} \\ -B_{32} & -B_{33} & -B_{34} \\ -B_{42} & -B_{43} & -B_{44} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle P_2}{|V_2|} \\ \frac{\triangle P_3}{|V_3|} \\ \frac{\triangle P_4}{|V_4|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \triangle \delta_1 \\ \triangle \delta_2 \\ \triangle \delta_3 \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} & -B_{24} \\ -B_{32} & -B_{33} & -B_{34} \\ -B_{42} & -B_{43} & -B_{44} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle Q_2}{|V_2|} \\ \frac{\triangle Q_3}{|V_3|} \\ \frac{\triangle Q_4}{|V_4|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \triangle |V_2| \\ \triangle |V_3| \\ \triangle |V_4| \end{bmatrix} \tag{33}$$

2.10. Flujo de carga en DC

Este método se usa para hallar estimaciones de flujo de carga en sistemas de potencia en A.C.. Aquí se realizan operaciones lineales, lo que lo hace un método no iterativo para hallar el flujo solo con la potencia activa sin tomar en cuenta el flujo de potencia reactiva en las líneas. Aunque se pueda tomar como desventaja que no sea tan preciso como los métodos iterativos en A.C., generalmente resulta adecuado para tener una estimación rápida de flujos de potencia en un sistema sin recurrir a altos recursos de procesamiento [6].

Para realizar un flujo de carga en DC, se toman las siguientes consideraciones:

- Las resistencias en las líneas (pérdidas de potencia activa) son mínimas, por lo tanto $R << X$.
- La diferencia entre los ángulos de tensión se asumen como mínimos, por lo tanto $sen(0) = 0$ y $cos(0) = 1$.
- Las magnitudes de las tensiones en las barras se asumen todas como 1 en por unidad.
- Se ignoran los ajustes del Tap en los transformadores.

Entonces, basado en lo anterior, se tendrán solamente 2 incógnitas, el ángulo de la tensión y la inyección de potencia activa en las barras del sistema. La potencia activa estará determinada por la ecuación (34) para este método:

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} B_{ik}(\theta_i - \theta_k) \tag{34}$$

Donde B es la susceptancia entre el nodo i y el nodo k.

Matricialmente, el flujo de potencia en las líneas se relaciona con el ángulo de cada barra, a partir de las ecuaciones (35) y (36):

$$\theta = [B]^{-1} * P \tag{35}$$

$$P_L = (bXA)\theta \tag{36}$$

Para estas dos ecuaciones será:

- P : vector $Nx1$ de potencia activa inyectada en los buses 1 hasta N.
- B : matriz de admitancias $Nx1$ con $R = 0$.
- θ : vector $Nx1$ de ángulos para los buses 1 hasta N.
- P_L : vector $Mx1$del flujo en las líneas (M es el número de líneas).
- b : matriz MxM (los elementos b_{kk} son iguales a la susceptancia de la línea k y los elementos externos a esta diagonal serán ceros).
- A : matriz MxN de conexión, en donde a_{ik} es igual a 1, si una línea existe entre el bus i y el bus k, en caso que no sea así, será cero. Para el inicio y final de los buses los elementos de la matriz serán 1 y -1.

3. METODOLOGÍA

De acuerdo con lo planteado en el documento de anteproyecto, se toma como base el método investigativo de tipo exploratorio, el cual, permite obtener nuevos elementos que conllevan a responder con mayor certeza a la pregunta problema "*¿Es posible implementar un software de carácter académico en Matlab usando los métodos numéricos de flujo de carga en sistemas de potencia balanceados para N nodos?*". Para lograr los objetivos planteados, se desarrolló un plan de trabajo dividio en las siguientes etapas:

3.1. Etapa 1: Busqueda de la información

Se realizó una búsqueda en diferentes medios y documentos bibliográficos, con el fin de definir los métodos numéricos utilizados para el flujo de carga, su teoría, modelos matemáticos y algoritmos de solución planteados. Como resultado de esto, se encontró que los métodos más usados son Newton Raphson y Gauss-Seidel. Además, que estos disponen de unas variaciones en sus algoritmos, principalmente con el fin de hacer el cálculo del flujo de carga más rápido, estos comúnmente conocidos como Newton Raphson Desacoplado y Newton Raphson Desacoplado Rápido. Otra alternativa como método de solución para el flujo de carga en sistemas de potencia, es el análisis en corriente directa, el cual se encuentra incluido en el software desarrollado en este proyecto.

Encontrar casos prácticos o ejemplos también fue tarea primordial, ya que era necesario hacer pruebas con el software para determinar la veracidad de sus resultados. Para esto, se seleccionaron 4 sistemas de potencia diferentes. Un sistema de 3 nodos sencillo sin contemplar otros elementos aparte de las líneas, un sistema de 5 nodos con transformadores y líneas, un sistema de 9 nodos, el cual contiene transformadores, líneas y capacitancias. Por último para el estudio del flujo en corriente directa, se encuentra un sistema de potencia de 3 nodos.

3.2. Etapa 2: Programación

Siguiendo la teoría de la bibliografía obtenida en la primera etapa, se pudo sintetizar uno a uno los métodos de solución del flujo de carga y llevar a un lenguaje de programación, el cual fue plazmado en el compilador MATLAB. Dando uso a las herramientas que dicho compilador ofrece, no solamente se pudo construir los párametros de entradas, condiciones, ciclos y salidas en los cálculos para cáda método, sino también, se logró programar un entorno visual en forma de interfaz gráfica como resultado final.

3.3. Etapa 3: Diseño y construcción de Fluxtool

Contemplando la cantidad de variables de entrada que maneja cada uno de los métodos númericos con los que se contruye el software, se concluye, que es indipensable elaborar más de una ventana de interacción usuario-programa para obtener mayor calidad en las caracteristicas del software. Algunas de estas son:

- Facilidad de uso.
- Capacidad de regreso a ventanas con datos ya guardados para verificación y modificación.
- Requerimiento de datos de manera clara con palabras claves de fácil identifiación de la variable en cuestión.
- Adaptación de tablas de recopilación de datos según parámetros propios de cada ejercicio.

Dado a que el alcance del proyecto es el capítulo 2 de 3 capítulos que constituyen la materia análisis de sistemas de potencia, se construye una primera ventana exclusiva para el tratamineto de la matriz de admitancias, la cual, es la información de acople entre las partes 1 y 2 de la asignatura y así poder ejecutar con normalidad el software.

3.4. Etapa 4: Pruebas y ajustes

Ya que se debía tener un referente de las respuestas de los 4 ejemplos planteados, para poder ser comparadas con los resultados del software desarrollado, por motivos prácticos, la solución de los sitemas de 5 y 9 nodos fueron obtenidas por medio de la simulación de dichos sistemas, utilizando un software especializado en flujo de carga llamado ETAP. En cambio los sistemas de 3 nodos, fueron resueltos de forma manual, ya que no requerian de un tiempo extenso para llegar a una solución.

El software del presente proyecto fue ajustado en sus algoritmos para que el error en sus resultados, comparado con las simulaciones y la solución teórica de los ejemplos elegidos, fuera menor al 1 %, para dar certeza que la estructura de sus algoritmos es totalmente funcional.

3.5. Etapa 5: Manual de usuario

Dado al tamaño del software, el manejo de varías ventanas de diálogo, ademanes como mensajes de alerta y error y todos los demás componentes del software que fueron añadidos a la idea inicial, se realiza un manual técnico de usuario para cada una de las interfaz y se habilita la opción de lectura en la misma interfaz. Aparte de los manuales de usuario, se incluye un muestrario de ejemplos donde se visualiza el correcto ingreso de estos, así el usuario podrá aclarar de manera muy sencilla cualquier duda que se le presente ante el uso del programa.

4. RESULTADOS

4.1. Algoritmo final

El siguiente diagrama de flujo representado en la Figura 1, muestra la estructura del algoritmo final implementado para la construcción del programa.

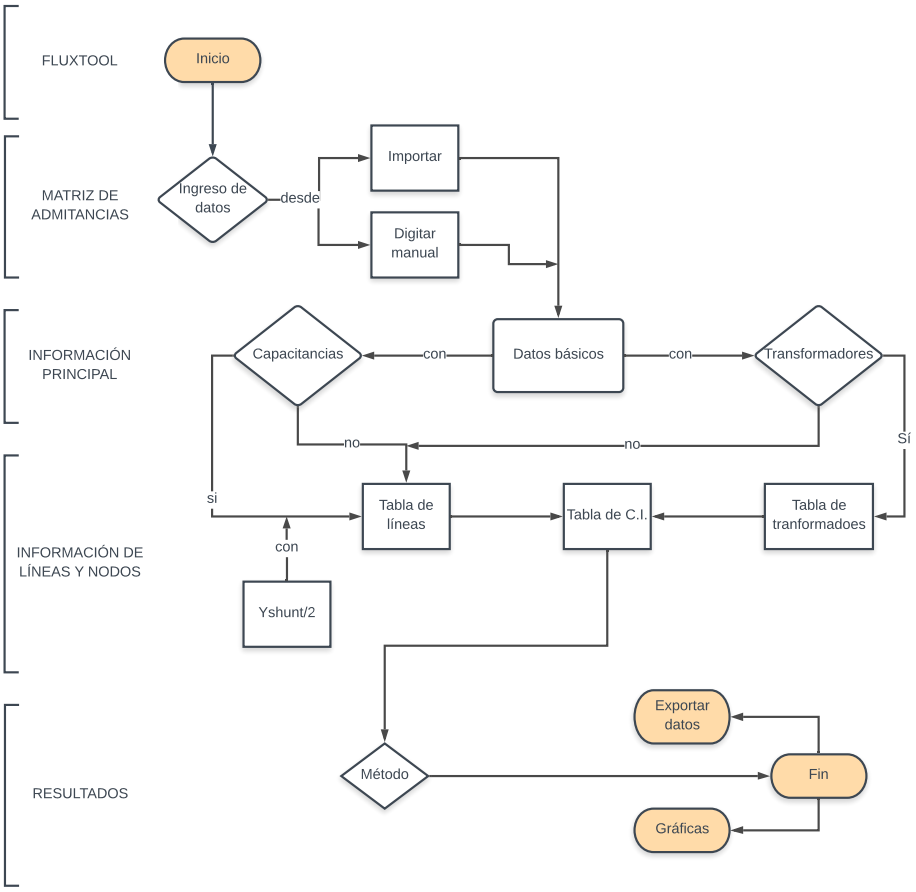


Figura 1: Diagrama de flujo del algoritmo para el programa Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

Los cuadros que se visualizan en la parte izquierda de la Figura 1 representan las interfaz que se tienen en el programa. Las ventanas de MATRIZ DE ADMITANCIAS, INFORMACIÓN PRINCIPAL e INFORMACIÓN DE LÍNEAS Y NODOS, contienen un código que se encarga de recopilar y almacenar todas las variables de entrada, las cuales son representadas en el flujo que se va dando en la parte derecha del diagrama. Por último, en la ventana de RESULTADOS se harán los debidos cálculos de los métodos iterativos para el flujo de carga y esta será la encargada de mostrar los resultados de todo el procedimiento que el algoritmo realiza.

4.2. Interfaz del software

La interfaz se realizó con la herramienta GUIDE de MATLAB. Esta se compone de 6 ventanas las cuales van intercalando su aparición a medida que el usuario va ingresando los parámetros y características que se pide en cada una de ellas. La interfaz cuenta con menús de ayuda, donde es posible acceder en cualquier momento a los manuales para el correcto manejo del software, también posee tres herramientas para visualizar los resultados finales, las cuales son por medio de una tabla de resultados, gráficas y exportación de datos a Excel.

Las interfaz del programa Fluxtool son mostradas a continuación en las Figuras 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

4.2.1. *Interfaz de inicio*



Figura 2: Interfaz de inicio del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. *Interfaz de ingreso de la matriz de admitancias*



Figura 3: Interfaz para el ingreso de la matriz de admitancias del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. *Interfaz de información principal*

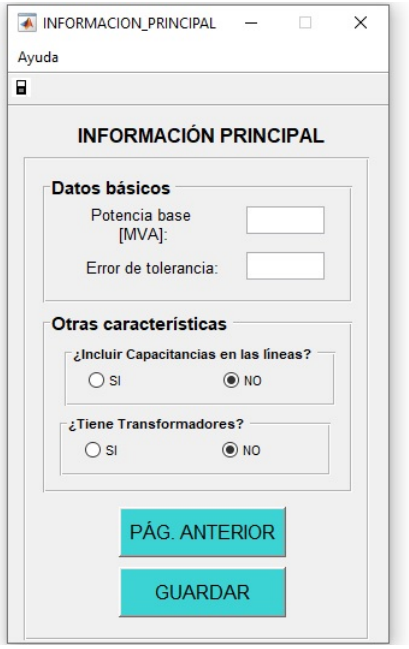


Figura 4: Interfaz de información principal del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. *Interfaz de información de líneas y nodos*

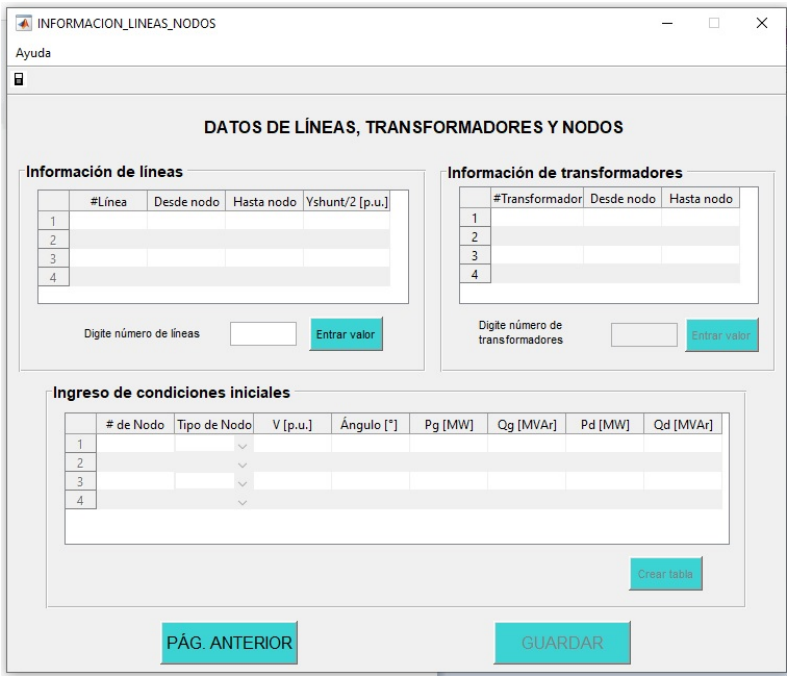


Figura 5: Interfaz de información de líneas y nodos del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. *Interfaz de resultados*

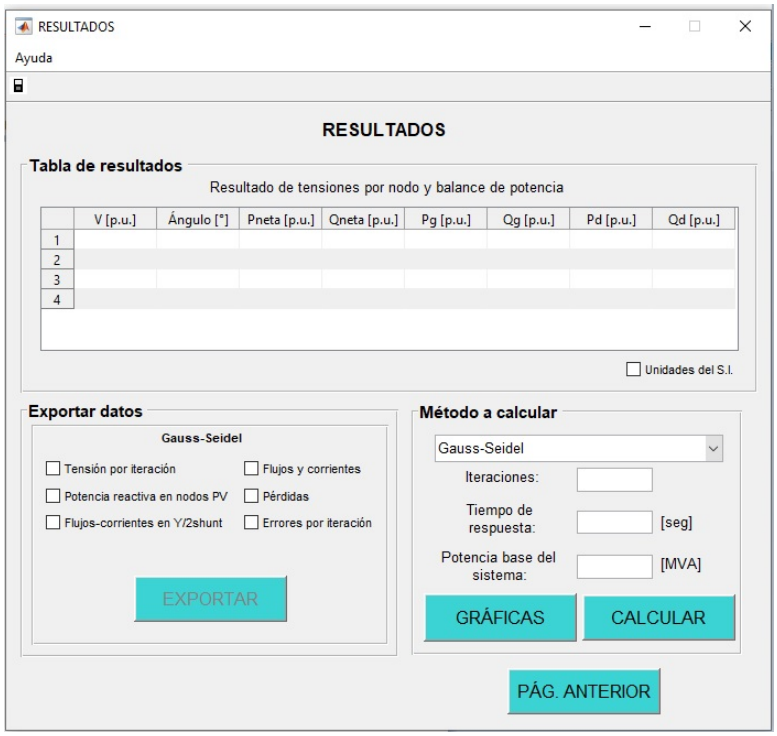


Figura 6: Interfaz de resultados del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.2.6. *Interfaz de calculadora Fluxtool*

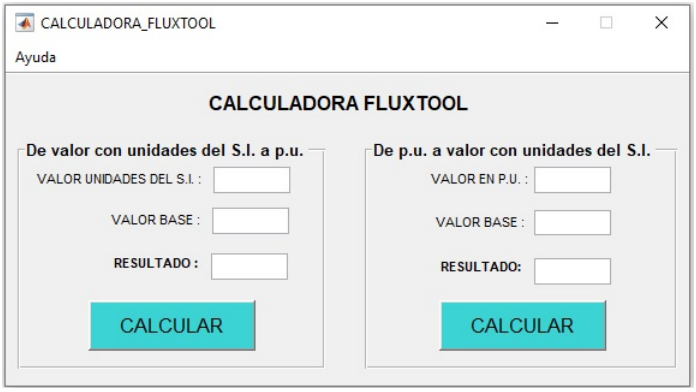


Figura 7: Interfaz de la calculadora del software Fluxtool. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Manual de usuario

Los manuales de usuario muestran el correcto manejo del software, y este está repartido en cada menú de ayuda de cada interfaz a excepción de la primera ventana donde se puede visualizar el manual completo en el menú de ayuda. Además de contar con los parámetros técnicos de cada ventana, muestra también el correcto uso mediante un ejémplo práctico.

4.4. Pruebas y ajustes

Para realizar las pruebas finales del software Fluxtool, se tomaron los 4 casos de estudio mencionados en la ETAPA 1. Los parámetros de salida que se eligieron para realizar las comparaciones principalmente fueron los valores de tensión y ángulo en los nodos, el flujo de carga y pérdidas de potencia en cada uno de los elementos del sistema. Con relación al valor de error, se estableció el 1 % como punto de veracidad al comparar los resultados del software Fluxtool y los resultados de los casos simulados y resueltos teóricamente. Los resultados obtenidos con los diferentes casos de estudio son presentados en la siguiente sección del documento, llamada Casos de Prueba.

5. CASOS DE PRUEBA

Los 4 sistemas de potencia que se eligieron para ser evaluados por el software Fluxtool, serán presentados a continuación. Aquí se hará una comparación entre respuesta del software y la respuesta que se obtiene mediante la solución teórica, complementando y respaldando estos calculos con simulaciónes realizadas en el programa ETAP.

5.1. Caso 1

La Figura 8 muestra el diagrama de un sistema de potencia de tres nodos con generación en los nodos 1 y 3. El voltaje en el nodo 1 es de $V = 1.025\angle 0°[pu]$. El voltaje del nodo 3 es de $|V_3| = 1.03[pu]$, con una potencia activa generada de $300[MW]$. Una carga de $400[MW]$ y $200[Mvar]$ para el nodo 2. Las impedancias de las lineas se dan en por unidad con una potencia base de $100MVA$ para todo el sistema.

Resolver el flujo de carga usando los métodos de Gauss-Seidel, Newton Raphson, Newton Raphson Desacoplado y Newton Raphson Desacoplado Rápido con un error de convergencia de 0.001.

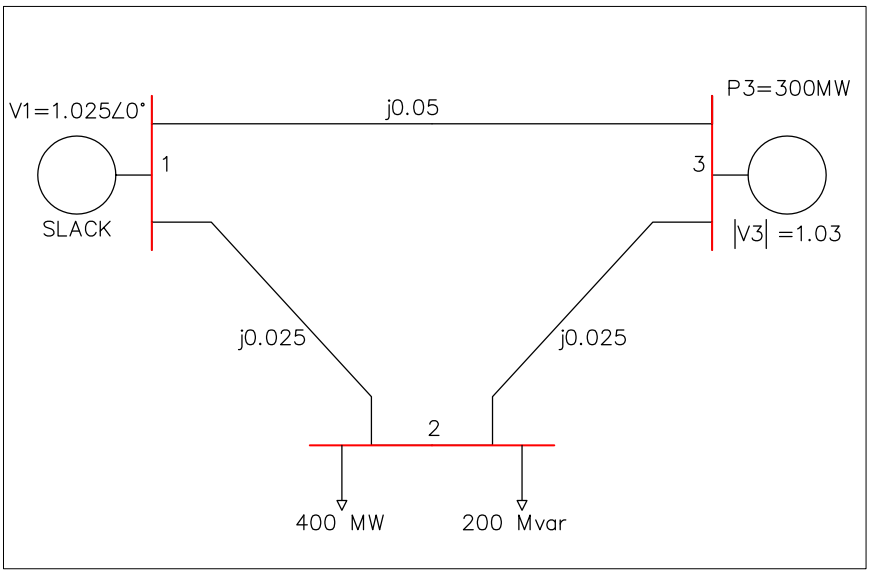


Figura 8: Diagrama para sistema de potencia de 3 nodos - Caso 1. [14]

5.1.1. *Recopilación de datos para el caso 1*

Se procede a calcular todas las potencias del sistema en por unidad, tomando como referencia una potencia base de $100[MVA]$.

$$S_{nodo2} = \frac{400 + 200j[MVA]}{100[MVA]} = 4 + 2j[pu]$$

$$S_{nodo3} = \frac{300 + 0j[MVA]}{100[MVA]} = 3[pu]$$

Teniendo las potencias del sistema en por unidad, se plantean en la Tabla 2 los datos de condiciones iniciales para cada nodo del sistema.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.025\angle 0^\circ$	-	-	-
2	PQ	$1.0\angle 0^\circ$	-	4	2
3	PV	$1.03\angle 0^\circ$	3	-	-

Tabla 2: Condiciones iniciales - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra los datos para cada línea del sistema.

Líneas	Impedancia de la línea [pu]	Longitud [km]
1-3	$j0.05$	1
1-2	$j0.025$	1
2-3	$j0.025$	1

Tabla 3: Datos básicos de las lineas - Caso 1. Fuente: Elaboración propia

A continuación se construye la matriz de admitancias o Ybus a partir de los datos de las líneas para el caso 1.

$$Ybus = \begin{bmatrix} -60j & 40j & 20j \\ 40j & -80j & 40j \\ 20j & 40j & -60j \end{bmatrix} \tag{37}$$

5.1.2. *Solución teórica del caso 1 por el método de Gauss-Seidel*

Luego de obtener la matriz de admitancias procedemos a dar solución al ejercicio por medio del método de Gauss-Seidel realizando los siguientes pasos:

- Se obtienen los valores de condiciones iniciales de tensión y ángulo para la primera iteración. Se asume $1[p.u]$ para valores de tensiónes y para ángulos un valor de 0° en los nodos PQ.
- Para el cálculo de las tensiones en los nodos PQ se utiliza la ecuación (38).
- Para el cálculo de las tensiones en los nodos PV se debe obtener primero la potencia reactiva Q_ia partir de la ecuación (40), ya que no se conoce el valor de esta potencia en el nodo. La potencia reactiva calculada, debe ser reemplazada en la ecuación (38).

- Debe ajustarse el valor de la tensión que se obtiene por la ecuación (38) en nodos PV, debe realizarse por medio de la ecuación (43).
- Cuando se obtienen los resultados de tensión y ángulo en los nodos PV y PQ se procede a calcular el valor de error de convergencia con las ecuaciones (45) y (46). Para determinar que el flujo converge, el resultado al evaluar este error debe ser inferior al valor de error establecido en el enunciado del caso estudio.

5.1.3. *Iteración 1 método Gauss-Seidel*

Los valores de condiciones iniciales quedarán de la siguiente manera:

- $V_1^{(0)} = 1.025\angle 0^\circ[pu]$
- $V_2^{(0)} = 1\angle 0^\circ[pu]$
- $V_3^{(0)} = 1.03\angle 0^\circ[pu]$

Primero se calcula las ecuaciones de tensión para el nodo PQ con el siguiente modelo matemático mostrado en la ecuación (38):

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j=1 \wedge j \neq i}^{n} Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \tag{38}$$

Se reemplaza en la ecuación (39) para obtener tensión en el nodo 2:

$$V_2^{(0+1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(0)}} - \left((Y_{21} V_1^{(0)}) + (Y_{23} V_3^{(0)}) \right) \right] \tag{39}$$

$$V_2^{(1)} = \frac{1}{-j80} \left[\frac{-4 + j2}{1\angle 0^\circ} - ((j40 \cdot 1.025\lfloor 0^\circ) + (j40 \cdot 1.03\lfloor 0^\circ)) \right]$$

$$V_2^{(1)} = 1.00250 - j0.05000[p.u]$$

En forma polar la expresión es:

$$V_2^{(1)} = 1.00374\angle - 2.85527[p.u]$$

Ahora se realiza el cálculo para la tensión 3, cabe recordar que este es un nodo PV, por tanto, se debe calcular el valor de Q_3 usando la ecuación (40):

$$Q_i^{(k+1)} = -Imag \left[V_i^{*(k)} \left(\sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \right] \tag{40}$$

Para este caso queda de la siguiente manera:

$$Q_3^{(0+1)} = -IM \left[V_3^{*(0)} \left((Y_{31} V_1^{(0)}) + (Y_{32} V_2^{(1)}) + (Y_{33} V_3^{(0)}) \right) \right] \tag{41}$$

$$Q_3^{(1)} = -IM\left[1.03\angle 0^\circ\left((j20 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.0025 - j0.0500) + (-j60 \cdot 1.03\lfloor 0^\circ)\right)\right]$$

$$Q_3^{(1)} = 1.23600[p.u]$$

Ahora se procede a reemplazar en el modelo matemático planteado en la ecuación (38):

$$V_3^{(0+1)} = \frac{1}{Y_{33}}\left[\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^{*(0)}} - \left((Y_{31}V_1^{(0)}) + (Y_{32}V_2^{(1)})\right)\right] \tag{42}$$

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{-j60}\left[\frac{3 - j1.23600}{1.03\angle 0^\circ} - ((j20 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.0025 - j0.0500))\right]$$

$$V_3^{(1)} = 1.03000 + j0.01521[p.u]$$

En forma polar la expresión es:

$$V_3^{(1)} = 1.03011\lfloor 0.84612[p.u]$$

Para nodos PV, se realiza una corrección de tensión utulizando la ecuación (43):

$$V_{icorregido}^{(k+1)} = \sqrt{(\mid V_i \mid)^2 - \left(Imag\left(V_i^{k+1}\right)\right)^2} \tag{43}$$

Calculando, se obtiene:

$$V_{3corregido}^{(1)} = \sqrt{(\mid V_3 \mid)^2 - \left(Imag\left(V_3^{(1)}\right)\right)^2} \tag{44}$$

$$V_{3corregido}^{(1)} = \sqrt{(1.03)^2 - (im\,(0.01521))^2}$$

$$V_{3corregido}^{(1)} = 1.029887 + j0.01521[p.u]$$

Entonces, el valor de $V_{3corregido}^{(1)}$ en forma polar es:

$$V_3^{(1)} = 1.03\angle 0.84614^\circ[pu]$$

Finalizado este paso, se evalúa el error del cálculo hecho anteriormente con respecto a los valores de condiciones iniciales, si este es menor a la tolerancia de error, damos por terminado el ejercicio, de ser mayor repetimos los calculos en una segunda iteración.

Los modelos matemáticos para el cálculo de los errores de mágnitud de tensión y ángulo están dados por las ecuaciones (45) y (46):

$$Error = \frac{\mid V_i^{(k)} \mid - \mid V_i^{(k-1)} \mid}{\mid V_i^{(k)} \mid} \tag{45}$$

$$Error = \frac{\theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)}}{\theta_i^{(k)}} \tag{46}$$

Calculamos el error para V_2 ,θ_2 y θ_3:

$$Error_{|V_2|} = \frac{\mid V_2^{(1)} \mid - \mid V_2^{(0)} \mid}{\mid V_2^{(1)} \mid} \tag{47}$$

$$Error_{|V_2|} = \frac{1.00374 - 1}{1.00374} = 0.00372$$

$$Error_{\theta_2} = \frac{\theta_2^{(1)} - \theta_2^{(0)}}{\theta_2^{(1)}} \tag{48}$$

$$Error_{\theta_2} = \frac{2.85527 - 0}{2.85527} = 1$$

$$Error_{\theta_3} = \frac{\theta_3^{(1)} - \theta_3^{(0)}}{\theta_3^{(1)}} \tag{49}$$

$$Error_{\theta_3} = \frac{0.84614 - 0}{0.84614} = 1$$

Los valores de error para la primera iteración se resumen en la Tabla 4:

ITERACIÓN 1			
$Variable$	$\varepsilon.calculado$	$\varepsilon.definido$	$Cumple$
$\mid V_2 \mid$	0.00374	≤ 0.001	No
θ_2	1	≤ 0.001	No
θ_3	1	≤ 0.001	No

Tabla 4: Verificación de errores de la iteración 1 para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Dado que uno o más valores de error no cumplen con el valor mínimo permitido, se realiza una segunda iteración.

5.1.4. *Iteración 2 método Gauss-Seidel*

Los valores de condiciones iniciales actualizados son:

- $V_1^{(1)} = 1.025\angle 0°[pu]$
- $V_2^{(1)} = 1.00374\angle -2.85527[pu]$
- $V_3^{(1)} = 1.03\angle 0.84614[pu]$

Reemplazando en las ecuaciones planteadas para la iteración 1, obtenemos:

Para V_2:

$$V_2^{(2)} = \frac{1}{-j80}\left[\frac{-4+j2}{1.00374\angle 2.85527^\circ} - ((j40 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.03\angle 0.84614^\circ))\right]$$

$$V_2^{(2)} = 1.00008 - j0.04090[pu]$$

En forma polar quedaría:

$$V_2^{(2)} = 1.00092\angle -2.34222^\circ[pu]$$

Para V_3 y Q_3:

$$Q_3^{(2)} = -imag\left[1.03\angle -0.84614^\circ\left((j20 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.00092\angle -2.34222^\circ) + (-j60 \cdot 1.03\angle 0.84614^\circ)\right)\right]$$

$$Q_3^{(2)} = 1.36733[pu]$$

Ahora procedemos a cálcular $V_3^{(2)}$:

$$V_3^{(2)} = \frac{1}{-j60}\left[\frac{3-j1.36733}{1.03\angle -0.84614^\circ} - ((j20 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.00092\angle -2.34222^\circ))\right]$$

$$V_3^{(2)} = 1.02979 + j0.02159[pu]$$

En forma polar la expresión es:

$$V_3^{(2)} = 1.03001\angle 1.20152^\circ[pu]$$

Calculando la corrección de la tensión, se obtiene:

$$\mid V_{3corregido}^{(2)} \mid = \sqrt{(1.03)^2 - (imag\,(0.02159))^2}$$

$$V_{3corregido}^{(2)} = 1.02977 + j0.02159$$

Entonces, el valor de $V_{3corregido}^{(2)}$ es:

$$V_{3corregido}^{(2)} = 1.03000\angle 1.20154^\circ[pu]$$

Se evalúa el error para $|V_2|$,θ_2 yθ_3:

$$Error_{|V_2|} = \frac{1.00092 - 1.00374}{1.00092} = -0.0028$$

$$Error_{\theta_2} = \frac{-2.34222 + 2.85527}{-2.34222} = -0.2190$$

$$Error_{\theta_3} = \frac{1.20154 - 0.84614}{1.20154} = 0.2957$$

Los valores de error se resumen en la Tabla 5:

ITERACIÓN 2			
$Variable$	$\varepsilon.calculado$	$\varepsilon.definido$	$Cumple$
$\mid V_2 \mid$	-0.0028	≤ 0.001	No
θ_2	-0.2190	≤ 0.001	No
θ_3	0.2957	≤ 0.001	No

Tabla 5: Verificación de errores de la iteración 2 para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como es evidente, los valores de errores se hacen más cercanos al valor determinado para el ejercicio, pero aún no cumplen con lo requerido, por tanto se debe repetir el proceso con una nueva iteración.

5.1.5. *Iteración 3 método Gauss-Seidel*

Los valores de condiciones iniciales para la iteración 3 son:

- $V_1^{(2)} = 1.025\angle 0^{\circ}[pu]$
- $V_2^{(2)} = 1.00092\angle -2.34222^{\circ}[pu]]$
- $V_3^{(2)} = 1.03000\angle 1.20154^{\circ}[pu]$

Se procede a calcular las tensiones:

$$V_2^{(3)} = \frac{1}{-j80}\left[\frac{-4+j2}{1.00092\angle 2.34222^{\circ}} - ((j40 \cdot 1.025\angle 0^{\circ}) + (j40 \cdot 1.03000\angle 1.20154^{\circ}))\right][pu]$$

$$V_2^{(3)} = 1.00038 - j0.03809[pu]$$

En forma polar la expresión es:

$$V_2^{(3)} = 1.00111\angle -2.18089^{\circ}[pu]$$

Para V_3 y Q_3:

$$Q_3^{(3)} = -imag\left[(1.03000\angle -1.20154^{\circ})\left((j20 \cdot 1.025\angle 0^{\circ}) + (j40 \cdot 1.00111\angle -2.18089^{\circ}) + (-j60 \cdot 1.03000\angle 1.20154^{\circ})\right)\right][p.u]$$

$$Q_3^{(3)} = 1.36969[p.u]$$

Ahora se calcula $V_3^{(3)}$:

$$V_3^{(3)} = \frac{1}{-j60}\left[\frac{3 - j1.36969}{1.03000\angle -1.20154^\circ} - ((j20 \cdot 1.025\angle 0^\circ) + (j40 \cdot 1.00111\angle -2.18089^\circ))\right][p.u]$$

$$V_3^{(3)} = 1.02972 + j0.02360[p.u]$$

En forma polar la expresión es:

$$V_3^{(3)} = 1.02999\angle 1.31316^\circ[p.u]$$

Calculando la corrección de la tensión, se obtiene:

$$\mid V_{3corregido}^{(3)} \mid = \sqrt{(1.03)^2 - (imag\,(0.02360))^2}$$

$$\mid V_{3corregido}^{(3)} \mid = 1.02972 + j0.02360$$

Entonces, el valor de $V_{3corregido}^{(3)}$es:

$$V_{3corregido}^{(3)} = 1.03\angle 1.31315^\circ[p.u]$$

Se evalua el error para $|V_2|$,θ_2,yθ_3:

$$Error_{|V_2|} = \frac{1.00111 - 1.00092}{1.00111} = 0.00018$$

$$Error_{|\theta_2|} = \frac{-2.18089 + 2.34222}{-2.18089} = -0.0739$$

$$Error_{|\theta_3|} = \frac{1.31315 - 1.20154}{1.31315} = 0.0849$$

Los valores de error se resumen en la Tabla 6:

ITERACIÓN 3			
$Variable$	$\varepsilon.calculado$	$\varepsilon.definido$	$Cumple$
$\mid V_2 \mid$	0.00018	≤ 0.001	Si
θ_2	-0.0739	≤ 0.001	No
θ_3	0.0849	≤ 0.001	No

Tabla 6: Verificación de errores de la iteración 3 para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como no se consigue llegar al error desado, se repite el proceso iterativo hasta encontrar dicho valor.

La Tabla 7 resume las iteraciones faltantes para lograr tener un valor de error inferior al 0.001.

RESULTADO DE ITERACIONES					
Iteración	$V_2[pu]$	$V_3[pu]$	$\varepsilon \mid V_2 \mid$	$\varepsilon\theta_2$	$\varepsilon\theta_3$
1	$1.00374\angle -2.85527^\circ$	$1.03\angle 0.84614^\circ$	0.00372	1	1
2	$1.00092\angle -2.34222^\circ$	$1.03\angle 1.20154^\circ$	-0.0028	-0.2190	0.2957
3	$1.00111\angle -2.18089^\circ$	$1.03\angle 1.31315^\circ$	0.00018	-0.0739	0.0849
4	$1.00119\angle -2.12697^\circ$	$1.03\angle 1.35032^\circ$	0.0000	-0.0253	0.0275
5	$1.00122\angle -2.10883^\circ$	$1.03\angle 1.36245^\circ$	0.0000	-0.0086	0.0089
6	$1.00123\angle -2.10296^\circ$	$1.03\angle 1.36649^\circ$	0.0000	-0.0027	0.0029
7	$1.00124\angle -2.1010^\circ$	$1.03\angle 1.36783^\circ$	0.0000	-0.0009	0.0009

Tabla 7: Resultados por iteraciones para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen los valores de tensión y ángulo en los nodos, se procede a calcular el flujo de carga en las líneas y las pérdidas presentes en ellas.

Las corrientes para la línea uno se calculan con (50) y (51).

$$I_{lin13} = -(V_1 - V_3) * Y_{13} \tag{50}$$

$$I_{lin13} = -(1.025 + 0j - (1.02970 + 0.02458j)) * 20 = -0.49174 + 0.09412j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_3 - V_1) * Y_{31} \tag{51}$$

$$I_{lin31} = -(1.02970 + 0.02458j - (1.025 + 0j)) * 20 = 0.49174 - 0.09412j[pu]$$

Las corrientes para la línea dos se calculan con (52) y (53).

$$I_{lin12} = -(V_1 - V_2) * Y_{12} \tag{52}$$

$$I_{lin12} = -(1.025 + 0j - (1.00056 - 0.03670j)) * 40 = 1.46827 - 0.97724j[pu]$$

$$I_{lin21} = -(V_2 - V_1) * Y_{21} \tag{53}$$

$$I_{lin21} = -(1.00056 - 0.03670j - (1.025 + 0j)) * 40 = -1.46827 + 0.97724j[pu]$$

Las corrientes para la línea tres se calculan con (54) y (55).

$$I_{lin23} = -(V_2 - V_3) * Y_{23} \tag{54}$$

$$I_{lin23} = -(1.00056 - 0.03670j - (1.02970 + 0.02458j) * 40 = -2.45175 + 1.16550j[pu]$$

$$I_{lin32} = -(V_3 - V_2) * Y_{32} \tag{55}$$

$$I_{lin32} = -(1.02970 + 0.02458j - (1.00056 - 0.03670j)) * 40 = 2.45175 - 1.16550j[pu]$$

La Tabla 8 muestra las corrientes que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel.

TABLA DE CORRIENTES		
Nodo		Corriente [p.u.]
Inicio	Final	
1	3	$-0.49174 + 0.09412j$
3	1	$0.49174 - 0.09412j$
1	2	$1.46827 - 0.97724j$
2	1	$-1.46827 + 0.97724j$
2	3	$-2.45175 + 1.16550j$
3	2	$2.45175 - 1.16550j$

Tabla 8: Corrientes para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen las corrientes en cada línea, se calcula el flujo de carga para la línea uno con la ecuaciónes (56) y (57).

$$S_{lin13} = (V_1) * (I_{lin13})^* \tag{56}$$

$$S_{lin13} = 1.025 + 0j * -0.49174 - 0.09412j = -050403 - 0.09648j\lfloor[pu]$$

$$S_{lin13real} = -0.50403 - 0.09648j\lfloor[pu] * 100[MVA] = -50.403 - 9.648j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin31} = (V_3) * (I_{lin31})^* \tag{57}$$

$$S_{lin31} = 1.02970 + 0.02458j * 0.49174 + 0.09412j = 0.50403 + 0.10901j[pu]$$

$$S_{lin31real} = 0.50403 + 0.10901j[pu] * 100[MVA] = 50.403 + 10.901j\lfloor[MVA]$$

El flujo de carga para la línea dos se calcula a partir de (58) y (59):

$$S_{lin12} = (V_1) * (I_{lin12})^* \tag{58}$$

$$S_{lin12} = 1.025 + 0j * 1.46827 + 0.97724j = 1.50497 + 1.00167j[pu]$$

$$S_{lin12real} = 1.50497 + 1.00167j[pu] * 100[MVA] = 150.497 + 100.167j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin21} = (V_2) * (I_{lin21})^* \tag{59}$$

$$S_{lin21} = 1.00056 - 0.03670j * -1.46827 - 0.97724j = -1.50497 - 0.92390j[pu]$$

$$S_{lin21real} = -1.50497 - 0.92390j[pu] * 100[MVA] = -150.497 - 92.390j\lfloor[pu]$$

El flujo de carga para la línea tres se calcula a partir de (60) y (61):

$$S_{lin23} = (V_2) * (I_{lin23})^* \tag{60}$$

$$S_{lin23} = 1.00056 - 0.03670j * -2.45175 - 1.16550j = -2.49593 - 1.07617j[pu]$$

$$S_{lin23real} = -2.49593 - 1.07617j[pu] * 100[MVA] = -249.593 - 107.617j\lfloor[pu]$$

$$S_{lin32} = (V_3) * (I_{lin32})^* \tag{61}$$

$$S_{lin32} = 1.02970 + 0.02458j * 2.45175 + 1.16550j = 2.49593 + 1.26041j[pu]$$

$$S_{lin32real} = 2.49593 + 1.26041j[pu] * 100[MVA] = 249.593 + 126.041j\lfloor[pu]$$

La Tabla 9 muestra el flujo de carga que se obtuvo en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel.

TABLA DE FLUJO DE CARGA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	-50.403	$-9.648j$
3	1	50.403	$10.901j$
1	2	1.50497	$1.00167j$
2	1	-150.497	$-92.390j$
2	3	-2.49593	$-1.07617j$
3	2	249.593	$126.041j$

Tabla 9: Flujo de carga para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de potencia en las tres lineas son:

$$S_{p13} = S_{lin13} + S_{lin31}, \tag{62}$$

$$S_{p12} = S_{lin12} + S_{lin21}, \tag{63}$$

$$S_{p23} = S_{lin23} + S_{lin32}, \tag{64}$$

$$S_{p13} = -050403 - 0.09648j + 0.50403 + 0.10901j = 0 + 0.01253j[pu]$$

$$S_{p13real} = 0 + 0.01253j[pu] * 100[MVA] = 0 + 1.253j\lfloor[pu]$$

$$S_{p12} = 1.50497 + 1.00167j - 1.50497 - 0.92390j = 0 + 0.07777j[pu]$$

$$S_{p12real} = 0 + 0.07777j[pu] * 100[MVA] = 0 + 7.777j\lfloor[pu]$$

$$S_{p23} = -2.49593 - 1.07617j + 2.49593 + 1.26041j = 0 + 0.18423j[pu]$$

$$S_{p23real} = 0 + 0.18423j[pu] * 100[MVA] = 0 + 18.423j\lfloor[pu]$$

La Tabla 10 muestra las pérdidas de potencia en las líneas que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel.

TABLA DE PÉRIDAS DE POTENCIA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	0	$1.253j$
1	2	0	$7.777j$
2	3	0	$18.423j$

Tabla 10: Pérdidas de potencia en las líneas para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza los cálculos de potencia inyectada en los nodos:

$$S_{nodo1} = S_{lin13} + S_{lin12}, \tag{65}$$

$$S_{nodo2} = S_{lin21} + S_{lin23}, \tag{66}$$

$$S_{nodo3} = S_{lin31} + S_{lin32}, \tag{67}$$

$$S_{nodo1} = (-0.50403 - 0.09648j) + (1.50497 + 1.00167j) = 1.00094 + 0.90519j[pu]$$

$$S_{nodo1real} = 1.00094 + 0.90519j[pu] * 100[MVA] = 100.094 + 90.519j\lfloor[pu]$$

$$S_{nodo2} = (-1.50497 - 0.92390j) + (-2.49593 - 1.07617j) = -4.00091 - 2.00008j[pu]$$

$$S_{nodo2real} = -4.00091 - 2.00008j * 100[MVA] = -400.091 - 200.008j\lfloor[pu]$$

$$S_{nodo3} = (0.50403 + 0.10901j) + (2.49593 + 1.26036j) = 2.99996 + 1.36943j[pu]$$

$$S_{nodo3real} = 2.99996 + 1.36943j * 100[MVA] = 299.996 + 136.943j \lfloor [pu]$$

La Tabla 11 muestra el balance de potencia que se obtuvo en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel.

TABLA DE BALANCE DE POTENCIA							
Nodo		Potencia neta		Potencia generada		Potencia demandada	
Inicio	Final	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]
1	3	100.094	$90.519j$	100.094	$90.519j$	0	0
1	2	-400.091	$-200.008j$	-0.091	$-0.008j$	400	200
2	3	299.996	$136.943j$	299.996	$136.943j$	0	0

Tabla 11: Balance de potencia para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

5.1.6. *Solución por el método de Gauss-Seidel utilizando Fluxtool*

Una vez se ingresan los datos del problema en el software, los resultados finales de las tensiones y balance de potencias en los nodos por medio del método de Gaus-Seidel, se observan en la Figura 9.

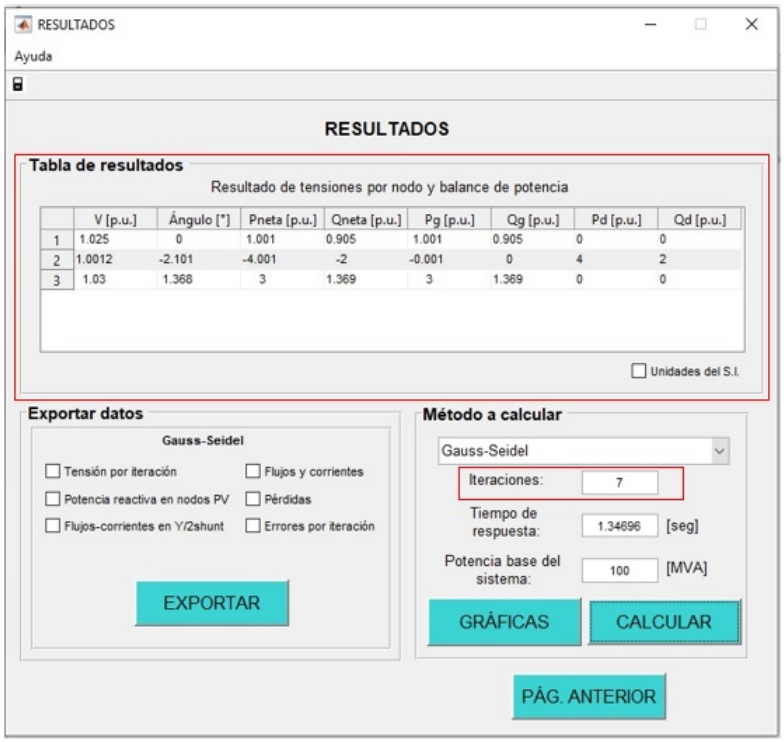


Figura 9: Resultados con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia un total de 7 iteraciones para solucionar el problema planteado, además de esto, se dará paso a exportar los resultados mas relevantes del caso 1, los cuales son las tensiones, ángulos, flujo de carga y pérdidas en las líneas. Para esto seleccionamos las casillas con dichos nombres y se procede a pulsar el botón **EXPORTAR** como se muestra en la Figura10.

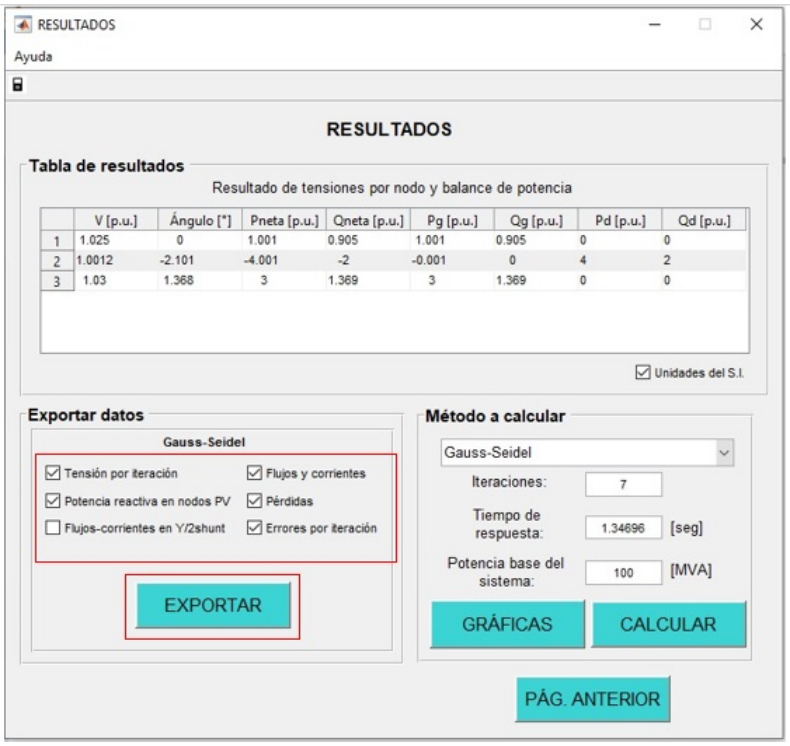


Figura 10: Exportar datos para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Figura11 se muestran los valores de tensión y ángulo por cada iteración. Se puede observar que la primera columna muestra el número de la iteración, seguido de el número del nodos del sistema ordenado de menor a mayor junto con el resultado de su respectivo tensión y ángulo.

	A	B	C	D
1	ITERACIONES_GAUSS	NODOS_GAUSS	TENSION_GAUSS_PU	ANGULO_GAUSS_GRADOS
2	1	1	1,025	0
3	1	2	1,003746108	-2,855278885
4	1	3	1,03	0,846136778
5	2	1	1,025	0
6	2	2	1,000922908	-2,342214495
7	2	3	1,03	1,201330973
8	3	1	1,025	0
9	3	2	1,00111424	-2,180728317
10	3	3	1,03	1,312999294
11	4	1	1,025	0
12	4	2	1,00119996	-2,12688502
13	4	3	1,03	1,350039121
14	5	1	1,025	0
15	5	2	1,001228987	-2,108967115
16	5	3	1,03	1,362361348
17	6	1	1,025	0
18	6	2	1,001238639	-2,103004751
19	6	3	1,03	1,366461635
20	7	1	1,025	0
21	7	2	1,001241847	-2,101020744
22	7	3	1,03	1,367826032

Hoja1 | Sheet2 | Sheet3 | Tensión y ángulos | Potencia reactiva en no

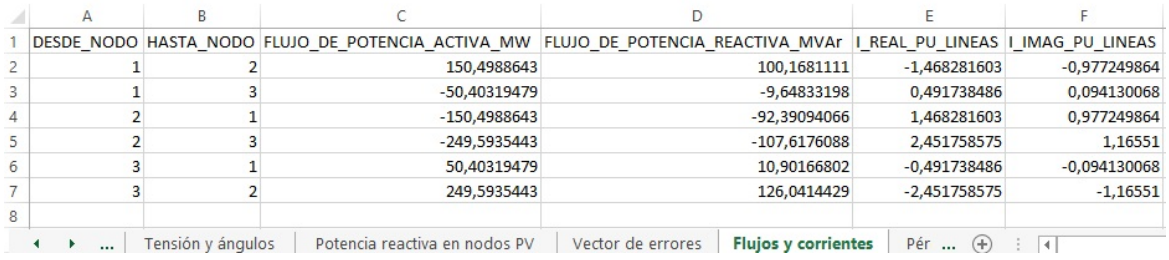
Figura 11: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 12 muestra la comparación y error de los resultados de tensión y ángulo mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE TESIONES, ÁNGULOS Y ERROR							
		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Iteraciones	Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión	Ángulo
1	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00374	−2.85527	1.00374	−2.85527	0	0
	3	1.03	0.84614	1.03	0.84613	0	0.00118
2	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00092	−2.34222	1.00092	−2.34221	0,00042	0
	3	1.03	1.20154	1.03	1.20133	0	0.01747
3	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00111	−2.18089	1.00111	−2.18072	0.00779	0
	3	1.03	1.31315	1.03	1.31299	0	0.01218
4	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00119	−2.12697	1.00119	−2.1268	0.00799	0
	3	1.03	1.35032	1.03	1.35003	0	0.02147
5	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00122	−2.10883	1.00122	−2.10896	−0.00616	0
	3	1.03	1.36245	1.03	1.36236	0	0.00660
6	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00123	−2.10296	1.00123	−2.10300	−0.00190	0
	3	1.03	1.36649	1.03	1.36646	0	0.00219
7	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00124	−2.1010	1.00124	−2.10102	−0.00095	0
	3	1.03	1.36783	1.03	1.36782	0	0.00073

Tabla 12: Comparativo de tensiones y ángulos entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra los nodos en los que conecta cada línea , seguido de los valores del flujo de carga y corriente para cada una de estos elementos.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	150,4988643	100,1681111	-1,468281603	-0,977249864
3	1	3	-50,40319479	-9,64833198	0,491738486	0,094130068
4	2	1	-150,4988643	-92,39094066	1,468281603	0,977249864
5	2	3	-249,5935443	-107,6176088	2,451758575	1,16551
6	3	1	50,40319479	10,90166802	-0,491738486	-0,094130068
7	3	2	249,5935443	126,0414429	-2,451758575	-1,16551
8						

Figura 12: Resultados del flujo de carga con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 13 muestra la comparación y error de los resultados del flujo de carga en las líneas, mediante la solución teórica y la solución dada por el software Fluxtool en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y ERROR							
Conexión nodo		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	3	−50.403	−9.648	−50.403	−9.648	0	0
3	1	50.403	10.901	50.403	10.901	0	0
1	2	150.497	100.167	150.498	100.168	0.0006	−0.0009
2	1	−150.497	−92.390	−150.498	−92.390	−0.0006	0
2	3	−249.593	−107.617	−249.593	−107.617	0	0
3	2	249.593	126.036	249.593	126.041	0	−0.0039

Tabla 13: Comparativo del flujo de carga entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13 muestra el número de líneas, seguido de los valores de pérdidas de potencia.

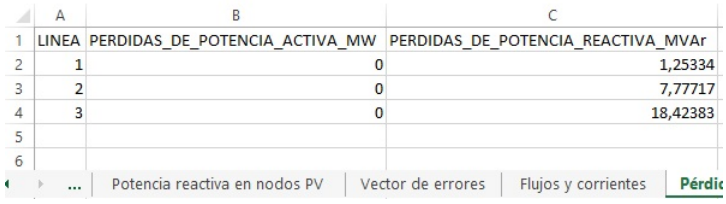


Figura 13: Resultados de pérdidas de potencia con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 14 muestra la comparación y error de los resultados de pérdidas de potencia en las líneas, mediante la solución teórica y la solución dada por el software Fluxtool en el caso 1 para el método de Gauss-Seidel, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ERROR						
	Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Línea	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	0	1.253	0	1.253	0	0
2	0	7.777	0	7.777	0	0
3	0	18.423	0	18.423	0	0

Tabla 14: Comparativo de las pérdidas de potencia entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Gauss-Seidel - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puedo evidenciar, el software calcula y muestra el resultado de las diferentes variables que se tomaron para evaluar el error por cada iteración. Comparando con la solución teórica y la solución dada por Fluxtool para el caso 1, se tuvo un error menor al 1 %, esto demuestra la veracidad del algoritmo programado para el método de Gauss-Seidel.

5.1.7. *Solución teórica del caso 1 por el método de Newton Raphson*

Tomando los mismos párametros iniciales del enunciado, se procede a dar solución al caso estudio por medio del método de Newton Raphson realizando los siguientes pasos:

• Obtener la matriz de admitancias o Ybus.

• Definir las condiciones iniciales. Para los nodos PQ ya se conoce la potencia demandada; la tensión y ángulo tendrán valores de $1[p.u.]$ y 0° respectivamente. Para nodos PV ya se conocen los valores de tensión y potencia generada; el valor del ángulo será de 0°.

• Se procede a calcular las ecuaciones de potencias activa y reactiva correspondientes a los nodos PQ y PV, con los modelos matemáticos mostrados en las ecuaciones (69), (70) y (71) respectivamente.

• Se da paso a la construcción de la matriz Jacobiana, sin tener en cuenta las potencias presentes en el nodo Slack, empleando el modelo matemático expresado en la ecuación (71)

• Se calcula el vector de deltas de potencia que se muestra en la ecuación (81). Los valores por cada iteración de este vector, irán mostrano la convergencia del error de tolerancia establecido incialmente, cuyo valor es de 0.001.

•Se usa la ecuación (83) , que está compuesta por la matriz Jacobiana inversa, multiplicada por el vector de deltas de potencias mencionado en el paso anterior, para hallar los deltas de correcciones de ángulos y tensiones.

•Finalmente se suman las correciónes de tensión y ángulo a los valores de condiciones iniciales de dichas variables como en la ecuación (84), para obtener el valor final de la iteración.

5.1.8. *Iteración 1 método Newton Raphson*

Se procede a la consturción de la matriz de admitancia, la cual será visualizada con sus compoenentes en polar para el caso de Newton Raphson y será la siguiente:

$$Ybus = \begin{bmatrix} 60\angle -90 & 40\angle 90 & 20\angle 90 \\ 40\angle 90 & 80\angle -90 & 40\angle 90 \\ 20\angle 90 & 40\angle 90 & 60\angle -90 \end{bmatrix} \tag{68}$$

En la Tabla 15 se plantean los datos de condiciones iniciales para cada nodo y las líneas del sistema.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd[pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.025\angle 0^{\circ}$	-	-	-
2	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	4	2
3	PV	$1.03\angle 0^{\circ}$	3	-	-

Tabla 15: Condiciones inicales - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se empieza el desarrollo del problema calculando las potencias del sistema mediante las ecuaciones de potencia calculada (69), (70), (71).

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(0)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{69}$$

$$P_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1|^2 * |80| * cos(-90) + |1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{2cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(0)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{70}$$

$$P_{3cal}^{(0)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 0 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(0)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (71)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1|^2 * |80| * sen(-90) - |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = -2.1999[pu]$$

La ecuación (72) muestra el modelo la matriz jacobiana para este ejercicio .

$$J = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{22} \\ H_{32} & H_{33} & N_{23} \\ J_{22} & J_{23} & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{22} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (73)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) + |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 82.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{23} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (74)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -41.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento N_{22} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = |V_1| * |Y_{21}| * cos(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + 2 * |V_2| * |Y_{22}| * cos(\theta_{22}) + |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (75)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1| * |80| * cos(-90) + |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = 0$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{32} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * sen(a\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2) \tag{76}$$
$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|1.03| * |1| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -41.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{33} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * sen(a\theta_{21} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * sen(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{77}$$
$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |1.03| * |1.025| * |20| * sen(90 - 0 + 0) + |1.03| * |1| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = 62.31499$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento N_{23} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2) \tag{78}$$
$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = |1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = 0$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento J_{22} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{79}$$
$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |1| * |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = 0$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento J_{23} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(a\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{80}$$
$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = 0$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento L_{22} de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -|V_1| * |Y_{21}| * sen(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - 2 * |V_2| * |Y_{22}| * sen(\theta_{22}) - |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (81)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1| * |80| * sen(-90) - |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = 77.79999$$

La matriz jacobiana para la primera iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.19999 & -41.19999 & 0 \\ -41.1999 & 62.31499 & 0 \\ 0 & 0 & 77.79999 \end{bmatrix}$$

Ahora se necesita encontrar el valor del vector de deltas de potencia, para esto se realiza la resta entre la potencia específica, la cual es la potencia de las condiciones iniciales y la potencia calculada que ya se tenía previamente de (69), (70) y (71) .

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(0)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(0)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 - 0 \\ 3 - 0 \\ -2 + 2.19999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \\ 3 \\ 0.19999 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superan el valor del error establecido, el cual fue de 0.001, esto indica que se debe hacer una nueva iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo, por lo tanto se toma la inversa de la matriz jacobiana y se multiplica con el vector de deltas de potencia, según la expresión (83).

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (83)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01819 & 0.01202 & 0 \\ 0.01202 & 0.0240 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01285 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -4 \\ 3 \\ 0.19999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03669 \\ 0.02388 \\ 0.00257 \end{bmatrix}$$

Una vez calculado el vector de deltas de tensión y ángulo, se le suma el valor de tensiones y ángulos de la iteración anterior. Para esta primera iteración se toman los valores de las condiciones iniciales del sistema y así se podrán encontrar los valores de las incognitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(0)} \\ \delta_3^{(0)} \\ |V_2^{(0)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(0)} \\ \triangle\delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} \tag{84}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0367 \\ 0.0239 \\ 0.0026 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03669 \\ 0.02388 \\ 1.00257 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la primera iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.00257\angle -2.10218°[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36822°[pu]$$

Para la expresión (83), en el vector de deltas de potencia no se logra alcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.9. *Iteración 2 método Newton Raphson*

Solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(1)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{85}$$

$$P_{2cal}^{(1)} = |1.0026| * |1.025| * |40| * cos(90 + 2.10218 + 0) + |1.0026|^2 * |80| * cos(90) + |1.00257| * |1.03| * |40|...$$

$$*cos(90 + 2.10218 + 1.36822)$$

$$P_{2cal}^{(1)} = -4.00813[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(1)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{86}$$

$$P_{3cal}^{(1)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 1.36822 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1.00257| * |40|...$$

$$*cos(90 - 1.36822 - 2.10218)$$

$$P_{3cal}^{(1)} = 3.00458[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(1)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (87)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = |1.0025| * |1.025| * |40| * sen(90 + 2.10218 + 0) - |1.00257|^2 * |80| * sen(-90) - |1.00257| * |1.03| * |40|...$$

$$*sen(90 + 2.10218 + 1.36822)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = -1.89611[pu]$$

La matriz jacobiana para la segunda iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.30784 & -41.23013 & -3.99783 \\ -41.23013 & 62.33911 & 2.5003 \\ -4.00815 & 2.50035 & 78.31434 \end{bmatrix}$$

Vector de deltas de potencia para la segunda iteración es dado por (88).

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(1)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(1)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (88)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 4.00813 \\ 3 - 3.00458 \\ -2 + 1.89611 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.008132 \\ -0.00458 \\ -0.10388 \end{bmatrix}$$

Como se puede obsevar, los valores de los residuos de potencia superan el valor del error establecido, el cual fue de 0.001, esto indica que se debe hacer una nueva iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo para la iteración 2 por tanto:

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(1)} \\ \triangle \delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} \quad (89)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(1)} \\ \triangle \delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01819 & 0.01201 & 0.00054 \\ 0.01201 & 0.02339 & -0.00015 \\ 0.00054 & -0.00015 & 0.01280 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.008132 \\ -0.00458 \\ -0.10388 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00003 \\ 0.00000 \\ -0.00132 \end{bmatrix}$$

Para esta segunda iteración se toman los valores de la primera iteración del ejemplo y así se podrán encontrar los valores de las incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(1)} \\ \triangle\delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} \tag{90}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03669 \\ 0.02388 \\ 1.00257 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.00003 \\ 0.00000 \\ -0.00132 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03666 \\ 0.02388 \\ 1.00125 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la segunda iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.00125\angle - 2.10046°[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36822°[pu]$$

Para la expresión (88), en el vector de deltas de potencia no se logra alcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.10. *Iteración 3 método Newton Raphson*

Solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(2)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{91}$$

$$P_{2cal}^{(2)} = |1.00125| * |1.025| * |40| * cos(90 + 2.10046 + 0) + |1.00125|^2 * |80| * cos(-90) + |1.00125| * |1.03| * |40|...$$

$$*cos(90 + 2.10046 + 1.36822)$$

$$P_{2cal}^{(2)} = -4.00038[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(2)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{92}$$

$$P_{3cal}^{(2)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 1.36822 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1.00125| * |40|...$$

$$*cos(90 - 1.36822 - 2.10046)$$

$$P_{3cal}^{(2)} = 3.00006[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(2)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (93)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = |1.00125| * |1.025| * |40| * sen(90 + 2.10046 + 0) - |1.0013|^2 * |80| * sen(-90) - |1.00125| * |1.03| * |40| ...$$

$$* sen(90 + 2.10046 + 1.36822)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = -1.99947[pu]$$

La matriz jacobiana para la tercera iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.19959 & -41.17592 & -3.99536 \\ -41.17592 & 62.28490 & 2.49585 \\ -4.00041 & 2.49582 & 78.10302 \end{bmatrix}$$

Vector de deltas de potencia para la tercera iteración:

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(2)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(2)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (94)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 4.00038 \\ 3 - 3.00006 \\ -2 + 1.99947 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00038 \\ -0.00006 \\ -0.00053 \end{bmatrix}$$

Se evidencia que en los residuos de potencia ya se tiene un valor inferior al error de 0.001 planteado inicialmente, por lo tanto el número de iteraciones termina.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo para la iteración 3 entonces:

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} \quad (95)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01821 & 0.01201 & 0.00054 \\ 0.01201 & 0.02400 & -0.00015 \\ 0.00054 & -0.00015 & 0.01283 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.00038 \\ -0.00006 \\ -0.00053 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix}$$

Para esta tercera iteración se toman los valores de la segunda iteración del ejercicio y con esto se puede encontrar los valores de las incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} \quad (96)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03666 \\ 0.02388 \\ 1.00125 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03666 \\ 0.02388 \\ 1.00125 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la tercera iteración los resultados de tensión y ángulo en grados son:

$$V_2 = 1.00125\angle -2.10046^\circ [pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.3682^\circ [pu]$$

La Tabla 16 muestra el resultado final de los valores de tensión, ángulo y vector de error de potencias por cada iteración, para el caso 1 por el método de Newton Raphson.

RESULTADO DE ITERACIONES					
Iteración	$V_2[pu]$	$V_3[pu]$	$\triangle P_2[pu]$	$\triangle P_3[pu]$	$\triangle Q_2[pu]$
1	$1.00257\angle -2.10218^\circ$	$1.03\angle 1.36822^\circ$	-4	3	1.9999
2	$1.00125\angle -2.10046^\circ$	$1.03\angle 1.36822^\circ$	0.008132	-0.00458	-0.10388
3	$1.00125\angle -2.10046^\circ$	$1.03\angle 1.3682^\circ$	0.00038	-0.00006	-0.00053

Tabla 16: Resultados para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen los valores de tensión y ángulo en los nodos, se procede a calcular el flujo de carga en las líneas y las pérdidas presentes en ellas.

Las corrientes para la línea uno se calculan con (97) y (98).

$$I_{lin13} = -(V_1 - V_3) * Y_{13} \tag{97}$$

$$I_{lin13} = -(1.025 + 0j - (1.02970 + 0.02459j)) * 20 = -0.49187 + 0.09412j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_3 - V_1) * Y_{31} \tag{98}$$

$$I_{lin31} = -(1.02970 + 0.02459j - (1.025 + 0j)) * 20 = 0.49187 - 0.09412j[pu]$$

Las corrientes para la línea dos se calculan con (99) y (100).

$$I_{lin12} = -(V_1 - V_2) * Y_{12} \tag{99}$$

$$I_{lin12} = -(1.025 + 0j - (1.00057 - 0.03669j)) * 40 = 1.46790 - 0.97690j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_2 - V_1) * Y_{21} \tag{100}$$

$$I_{lin21} = -(1.00057 - 0.03669j - (1.025 + 0j)) * 40 = -1.46790 + 0.97690j[pu]$$

Las corrientes para la línea tres se calculan con (101) y (102).

$$I_{lin23} = -(V_2 - V_3) * Y_{23} \tag{101}$$

$$I_{lin23} = -(1.00057 - 0.03669j - (1.02970 + 0.02459j) * 40 = -2.45164 + 1.16516j[pu]$$

$$I_{lin32} = -(V_3 - V_2) * Y_{32} \tag{102}$$

$$I_{lin32} = -(1.02970 + 0.02459j - (1.00057 - 0.03669j)) * 40 = 2.45164 - 1.16516j[pu]$$

La Tabla 17 muestra las corrientes que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Newton Raphson.

TABLA DE CORRIENTES		
Nodo		Corriente [p.u.]
Inicio	Final	
1	3	$-0.49187 + 0.09412j$
3	1	$0.49187 - 0.09412j$
1	2	$1.46790 - 0.97690j$
2	1	$-1.46790 + 0.97690j$
2	3	$-2.45164 + 1.16516j$
3	2	$2.45164 - 1.16516j$

Tabla 17: Corrientes para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen las corrientes en cada línea, se calcula el flujo de carga para la línea uno con la ecuaciónes (103) y (104).

$$S_{lin13} = (V_1) * (I_{lin13})^* \tag{103}$$

$$S_{lin13} = 1.025 + 0j * -0.49187 - 0.09412j = -0.50416 - 0.09648j\lfloor[pu]$$

$$S_{lin13real} = -0.50416 - 0.09648j\lfloor[pu] * 100[MVA] = -50.416 - 9.648j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin31} = (V_3) * (I_{lin31})^* \tag{104}$$

$$S_{lin31} = 1.02970 + 0.02459j * 0.49187 + 0.09412j = 0.50416 + 0.10901j[pu]$$

$$S_{lin31real} = 0.50416 + 0.10901j[pu] * 100[MVA] = 50.416 + 10.901j\lfloor[MVA]$$

El flujo de carga para la línea dos se calcula a partir de (105) y (106):

$$S_{lin12} = (V_1) * (I_{lin12})^* \tag{105}$$

$$S_{lin12} = 1.025 + 0j * 1.46790 + 0.97690j = 1.50459 + 1.00133j[pu]$$

$$S_{lin12real} = 1.50459 + 1.00133j[pu] * 100[MVA] = 150.459 + 100.133j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin21} = (V_2) * (I_{lin21})^* \tag{106}$$

$$S_{lin21} = 1.00057 - 0.03669j * -1.46790 - 0.97690j = -1.50459 - 0.92360j[pu]$$

$$S_{lin21real} = -1.50459 - 0.92360j[pu] * 100[MVA] = -150.459 - 92.360j\lfloor[MVA]$$

El flujo de carga para la línea tres se calcula a partir de (107) y (108):

$$S_{lin23} = (V_2) * (I_{lin23})^* \tag{107}$$

$$S_{lin23} = 1.00057 - 0.03669j * -2.45164 - 1.16516j = -2.49582 - 1.07586j[pu]$$

$$S_{lin23real} = -2.49582 - 1.07586j[pu] * 100[MVA] = -249.582 - 107.586j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin32} = (V_3) * (I_{lin32})^* \tag{108}$$

$$S_{lin32} = 1.02970 + 0.02459j * 2.45164 + 1.16516j = 2.49582 + 1.26007j[pu]$$

$$S_{lin32real} = 2.49582 + 1.26007j[pu] = 249.582 + 126.007j\lfloor[MVA]$$

La Tabla 18 muestra el flujo de carga que se obtuvo en el caso 1 para el método de Newton Raphson.

TABLA DE FLUJO DE CARGA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	-50.416	$-9.648j$
3	1	50.416	$10.901j$
1	2	150.459	$100.133j$
2	1	-150.459	$-92.360j$
2	3	-249.582	$-107.586j$
3	2	249.582	$126.007j$

Tabla 18: Flujo de carga para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de potencia en las lineas son:

$$S_{p13} = S_{lin13} + S_{lin31},$$

$$S_{p12} = S_{lin12} + S_{lin21},$$

$$S_{p23} = S_{lin23} + S_{lin32},$$

$$S_{p13} = -0.50416 - 0.09648j + 0.50416 + 0.10901j = 0 + 0.01253j[pu]$$

$$S_{p13real} = 0 + 0.01253j[pu] * 100[MVA] = 0 + 1.253j\lfloor[pu]$$

$$S_{p12} = 1.50459 + 1.00133j - 1.50459 - 0.92360j = 0 + 0.0777j[pu]$$

$$S_{p12real} = 0 + 0.0777j[pu] * 100[MVA] = 0 + 7.77j\lfloor[pu]$$

$$S_{p23} = -2.49582 - 1.07586j + 2.49582 + 1.26007j = 0 + 0.18420j[pu]$$

$$S_{p23real} = 0 + 0.18420j[pu] * 100[MVA] = 0 + 18.420j\lfloor[pu]$$

La Tabla 19 muestra las pérdidas de potencia en las líneas que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Newton Raphson.

TABLA DE PÉRIDAS DE POTENCIA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	0	$1.253j$
1	2	0	$7.777j$
2	3	0	$18.423j$

Tabla 19: Pérdidas de potencia en las líneas para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza los cálculos de potencia inyectada en los nodos:

$$S_{nodo1} = S_{lin13} + S_{lin12},$$

$$S_{nodo2} = S_{lin21} + S_{lin23},$$

$$S_{nodo3} = S_{lin31} + S_{lin32},$$

$$S_{nodo1} = (-0.50416 - 0.09648j) + (1.50459 + 1.00133j) = 1.00042 + 0.90485j[pu]$$

$$S_{nodo1real} = 1.00042 + 0.90485j[pu] * 100[MVA] = 100.042 + 90.485j[pu]$$

$$S_{nodo2} = (-1.50459 - 0.92360j) + (-2.49582 - 1.07586j) = -4.00042 - 1.99947j[pu]$$

$$S_{nodo2real} = -4.00042 - 1.99947j[pu] * 100[MVA] = -400.042 - 199.947j[pu]$$

$$S_{nodo3} = (0.50416 + 0.10901j) + (2.49582 + 1.26007j) = 2.99999 + 1.36909j[pu]$$

$$S_{nodo3real} = 2.99999 + 1.36909j[pu] * 100[MVA] = 299.999 + 136.909j[pu]$$

La Tabla 20 muestra el balance de potencia que se obtuvo en el caso 1 para el método de Newton Raphson.

TABLA DE BALANCE DE POTENCIA							
Nodo		Potencia neta		Potencia generada		Potencia demandada	
Inicio	Final	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]
1	3	100.042	$90.485j$	100.042	$90.485j$	0	0
1	2	-400.042	$-199.947j$	-0.042	$0.053j$	400	200
2	3	299.999	$136.909j$	299.999	$136.909j$	0	0

Tabla 20: Balance de potencia para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

5.1.11. *Solución por el método de Newton Raphson con una variante en su algoritmo*

Para la solución del problema del flujo de carga con el método de Newton Raphson, se puede encontrar una modificación en la construcción de la matriz Jacobiana. Este cambio es dado por la ecuación (109) para el caso 1.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & |V_2| * \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & |V_2| * \frac{\partial P_3}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & |V_2| * \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \tag{109}$$

Se le añadirá un multiplicador de la magnitud de la tensión a los elementos N y L de la matriz Jacobiana. Cuando se calcule los elementos fuera de la diagonal, la simetría obtenida se verá reflejeada al momento de encontrar los elementos de la parte H y J de la matriz y se representa por las ecuaciónes (110) y (111).

$$|V_j| \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \tag{110}$$

$$|V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \tag{111}$$

La simetria obtenida, también es observable para los elementos de la diagonal en la parte N y J de la matriz Jacobiana. Para N es dado por las ecuaciones (112) y (113).

$$|V_j|\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + |V_i|^2 * G_{ii} \tag{112}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - |V_i|^2 * G_{ii} \tag{113}$$

Para J es dado por las ecuaciones (114) y (115).

$$|V_j|\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - |V_i|^2 * G_{ii} \tag{114}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 * G_{ii} \tag{115}$$

Una vez planteados los modelos matemáticos de este algoritmo para Newton Raphson, se realizará una iteración con fines demostrativos aplicados al Caso 1.

5.1.12. *Iteración 1 método Newton Raphson con variante en su algoritmo*

Se da inicio al desarrollo del problema calculando las potencias del sistema mediante las ecuaciones de potencia calculada (116), (117),(118) y (119).

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(0)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{116}$$

$$P_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1|^2 * |80| * cos(-90) + |1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{2cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(0)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{117}$$

$$P_{3cal}^{(0)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 0 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(0)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{118}$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1|^2 * |80| * sen(-90) - |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = -2.1999[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 3:

$$Q_{3cal}^{(0)} = -|V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * sen(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) - |V_3|^2 * |Y_{33}| * sen(\theta_{33}) - |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * sen(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (119)$$

$$Q_{3cal}^{(0)} = -|1.03| * |1.025| * |20| * sen(90 - 0 + 0) - |1.03|^2 * |60| * sen(-90) - |1.03| * |1| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$Q_{3cal}^{(0)} = 1.3389[pu]$$

Para la construcción de la matriz Jacobiana, se toma la ecuación (120) y se procede a calcular cada uno de sus elementos internos.

$$J = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{22} \\ H_{32} & H_{33} & N_{23} \\ J_{22} & J_{23} & L_{22} \end{bmatrix} \quad (120)$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente a los elementos fuera de la diaognal para N_{22} de la matriz jacobiana dada por (121).

$$|V_2| * \frac{\partial P_2}{\partial V_2} = |V_2| \left[|V_1| * |Y_{21}| * cos(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + 2 * |V_2| * |Y_{22}| * cos(\theta_{22}) + |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)\right] \quad (121)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = |1| \left[|1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1| * |80| * cos(-90) + |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)\right]$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = 0$$

Para encontrar los elementos fuera de la diagonal para J_{22} se aplicará la ecuación (122).

$$|V_2| * \frac{\partial P_2}{\partial V_2} = -\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \quad (122)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = 0$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente a los elementos fuera de la diaognal para N_{23} de la matriz jacobiana dada por (123).

$$|V_2| * \frac{\partial P_3}{\partial V_2} = |V_2| \left[|V_3| * |V_2| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2)\right] \quad (123)$$

$$|V_2| * \frac{\partial P_3}{\partial V_2} = |1| \left[|1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)\right]$$

$$|V_2| * \frac{\partial P_3}{\partial V_2} = 0$$

Para encontrar los elementos fuera de la diagonal para J_{23} se aplicará la ecuación (124).

$$|V_2| * \frac{\partial P_3}{\partial V_2} = -\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} \tag{124}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = 0$$

Se calculan los elementos de la diagonal para L_{22} de la matriz jacobiana, con la ecuación (125).

$$|V_2| * \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = Q_2 - |V_2|^2 * B_{22} \tag{125}$$
$$|V_2| * \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -2.1999 - |1|^2 * -80$$

$$|V_2| * \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = 77.8001$$

Análogamente se calculan los elementos de la diagonal para H_{22} se aplicará la ecuación (126).

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = -Q_2 - |V_2|^2 * B_{22} \tag{126}$$
$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = -2.1999 - |1|^2 * -80$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 82.1999$$

Se realiza el cálculo para el elemento de la diagonal H_{33} de la matriz jacobiana dado por la ecuación (127)

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = -Q_3 - |V_3|^2 * B_{33} \tag{127}$$
$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = -1.3389 - |1.03|^2 * -60$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 62.3150$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{23}, que será equivalente a H_{32} de la matriz jacobiana y es dada por la ecuación (128).

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{128}$$
$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -41.19999$$

Se evidencia que el cálculo de la matriz Jacobiana se vuelve mas eficiente al llevar menos operaciones para encontrar sus elementos. Con la variante del algoritmo en Newton Raphson, la matriz Jacobiana queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.19999 & -41.19999 & 0 \\ -41.1999 & 62.31499 & 0 \\ 0 & 0 & 77.79999 \end{bmatrix}$$

Ya que se llega al mismo equivalente del Jacobiano con el método largo de Newton Raphson que se empleó en un principio. Se puede concluir que al completar el resto de opraciones faltantes para terminar la iteración 1, la respuestas para las incognitas de tensión y águlo serán iguales.

5.1.13. *Solución por el método de Newton Raphson utilizando Fluxtool*

Una vez se ingresan los datos del problema en el software, los resultados finales de las tensiones y balance de potencias en los nodos por medio del método de Newton Raphson, se observan en la Figura 14.

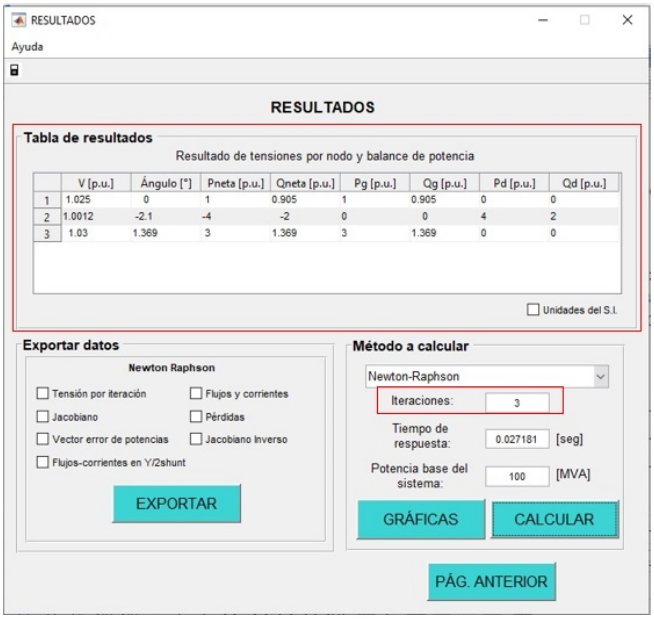


Figura 14: Resultados con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia un total de 3 iteraciones para solucionar el problema planteado, además de esto, se dará paso a exportar los resultados mas relevantes del caso 1, los cuales son las tensiones nodales, ángulos, flujos de carga y pérdidas en las líneas. Para esto seleccionamos las casillas con dichos nombres y se procede a pulsar el botón **EXPORTAR** como se muestra en la Figura 15.

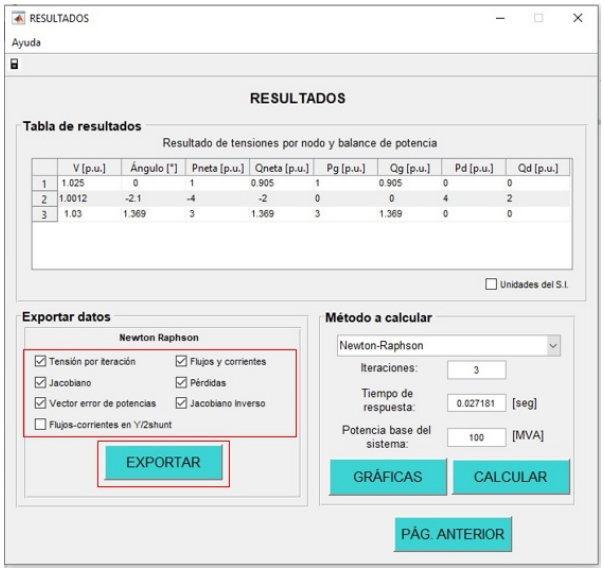


Figura 15: Exportar datos para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Figura 16, se muestran los valores de tensión y ángulo por cada iteración. Se puede observar que la primera columna muestra el número de la iteración, seguido de el número del nodos del sistema ordenado de menor a mayor junto con el resultado de su respectivo tensión y ángulo.

	A	B	C	D
1	N_ITERACION_ACOPLADO	NODOST_ACOPLADO	TENSION_ACOPLADO_PU	ANGULO_ACOPLADO_GRADOS
2	1	1	1,025	0
3	1	2	1,002570694	-2,102218009
4	1	3	1,03	1,368465965
5	2	1	1,025	0
6	2	2	1,001245252	-2,100029791
7	2	3	1,03	1,368505209
8	3	1	1,025	0
9	3	2	1,001243447	-2,100031324
10	3	3	1,03	1,368506455
11				

Hoja1 | Sheet2 | Sheet3 | Tensión y ángulos | Jacobiano | Jacobiano inverso | Vecto

Figura 16: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 21 muestra la comparación y error de los resultados de tensión y ángulo mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 1 para el método de Newton Raphson, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES, ÁNGULOS Y ERROR

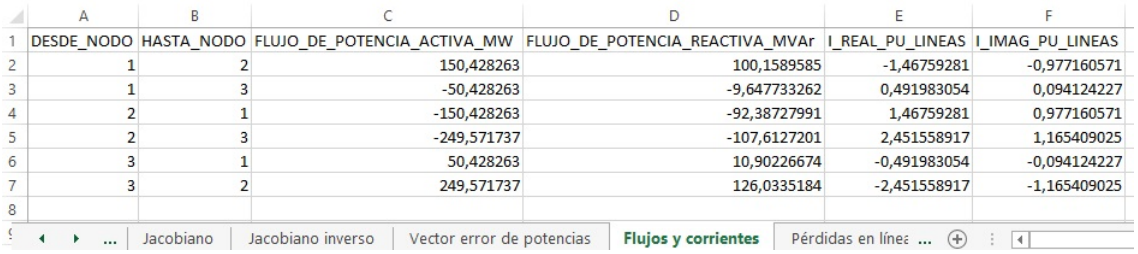
		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Iteraciones	Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión	Ángulo
1	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00257	−2.10218	1.00257	−2.10221	0	−0.00142
	3	1.03	1.368221	1.03	1.36846	0	−0.01746
2	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00125	−2.10046	1.00124	−2.10002	0, 00099	0.02094
	3	1.03	1.36822	1.03	1.36850	0	−0.02046

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES, ÁNGULOS Y ERROR							
3	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00125	−2.10046	1.00124	−2.10003	0, 00099	0.02047
	3	1.03	1.3682	1.03	1.36850	0	−0.02192

Tabla 21: Comparativo de tensiones y ángulos entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 muestra los nodos en los que conecta cada línea, seguido de los valores del flujo de carga y corriente para cada una de estos elementos.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	150,428263	100,1589585	-1,46759281	-0,977160571
3	1	3	-50,428263	-9,647733262	0,491983054	0,094124227
4	2	1	-150,428263	-92,38727991	1,46759281	0,977160571
5	2	3	-249,571737	-107,6127201	2,451558917	1,165409025
6	3	1	50,428263	10,90226674	-0,491983054	-0,094124227
7	3	2	249,571737	126,0335184	-2,451558917	-1,165409025
8						

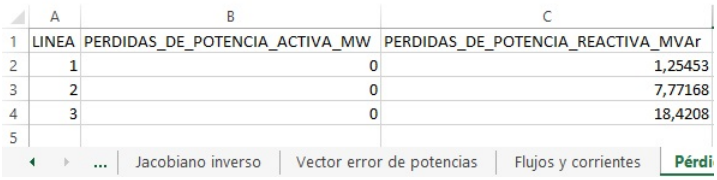
Figura 17: Resultados del flujo de carga con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1.

La Tabla 22 muestra la comparación y error de los resultados del flujo de carga en las líneas mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool en el caso 1 para el método de Newton Raphson, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y ERROR							
Conexión nodo		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	3	−50.416	−9.648	−50.428	−9.647	−0.02380	0.01036
3	1	50.416	10.901	50.428	10.902	−0.02380	−0.00917
1	2	150.459	100.133	150.428	100.158	0.02060	−0.02496
2	1	−150.459	−92.360	−150.428	−92.387	0.02060	−0.02923
2	3	−249.582	−107.586	−249.571	−107.612	0.00440	−0.02416
3	2	249.582	126.007	249.571	126.033	0.00440	−0.02063

Tabla 22: Comparativo del flujo de carga entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 muestra el número de líneas, seguido de los valores de pérdidas de potencia.



	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0	1,25453
3	2	0	7,77168
4	3	0	18,4208
5			

Figura 18: Resultados de pérdidas de potencia con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 23 muestra la comparación y error de los resultados de pérdidas de potencia en las líneas, mediante la solución teórica y la solución dada por el software Fluxtool en el caso 1 para el método de Newton Raphson, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ERROR						
	Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Línea	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	0	1.253	0	1.254	0	−0.07980
2	0	7.77	0	7.77	0	0
3	0	18.420	0	18.420	0	0

Tabla 23: Comparativo de pérdidas de potencia entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puedo evidenciar, el software calcula y muestra el resultado de las diferentes variables que se tomaron para evaluar el error por cada iteración. Comparando con la solución teórica y la solución dada por Fluxtool para el caso 1, se tuvo un error menor al 1 %, esto demuestra la veracidad del algoritmo programado para el método de Newton Raphson.

5.1.14. *Solución teórica por el método de Newton Raphson Desacoplado*

Para el desarrollo del ejercicio en estudio por el método de Newton Raphson Desacoplado, se seguirá un listado de pasos los cuales tienen semejanza con el método de Newton Raphson, se recuerda que este método es una variacíón del Newton Raphson, con fines de hacer más rápido el cálculo de la solución final. La lista de pasos a realizar es:

• Obtener la matriz de admitancias o Ybus.

• Definir las condiciones iniciales. Para los nodos PQ ya se conoce la potencia demandada; la tensión y ángulo tendrán valores de $1[p.u.]$ y $0°$ respectivamente. Para nodos PV ya se conocen los valores de tensión y potencia generada; el valor del ángulo será de $0°$.

• Se procede a calcular las ecuaciones de potencias activa y reactiva correspondientes a los nodos PQ y PV, con los modelos matemáticos mostrados en las ecuaciones (129), (130) y (131) respectivamente.

• Se da paso a la construcción de la matriz Jacobiana propia del método, la cual, iguala a cero los componentes N y J, dando lugar a lo mostrado en la ecuación (132).

• Se calcula el vector de deltas de potencia que se muestra en la ecuación (138). Los valores por cada iteración de este vector, irán mostrando la convergencia del error de tolerancia establecido incialmente, cuyo valor para el ejercicio es de 0.001.

•Se usa la ecuación (139) , que está compuesta por la matriz Jacobiana inversa, multiplicada por el vector de deltas de potencias mencionado en el paso anterior, para hallar los deltas de correcciones de ángulos y tensiones.

•Finalmente se suman las correciónes de tensión y ángulo a los valores de condiciones iniciales de dichas variables como en la ecuación (140), para obtener el valor final de la iteración.

5.1.15. *Iteración 1 método Newton Raphson Desacoplado*

A continuación en la tabla 24 se plantean los datos de condiciones iniciales para cada nodo y las líneas del sistema.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.025\angle 0°$	-	-	-
2	PQ	$1.0\angle 0°$	-	4	2
3	PV	$1.03\angle 0°$	3	-	-

Tabla 24: Condiciones inicales - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se empieza el desarrollo del problema calculando las potencias del sistema mediante las ecuaciones de potencia calculada (129), (130), (131).

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(0)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (129)$$

$$P_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1|^2 * |80| * cos(-90) + |1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{2cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(0)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (130)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 0 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(0)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (131)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1|^2 * |80| * sen(-90) - |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = -2.1999[pu]$$

Se procede a construir la matriz jacobiana para este ejercicio, teniendo en cuenta que para este método la relación entre la potencia activa y la tensión en los nodos da un valor muy pequeño al igual que la relación entre la potencia reactiva y el ángulo de la tensión. Por lo tanto el modelo de la matriz jacobiana para este caso es dado por (132).

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \quad (132)$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{22}de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (133)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) + |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 82.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{23}de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{134}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -41.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{32}de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * sen(a\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2) \tag{135}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|1.03| * |1| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -41.19999$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento H_{33}de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * sen(a\theta_{21} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * sen(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{136}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |1.03| * |1.025| * |20| * sen(90 - 0 + 0) + |1.03| * |1| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = 62.31499$$

Se realiza la derivada parcial correspondiente al elemento L_{22}de la matriz jacobiana:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -|V_1| * |Y_{21}| * sen(a\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - 2 * |V_2| * |Y_{22}| * sen(\theta_{22}) - |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{137}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1| * |80| * sen(-90) - |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = 77.79999$$

La matriz jacobiana para nuestra primera iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.19999 & -41.19999 & 0 \\ -41.1999 & 62.31499 & 0 \\ 0 & 0 & 77.79999 \end{bmatrix}$$

Ahora se necesita encontrar el valor del vector de deltas de potencia, para esto se realiza la resta entre la potencia específica, la cual es la potencia de las condiciones iniciales y la potencia calculada que ya se tenía previamente de (129), (130), y (131).

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(0)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(0)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{138}$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4-0 \\ 3-0 \\ -2+2.19999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \\ 3 \\ 0.19999 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superan aún el valor del error establecido, el cual fue de 0.001, esto indica que se debe hacer otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo, por lo tanto se toma la inversa de la matriz jacobiana y se multiplica con el vector de deltas de potencia, según la expresión (139).

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} \tag{139}$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01819 & 0.01202 & 0 \\ 0.01202 & 0.0240 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01285 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -4 \\ 3 \\ 0.19999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036692 \\ 0.023882 \\ 0.002570 \end{bmatrix}$$

Una vez encontrado el vector de deltas de tensión y ángulo, se le suma el valor de tensiones y ángulos de la iteración anterior. Para esta primera iteración se toman los valores de las condiciones iniciales del sistema y así se podrán encontrar los valores de las incognitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(0)} \\ \delta_3^{(0)} \\ |V_2^{(0)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} \tag{140}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.036692 \\ 0.023882 \\ 0.002570 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036692 \\ 0.023882 \\ 1.002570 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la primera iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.00257\angle - 2.10229[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36833[pu]$$

Para la expresión (138), en el vector de deltas de potencia no se logra alzcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.16. *Iteración 2 método Newton Raphson Desacoplado*

Solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(1)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (141)$$

$$P_{2cal}^{(1)} = |1.002570|*|1.025|*|40|*cos(90+2.10229+0)+|1.002570|^2*|80|*cos(-90)+|1.00257|*|1.03|*|40|*cos(90+2.10229+1.36833)$$

$$P_{2cal}^{(1)} = -4.008379[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(1)} = |V_3|*|V_1|*|Y_{31}|*cos(\theta_{31}-\delta_3+\delta_1)+|V_3|^2*|Y_{33}|*cos(\theta_{33}-\delta_2+\delta_1)+|V_3|*|V_2|*|Y_{32}|*cos(\theta_{32}-\delta_3+\delta_2) \quad (142)$$

$$P_{3cal}^{(1)} = |1.03|*|1.025|*|20|*cos(90-1.36833+0)+|1.03|^2*|60|*cos(-90)+|1.03|*|1.00257|*|40|*cos(90-1.36833-2.10229)$$

$$P_{3cal}^{(1)} = 3.004794[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(1)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (143)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = |1.00257|*|1.025|*|40|*sen(90+2.10229+0)-|1.00257|^2*|80|*sen(-90)-|1.00257|*|1.03|*|40|*sen(90+2.10229+1.36833)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = -1.896103[pu]$$

La matriz jacobiana para la segunda iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.30783 & -41.23012 & 0 \\ -41.23012 & 62.33910 & 0 \\ 0 & 0 & 78.31435 \end{bmatrix}$$

Vector de deltas de potencia para la segunda iteración es dado por (144).

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(1)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(1)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (144)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 4.008379 \\ 3 - 3.004794 \\ -2 + 1.896103 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.008379 \\ -0.004794 \\ -0.103897 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superar aún el valor del error establecido el cual fue de 0.001, lo cual indica que debe hacerce otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo para la iteración 2, por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(1)} \\ \triangle\delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} \tag{145}$$

$$\begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(1)} \\ \triangle\delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01816 & 0.01201 & 0 \\ 0.01201 & 0.02398 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01276 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.008379 \\ -0.004794 \\ -0.103897 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000094 \\ -0.000014 \\ -0.001326 \end{bmatrix}$$

Para esta segunda iteración se toman los valores de la primera iteración del ejemplo y así se podrán encontrar los valores de las incognitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(1)} \\ \triangle\delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} \tag{146}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036692 \\ 0.023882 \\ 1.002570 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.000094 \\ -0.000014 \\ -0.001326 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036598 \\ 0.023868 \\ 1.001244 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la segunda iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.001244\angle - 2.09691[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36753[pu]$$

Para la expresión (144), en el vector de deltas de potencia no se logra alzcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.17. *Iteración 3 método Newton Raphson Desacoplado*

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(2)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{147}$$

$$P_{2cal}^{(2)} = |1.00124| * |1.025| * |40| * cos(90 + 2.09691 + 0) + |1.00124|^2 * |80| * cos(-90) + |1.00124| * |1.03| * |40| * cos(90 + 2.09691 + 1.36753)$$

$$P_{2cal}^{(2)} = -3.994774[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(2)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (148)$$

$$P_{3cal}^{(2)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 1.36753 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1.00125| * |40| * cos(90 - 1.36753 - 2.09691)$$

$$P_{3cal}^{(2)} = 2.996744[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(2)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (149)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = |1.00125| * |1.025| * |40| * sen(90 + 2.09691 + 0) - |1.0013|^2 * |80| * sen(-90) - |1.00125| * |1.03| * |40| * sen(90 + 2.09691 + 1.36753)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = -2.000218[pu]$$

La matriz jacobiana para nuestra tercera iteración queda de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} 82.199381 & -41.175866 & 0 \\ -41.175864 & 62.28485 & 0 \\ 0 & 0 & 78.101787 \end{bmatrix}$$

Vector de deltas de potencia para la tercera iteración:

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(2)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(2)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (150)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 3.994774 \\ 3 - 2.996744 \\ -2 + 2.000218 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.005226 \\ 0.003256 \\ 0.000218 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superar aún el valor del error establecido el cual fue de 0.001, lo cual indica que debe hacerce otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo para la iteración 3 entonces:

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} \quad (151)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(2)} \\ \triangle\delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.018188 & 0.012024 & 0 \\ 0.012024 & 0.024004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.012803 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -0.005226 \\ 0.003256 \\ 0.000218 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000055 \\ 0.000015 \\ 0.000002 \end{bmatrix}$$

Para esta tercera iteración se toman los valores de la segunda iteración del ejemplo y así se podrán encontrar los valores de las incognitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(2)} \\ \triangle\delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} \tag{152}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036598 \\ 0.023868 \\ 1.001244 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.000055 \\ 0.000015 \\ 0.000002 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.036653 \\ 0.023883 \\ 1.001246 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la tercera iteración los resultados de tensión y ángulo en grados son:

$$V_2 = 1.001246\angle -2.10000^\circ[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36839^\circ[pu]$$

El proceso iterativo continúa hasta encontrar el valor de error deseado. La Tabla 25 muestra el resultado final de los valores de tensión, ángulo y vector de error de potencias por cada iteración, para el caso 1 por el método de Newton Raphson Desacoplado.

RESULTADO DE ITERACIONES					
Iteración	V_2	V_3	$\triangle P_2[pu]$	$\triangle P_3[pu]$	$\triangle Q_2[pu]$
1	$1.00257\angle -2.10229^\circ$	$1.03\angle 1.36833^\circ$	-4	3	0.19999
2	$1.001244\angle -2.09691^\circ$	$1.03\angle 1.36753^\circ$	0.008379	-0.004794	-0.103897
3	$1.001246\angle -2.10000^\circ$	$1.03\angle 1.36839^\circ$	-0.0052260	0.0032560	0.000218
4	$1.001243\angle -2.09989^\circ$	$1.03\angle 1.36822^\circ$	0.000014	-0.000008	-0.00026

Tabla 25: Resultados para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen los valores de tensión y ángulo en los nodos, se procede a calcular el flujo de carga y pérdidas de potencia presentes en las líneas.

Las corrientes para la línea uno se calculan con (153) y (154).

$$I_{lin13} = -(V_1 - V_3) * Y_{13} \tag{153}$$

$$I_{lin13} = -(1.025 + 0j - (1.02970 + 0.02459j)) * 20 = -0.49188 + 0.09412j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_3 - V_1) * Y_{31} \tag{154}$$

$$I_{lin31} = -(1.02970 + 0.02459j - (1.025 + 0j)) * 20 = 0.49188 - 0.09412j[pu]$$

Las corrientes para la línea dos se calculan con (155) y (156).

$$I_{lin12} = -(V_1 - V_2) * Y_{12} \tag{155}$$

$$I_{lin12} = -(1.025 + 0j - (1.00057 - 0.03668j)) * 40 = 1.46749 - 0.97717j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_2 - V_1) * Y_{21} \tag{156}$$

$$I_{lin21} = -(1.00057 - 0.03668j - (1.025 + 0j)) * 40 = -1.46749 + 0.97717j[pu]$$

Las corrientes para la línea tres se calculan con (157) y (158).

$$I_{lin23} = -(V_2 - V_3) * Y_{23} \tag{157}$$

$$I_{lin23} = -(1.00057 - 0.03668j - (1.02970 + 0.02459j) * 40 = -2.45125 + 1.16542j[pu]$$

$$I_{lin32} = -(V_3 - V_2) * Y_{32} \tag{158}$$

$$I_{lin32} = -(1.02970 + 0.02459j - 1.00057 - 0.03668j) * 40 = 2.45125 - 1.16542j[pu]$$

La Tabla 26 muestra las corrientes resultantes en el caso 1, empleando el método de Newton Raphson Desacoplado.

TABLA DE CORRIENTES		
Nodo		Corriente [p.u.]
Inicio	Final	
1	3	$-0.49188 + 0.09412j$
3	1	$0.49188 - 0.09412j$
1	2	$1.46749 - 0.97717j$
2	1	$-1.46749 + 0.97717j$
2	3	$-2.45125 + 1.16542j$
3	2	$2.45125 - 1.16542j$

Tabla 26: Corrientes para Newton Rapson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen las corrientes en cada línea, se calcula el flujo de carga para la línea uno con la ecuaciónes (159) y (160).

$$S_{lin13} = (V_1) * (I_{lin13})^* \tag{159}$$

$$S_{lin13} = 1.025 + 0j * -0.49188 - 0.09412j = -0.50417 - 0.09647j\lfloor[pu]$$

$$S_{lin13real} = -0.50417 - 0.09647j \lfloor [pu] * 100[MVA] = -50.417 - 9.647j \lfloor [MVA]$$

$$S_{lin31} = (V_3) * (I_{lin31})^* \tag{160}$$

$$S_{lin31} = 1.02970 + 0.02459j * 0.49188 + 0.09412j = 0.50417 + 0.10902j[pu]$$

$$S_{lin31real} = 0.50417 + 0.10902j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 50.417 + 10.902j \lfloor [MVA]$$

El flujo de carga para la línea dos se calcula a partir de (161) y (162):

$$S_{lin12} = (V_1) * (I_{lin12})^* \tag{161}$$

$$S_{lin12} = 1.025 + 0j * 1.46749 + 0.97717j = 1.50418 + 1.00160j[pu]$$

$$S_{lin12real} = 1.50418 + 1.00160j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 150.418 + 100.160j \lfloor [MVA]$$

$$S_{lin21} = (V_2) * (I_{lin21})^* \tag{162}$$

$$S_{lin21} = 1.00057 - 0.03668j * -1.46749 - 0.97717j = -1.50418 - 0.92389j[pu]$$

$$S_{lin21real} = -1.50418 - 0.92389j \lfloor [pu] * 100[MVA] = -150.418 - 92.389j \lfloor [MVA]$$

El flujo de carga para la línea tres se calcula a partir de (163) y (164):

$$S_{lin23} = (V_2) * (I_{lin23})^* \tag{163}$$

$$S_{lin23} = 1.00057 - 0.03668j * -2.45125 - 1.16542j = -2.49540 - 1.07616j[pu]$$

$$S_{lin23real} = -2.49540 - 1.07616j \lfloor [pu] * 100[MVA] = -249.540 - 107.616j \lfloor [MVA]$$

$$S_{lin32} = (V_3) * (I_{lin32})^* \tag{164}$$

$$S_{lin32} = 1.02970 + 0.02459j * 2.45125 + 1.16542j = 2.49540 + 1.26033j[pu]$$

$$S_{lin32real} = 2.49540 + 1.26033j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 249.540 + 126.033j \lfloor [MVA]$$

La Tabla 27 muestra el flujo de carga que se obtuvo en el caso 1, empleando el método de Newton Raphson Desacoplado.

TABLA DE FLUJO DE CARGA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	-50.417	$-9.647j$
3	1	50.417	$10.902j$
1	2	150.418	$100.160j$
2	1	-150.418	$-92.389j$
2	3	-249.540	$-107.616j$
3	2	249.540	$126.033j$

Tabla 27: Flujo de carga para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de potencia en las líneas son:

$$S_{p13} = S_{lin13} + S_{lin31},$$

$$S_{p12} = S_{lin12} + S_{lin21},$$

$$S_{p23} = S_{lin23} + S_{lin32},$$

$$S_{p13} = -0.50417 - 0.09647j + 0.50417 + 0.10902j = 0 + 0.01254j[pu]$$

$$S_{p13real} = 0 + 0.01254j[pu] * 100[MVA] = 0 + 1.254j\lfloor[pu]$$

$$S_{p12} = 1.50418 + 1.00160j - 1.50418 - 0.92389j = 0 + 0.07771j[pu]$$

$$S_{p12real} = 0 + 0.07771j[pu] * 100[MVA] = 0 + 7.771j\lfloor[pu]$$

$$S_{p23} = -2.49540 - 1.07616j + 2.49540 + 1.26033j = 0 + 0.18417j[pu]$$

$$S_{p23real} = 0 + 0.18417j[pu] * 100[MVA] = 0 + 18.417j\lfloor[pu]$$

La Tabla 28 muestra las pérdidas de potencia en las líneas que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado.

TABLA DE PÉRIDAS DE POTENCIA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	0	$1.254j$
1	2	0	$7.771j$
2	3	0	$18.417j$

Tabla 28: Pérdidas de potencia en las líneas para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza los cálculos de potencia inyectada en los nodos:

$$S_{nodo1} = S_{lin13} + S_{lin12},$$

$$S_{nodo2} = S_{lin21} + S_{lin23},$$

$$S_{nodo3} = S_{lin31} + S_{lin32},$$

$$S_{nodo1} = (-0.50417 - 0.09647j) + (1.50418 + 1.00160j) = 1.00000 + 0.90512j[pu]$$

$$S_{nodo1real} = 1.00000 + 0.90512j[pu] * 100[MVA] = 100.000 + 90.512j[pu]$$

$$S_{nodo2} = (-1.50418 - 0.92389j) + (-2.49540 - 1.07616j) = -3.99958 - 2.00005j[pu]$$

$$S_{nodo2real} = -3.99958 - 2.00005j[pu] * 100[MVA] = -399.958 - 200.005j[pu]$$

$$S_{nodo3} = (0.50417 + 0.10902j) + (2.49540 + 1.26033j) = 2.99958 + 1.36935j[pu]$$

$$S_{nodo3real} = 2.99958 + 1.36935j[pu] * 100[MVA] = 299.958 + 136.935j[pu]$$

La Tabla 29 muestra el balance de potencia que se obtuvo en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado.

TABLA DE BALANCE DE POTENCIA							
Nodo		Potencia neta		Potencia generada		Potencia demandada	
Inicio	Final	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]
1	3	100.000	$90.512j$	100.000	$90.512j$	0	0
1	2	-399.958	$-200.005j$	0.042	$-0.005j$	400	200
2	3	299.958	$136.935j$	299.958	$136.956j$	0	0

Tabla 29: Balance de potencia para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

5.1.18. *Solución por el método de Newton Raphson Desacoplado utilizando Fluxtool*

Una vez se ingresan los datos del problema en el software, los resultados finales de las tensiones y balance de potencias en los nodos por medio del método de Newton Raphson Desacoplado, se observan en la Figura 19.

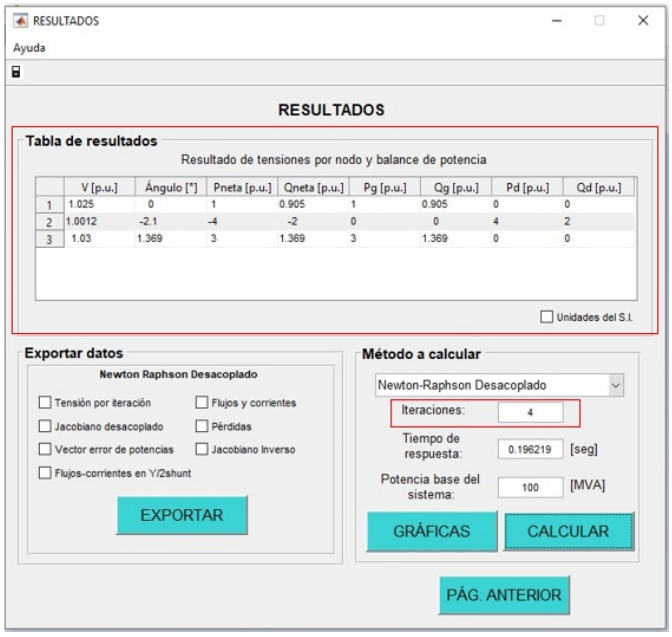


Figura 19: Resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia un total de 4 iteraciones para solucionar el problema planteado, además de esto, se dará paso a exportar los resultados mas relevantes del caso 1, los cuales son las tensiones nodales, ángulos y flujo de carga en las líneas. Para esto seleccionamos las casillas con dichos nombres y se procede a pulsar el botón **EXPORTAR** como se muestra en la Figura 20.

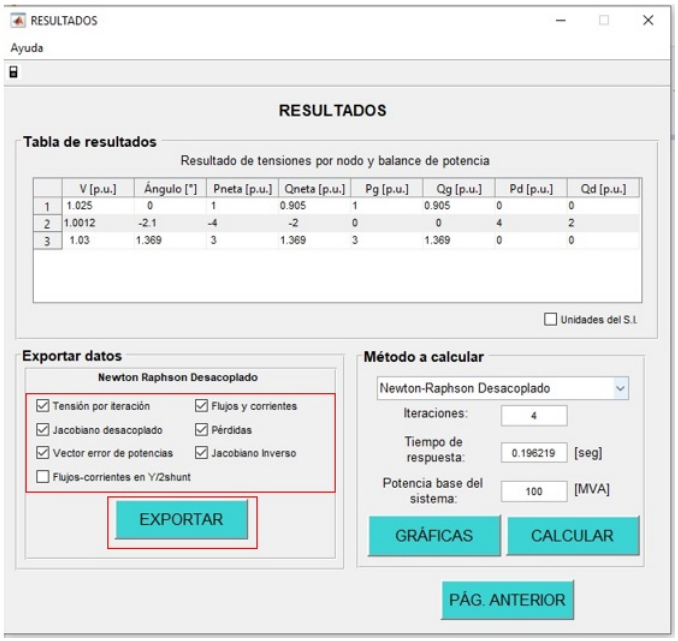
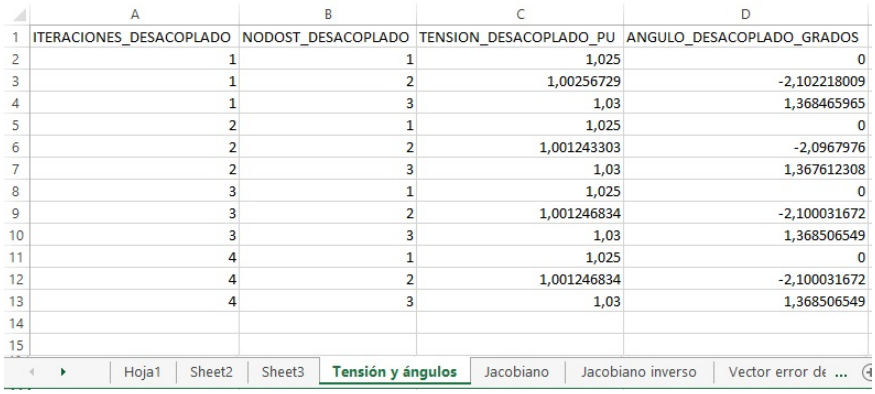


Figura 20: Exportar datos para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Figura 21 se muestran los valores de tensión y ángulo por cada iteración. Se puede observar que la primera columna muestra el número de la iteración, seguido de el número del nodos del sistema ordenado de menor a mayor junto con el resultado de su respectiva tensión y ángulo.



	A	B	C	D
1	ITERACIONES_DESACOPLADO	NODOST_DESACOPLADO	TENSION_DESACOPLADO_PU	ANGULO_DESACOPLADO_GRADOS
2	1	1	1,025	0
3	1	2	1,00256729	-2,102218009
4	1	3	1,03	1,368465965
5	2	1	1,025	0
6	2	2	1,001243303	-2,0967976
7	2	3	1,03	1,367612308
8	3	1	1,025	0
9	3	2	1,001246834	-2,100031672
10	3	3	1,03	1,368506549
11	4	1	1,025	0
12	4	2	1,001246834	-2,100031672
13	4	3	1,03	1,368506549
14				
15				

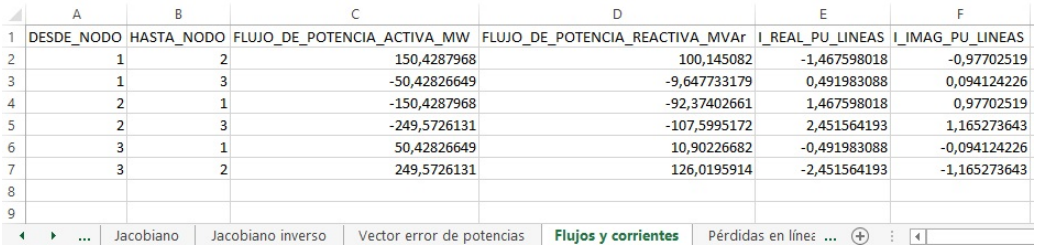
Figura 21: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 30 muestra la comparación y error de los resultados de tensión y ángulo mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado, donde se requiere que el error sea menor al 1 %

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES, ÁNGULOS Y ERROR							
		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Iteraciones	Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión	Ángulo
1	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00257	−2.10229	1.00256	−2.10221	0.0009	0.00380
	3	1.03	1.36833	1.03	1.36846	0	−0.00950
2	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001244	−2.09691	1.001243	−2.09679	0.0009	0.00572
	3	1.03	1.36753	1.03	1.36761	0	−0.00584
3	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001246	−2.10000	1.001246	−2.10003	0	−0.00142
	3	1.03	1.36839	1.03	1.36850	0	−0.00803
4	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001243	−2.09989	1.001247	−2.10003	−0.00039	−0.04906
	3	1.03	1.36822	1.03	1.36850	0	−0.02046

Tabla 30: Comparativo de tensiones y ángulos entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 22 muestra los nodos en los que conecta cada línea, seguido de los valores del flujo de carga y corriente para cada una de estos elementos.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	150,4287968	100,145082	-1,467598018	-0,97702519
3	1	3	-50,42826649	-9,647733179	0,491983088	0,094124226
4	2	1	-150,4287968	-92,37402661	1,467598018	0,97702519
5	2	3	-249,5726131	-107,5995172	2,451564193	1,165273643
6	3	1	50,42826649	10,90226682	-0,491983088	-0,094124226
7	3	2	249,5726131	126,0195914	-2,451564193	-1,165273643
8						
9						

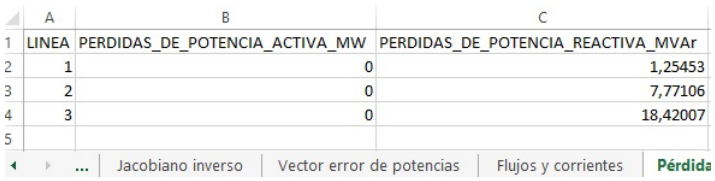
Figura 22: Resultados del flujo de carga con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 31 muestra la comparación y error de los resultados del flujo de carga en las líneas mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y ERROR							
Conexión nodo		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	3	−50.417	−9.647	−50.428	−9.647	−0.02181	0
3	1	50.417	10.902	50.428	10.902	−0.02181	0
1	2	150.418	100.160	150.428	100.145	−0.00664	0.01497
2	1	−150.418	−92.389	−150.428	−92.374	−0.00664	0.01623
2	3	−249.540	−107.616	−249.572	−107.599	−0.01282	0.01579
3	2	249.540	126.033	249.572	126.019	−0.01282	0.01110

Tabla 31: Comparativo del flujo de carga entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 23 muestra el número de líneas, seguido de los valores de pérdidas de potencia.



	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0	1,25453
3	2	0	7,77106
4	3	0	18,42007
5			

... | Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdida

Figura 23: Resultados de pérdidas de potencia con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 32 muestra la comparación y error de los resultados de pérdidas de potencia en las líneas, mediante la solución teórica y la solución dada por el software Fluxtool en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ERROR						
	Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Línea	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	0	1.254	0	1.254	0	0
2	0	7.771	0	7.771	0	0
3	0	18.417	0	18.420	0	−0.01628

Tabla 32: Comparativo de pérdidas de potencia entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puedo evidenciar, el software calcula y muestra el resultado de las diferentes variables que se tomaron para evaluar el error por cada iteración. Comparando con la solución teórica y la solución dada por Fluxtool para el caso 1, se tuvo un error menor al 1 %, esto demuestra la veracidad del algoritmo programado para el método de Newton Raphson Desacoplado.

5.1.19. *Solución teórica por el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido*

Tomando los mismos párametros iniciales del enunciado, se procede a dar solución al caso estudio por medio del método de Newton Raphson Desacoplado Rápido realizando los siguientes pasos:

• Obtener la matriz de admitancias o Ybus.

• Definir las condiciones iniciales. Para los nodos PQ ya se conoce la potencia demandada; la tensión y ángulo tendrán valores de $1[p.u.]$ y 0° respectivamente. Para nodos PV ya se conocen los valores de tensión y potencia generada; el valor del ángulo será de 0°.

• Se procede a calcular las ecuaciones de potencias activa y reactiva correspondientes a los nodos PQ y PV, con los modelos matemáticos mostrados en las ecuaciones (167), (168) y (169) respectivamente.

• Se da paso a la construcción de las matrices de susceptancias B' y B", sin tener en cuenta las potencias presentes en el nodo Slack, empleando el modelo matemático expresado en las ecuaciónes (165) y (166).

• Se calcula el vector de deltas de potencia que se muestra en la ecuación (170). Como se puede apreciar, en este método se tiene la condición adicional de dividir cada componente del vector por la magnitud de la tensión del nodo correspondiente.

•Se calculan las ecuaciónes (171) y (172), que están compuestas por las matrices de susceptancias inverzas, multiplicada por el vector de deltas mencionado en el paso anterior, para hallar los deltas de correcciones de ángulos y tensiones.

•Finalmente se suman las correciónes de tensión y ángulo a los valores de condiciones iniciales de dichas variables como en la ecuación (173), para obtener el valor final de la iteración.

5.1.20. *Iteración 1 método Newton Raphson Desacoplado Rápido*

En la Tabla 33, se plantean los datos de condiciones iniciales para cada nodo y las líneas del sistema.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.025\angle 0^{\circ}$	-	-	-
2	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	4	2
3	PV	$1.03\angle 0^{\circ}$	3	-	-

Tabla 33: Condiciones iniciales - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones (165) y (166), muestran las matrices de susceptancias B' y B" respectivamente para el caso 1 con el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

$$B' = \begin{bmatrix} B_{22} & B_{23} \\ B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \tag{165}$$

$$B'' = \begin{bmatrix} B_{22} \end{bmatrix} \tag{166}$$

Los valores númericos para dichas matrices quedan de la siguiente manera:

$$\text{B'}=\begin{bmatrix} -80 & 40 \\ 40 & -60 \end{bmatrix} \text{ y B"}=\begin{bmatrix} -80 \end{bmatrix}$$

Se empieza el desarrollo del problema calculando las potencias del sistema mediante las ecuaciones de potencia calculada (167), (168) y (169).

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(0)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{167}$$

$$P_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * cos(90 - 0 + 0) + |1|^2 * |80| * cos(-90) + |1| * |1.03| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{2cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(0)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (168)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 0 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1| * |40| * cos(90 - 0 + 0)$$

$$P_{3cal}^{(0)} = 0[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(0)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (169)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = |1| * |1.025| * |40| * sen(90 - 0 + 0) - |1|^2 * |80| * sen(-90) - |1| * |1.03| * |40| * sen(90 - 0 + 0)$$

$$Q_{2cal}^{(0)} = -2.1999[pu]$$

Ahora se necesita encontrar el valor del vector de deltas de potencia, para esto se realiza la resta entre la potencia específica, la cual es la potencia de las condiciones iniciales y la potencia calculada que ya se tenía previamente de (167), (168) y (169).

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(0)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(0)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (170)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(0)} \\ \triangle P_3^{(0)} \\ \triangle Q_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 - 0 \\ 3 - 0 \\ -2 + 2.19999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \\ 3 \\ 0.19999 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superar aún el valor del error establecido el cual fue de 0.001, lo cual indica que debe hacerce otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incognitas de tensión y ángulo, por lo tanto para los ángulos se usa la ecuación (171).

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{32} \\ -B_{23} & -B_{33} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle P_2^{(0)}}{|V_2|} \\ \frac{\triangle P_3^{(0)}}{|V_3|} \end{bmatrix} \quad (171)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(0)} \\ \triangle \delta_3^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01875 & 0.0125 \\ 0.0125 & 0.025 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -4 \\ 2.91258 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03859 \\ 0.02281 \end{bmatrix}$$

Ahora para la tensión se toma la ecuación (172).

$$\left[\ \triangle V_2^{(0)}\ \right] = \left[\ -B_{22}\ \right]^{-1} * \left[\ \frac{\triangle Q_2^{(0)}}{|V_2|}\ \right] \tag{172}$$

$$\left[\ \triangle V_2^{(0)}\ \right] = \left[\ 0.0125\ \right] * \left[\ 0.19999\ \right] = \left[\ 0.00249\ \right]$$

Una vez se encuentra el vector de deltas de tensión y ángulo, se suma con el valor de tensiones y ángulos de la iteración anterior. Para esta primera iteración se toman los valores de las condiciones iniciales del sistema y así se podrá encontrar los valores de las incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(0)} \\ \delta_3^{(0)} \\ |V_2^{(0)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(0)} \\ \triangle\delta_3^{(0)} \\ \triangle V_2^{(0)} \end{bmatrix} \tag{173}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.03859 \\ 0.02281 \\ 0.00249 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03859 \\ 0.02281 \\ 1.00249 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la primera iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.00249\angle - 2.21104°[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.30691°[pu]$$

Para la expresión (170), en el vector de deltas de potencia no se logra alzcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.21. *Iteración 2 método Newton Raphson Desacoplado Rápido*

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(1)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{174}$$

$$P_{2cal}^{(1)} = |1.00249| * |1.025| * |40| * cos(90 + 2.21104 + 0) + |1.002490|^2 * |80| * cos(-90) + |1.00249| * |1.03| * |40|...$$

$$*cos(90 + 2.21104 + 1.30691)$$

$$P_{2cal}^{(1)} = -4.12006[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(1)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \quad (175)$$

$$P_{3cal}^{(1)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 1.30691 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1.00249| * |40| ...$$

$$* cos(90 - 1.30691 - 2.21104)$$

$$P_{3cal}^{(1)} = 3.01601[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(1)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (176)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = |1.00249| * |1.025| * |40| * sen(90 + 2.21104 + 0) - |1.00249|^2 * |80| * sen(-90) - |1.00249| * |1.03| * |40| ...$$

$$* sen(90 + 2.21104 + 1.30691)$$

$$Q_{2cal}^{(1)} = -1.89735[pu]$$

Vector de deltas de potencia para la segunda iteración es dado por (177).

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(1)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(1)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (177)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(1)} \\ \triangle P_3^{(1)} \\ \triangle Q_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 4.12006 \\ 3 - 3.01601 \\ -2 + 1.89735 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12006 \\ -0.01601 \\ -0.10265 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superar aún el valor del error establecido el cual fue de 0.001, lo cual indica que debe hacerce otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incógnitas de tensión y ángulo, por lo tanto para los ángulos se usa la ecuación (178).

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(1)} \\ \triangle \delta_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{32} \\ -B_{23} & -B_{33} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle P_2^{(1)}}{|V_2|^{(1)}} \\ \frac{\triangle P_3^{(1)}}{|V_2|^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (178)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(1)} \\ \triangle \delta_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01875 & 0.0125 \\ 0.0125 & 0.025 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.11977 \\ -0.01555 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00205 \\ 0.00110 \end{bmatrix}$$

Ahora para la tensión se usa la ecuación (179).

$$\left[\ \triangle V_2^{(1)}\ \right] = \left[\ -B_{22}\ \right]^{-1} * \left[\ \frac{\triangle Q_2^{(1)}}{|V_2^{(1)}|}\ \right] \tag{179}$$

$$\left[\ \triangle V_2^{(1)}\ \right] = \left[\ 0.0125\ \right] * \left[\ -0.10239\ \right] = \left[\ -0.001279\ \right]$$

Para esta segunda iteración se toman los valores de la primera iteración del ejemplo y así se podrán encontrar los valores de las incognitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ \delta_3^{(1)} \\ |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(1)} \\ \triangle\delta_3^{(1)} \\ \triangle V_2^{(1)} \end{bmatrix} \tag{180}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03859 \\ 0.02281 \\ 1.00249 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.00205 \\ 0.00110 \\ -0.001279 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03654 \\ 0.02391 \\ 1.001211 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la segunda iteración los resultados de tensión y ángulo son:

$$V_2 = 1.001211\angle - 2.09358^\circ[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36994^\circ[pu]$$

Para la expresión (177), en el vector de deltas de potencia no se logra alzcanzar el error requerido, se procede a calcular una nueva iteración.

5.1.22. *Iteración 3 método Newton Raphson Desacoplado Rápido*

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 2:

$$P_{2cal}^{(2)} = |V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2 * |Y_{21}| * cos(\theta_{22}) + |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \tag{181}$$

$$P_{2cal}^{(2)} = |1.001211| * |1.025| * |40| * cos(90 + 0.03654 + 0) + |1.001211|^2 * |80| * cos(-90) + |1.001211| * |1.03| * |40| ...$$

$$*cos(90 + 2.09358 + 1.36994)$$

$$P_{2cal}^{(2)} = -3.99160[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia activa calculada en el nodo 3:

$$P_{3cal}^{(2)} = |V_3| * |V_1| * |Y_{31}| * cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3|^2 * |Y_{33}| * cos(\theta_{33} - \delta_2 + \delta_1) + |V_3| * |V_2| * |Y_{32}| * cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \tag{182}$$

$$P_{3cal}^{(2)} = |1.03| * |1.025| * |20| * cos(90 - 1.36994 + 0) + |1.03|^2 * |60| * cos(-90) + |1.03| * |1.001211| * |40|...$$
$$*cos(90 - 1.36994 - 2.09358)$$

$$P_{3cal}^{(2)} = 2.99688[pu]$$

Modelo matemático y solución de la potencia reactiva calculada en el nodo 2:

$$Q_{2cal}^{(2)} = -|V_2| * |V_1| * |Y_{21}| * sen(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2 * |Y_{21}| * sen(\theta_{22}) - |V_2| * |V_3| * |Y_{23}| * sen(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (183)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = |1.001211| * |1.025| * |40| * sen(90 + 2.09358 + 0) - |1.0013|^2 * |80| * sen(-90) - |1.001211| * |1.03| * |40|...$$
$$*sen(90 + 2.09358 + 1.36994)$$

$$Q_{2cal}^{(2)} = -2.0030[pu]$$

Vector de deltas de potencia para la tercera iteración:

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2esp} - P_{2cal}^{(2)} \\ P_{3esp} - P_{3cal}^{(2)} \\ Q_{2esp} - Q_{2cal}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (184)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle P_2^{(2)} \\ \triangle P_3^{(2)} \\ \triangle Q_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 + 3.99160 \\ 3 - 2.99688 \\ -2 + 2.0030 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00839 \\ 0.00311 \\ 0.0030 \end{bmatrix}$$

Como se puede observar, los valores de los residuos de potencia superar aún el valor del error establecido el cual fue de 0.001, lo cual indica que debe hacerce otra iteración.

Continuando con la solución del ejercicio se deben encontrar los valores de las incógnitas de tensión y ángulo, por lo tanto para los ángulos:

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{32} \\ -B_{23} & -B_{33} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle P_2^{(2)}}{|V_2|^{(2)}} \\ \frac{\triangle P_3^{(2)}}{|V_2|^{(2)}} \end{bmatrix} \quad (185)$$

$$\begin{bmatrix} \triangle \delta_2^{(2)} \\ \triangle \delta_3^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01875 & 0.0125 \\ 0.0125 & 0.025 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -0.00838 \\ 0.00302 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00011 \\ -0.00002 \end{bmatrix}$$

Ahora para la tensión:

$$\begin{bmatrix} \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{22} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{\triangle Q_2^{(2)}}{|V_2|^{(2)}} \end{bmatrix} \quad (186)$$

$$\left[\ \triangle V_2^{(2)}\ \right] = \left[\ 0.0125\ \right] * \left[\ 0.00299\ \right] = \left[\ 0.00003\ \right]$$

Para esta tercera iteración se toman los valores de la segunda iteración del ejemplo y así se podrán encontrar los valores de las incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(2)} \\ \delta_3^{(2)} \\ |V_2^{(2)}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \triangle\delta_2^{(2)} \\ \triangle\delta_3^{(2)} \\ \triangle V_2^{(2)} \end{bmatrix} \tag{187}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(3)} \\ \delta_3^{(3)} \\ |V_2^{(3)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03654 \\ 0.02391 \\ 1.001211 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.00011 \\ -0.00002 \\ 0.00003 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03665 \\ 0.02389 \\ 1.001241 \end{bmatrix}$$

Al finalizar la tercera iteración los resultados de tensión y ángulo en grados son:

$$V_2 = 1.001241\angle -2.09989°[pu]$$

$$V_3 = 1.03\angle 1.36879°[pu]$$

La Tabla 34 muestra el resultado final de las iteraciones calculadas para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

RESULTADO DE ITERACIONES					
Iteración	$V_2[pu]$	$V_3[pu]$	$\triangle P_2[pu]$	$\triangle P_3[pu]$	$\triangle Q_2[pu]$
1	$1.00249\angle -2.21104°$	$1.03\angle 1.30691°$	-4	3	0.19999
2	$1.001211\angle -2.09358°$	$1.03\angle 1.36994°$	0.12006	-0.01601	-0.10265
3	$1.001241\angle -2.09989°$	$1.03\angle 1.36879°$	-0.00839	-0.00311	0.00300
4	$1.001238\angle -2.09931°$	$1.03\angle 1.36879°$	-0.00005	-0.00024	-0.00018

Tabla 34: Resultados para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen los valores de tensión y ángulo en los nodos, se procede a calcular el flujo de carga y pérdidas de potencia presentes en las líneas.

Las corrientes para la línea uno se calculan con (188) y (189).

$$I_{lin13} = -(V_1 - V_3) * Y_{13} \tag{188}$$

$$I_{lin13} = -(1.025 + 0j - (1.02970 + 0.02460j) * 20 = -0.49208 + 0.09412j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_3 - V_1) * Y_{31} \tag{189}$$

$$I_{lin31} = -(1.02970 + 0.02460j - (1.025 + 0j)) * 20 = 0.49208 - 0.09412j[pu]$$

Las corrientes para la línea dos se calculan con (190) y (191).

$$I_{lin12} = -(V_1 - V_2) * Y_{12} \tag{190}$$

$$I_{lin12} = -(1.025 + 0j - (1.00056 - 0.03667j) * 40 = 1.46708 - 0.97735j[pu]$$

$$I_{lin31} = -(V_2 - V_1) * Y_{21} \tag{191}$$

$$I_{lin21} = -(1.00056 - 0.03667j - (1.025 + 0j)) * 40 = -1.46708 + 0.97735j[pu]$$

Las corrientes para la línea tres se calculan con (192) y (193).

$$I_{lin23} = -(V_2 - V_3) * Y_{23} \tag{192}$$

$$I_{lin23} = -(1.00056 - 0.03667j - (1.02970 + 0.02460j) * 40 = -2.45125 + 1.16560j[pu]$$

$$I_{lin32} = -(V_3 - V_2) * Y_{32} \tag{193}$$

$$I_{lin32} = -(1.02970 + 0.02460j - (1.00056 - 0.03667j)) * 40 = 2.45125 - 1.16560j[pu]$$

La Tabla 35 muestra las corrientes resultantes en el caso 1, empleando el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

TABLA DE CORRIENTES		
Nodo		Corriente [p.u.]
Inicio	Final	
1	3	$-0.49208 + 0.09412j$
3	1	$0.49208 - 0.09412j$
1	2	$1.46708 - 0.97735j[$
2	1	$-1.46708 + 0.97735j$
2	3	$-2.45125 + 1.16560j$
3	2	$2.45125 - 1.16560j$

Tabla 35: Corrientes para Newton Rapson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtienen las corrientes en cada línea, se calcula el flujo de carga para la línea uno con la ecuaciónes (194) y (195).

$$S_{lin13} = (V_1) * (I_{lin13})^* \tag{194}$$

$$S_{lin13} = 1.025 + 0j * -0.49208 - 0.09412j = -0.50438 - 0.09647j\lfloor[pu]$$

$$S_{lin13real} = -0.50438 - 0.09647j\lfloor[pu] * 100[MVA] = -50.438 - 9.647j\lfloor[MVA]$$

$$S_{lin31} = (V_3) * (I_{lin31})^* \tag{195}$$

$$S_{lin31} = 1.02970 + 0.02460j * 0.49208 + 0.09412j = 0.50438 + 0.10902j[pu]$$

$$S_{lin31real} = 0.50438 + 0.10902j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 50.438 + 10.902j \lfloor [MVA]$$

El flujo de carga para la línea dos se calcula a partir de (196) y (197):

$$S_{lin12} = (V_1) * (I_{lin12})^* \tag{196}$$

$$S_{lin12} = 1.025 + 0j * 1.46708 + 0.97735j = 1.50375 + 1.00179j[pu]$$

$$S_{lin12real} = 1.50375 + 1.00179j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 150.375 + 100.179j \lfloor [MVA]$$

$$S_{lin21} = (V_2) * (I_{lin21})^* \tag{197}$$

$$S_{lin21} = 1.00056 - 0.03667j * -1.46708 - 0.97735j = -1.50375 - 0.92410j[pu]$$

$$S_{lin21real} = -1.50375 - 0.92410j \lfloor [pu] * 100[MVA] = -150.375 - 92.410j \lfloor [MVA]$$

El flujo de carga para la línea tres se calcula a partir de (198) y (199):

$$S_{lin23} = (V_2) * (I_{lin23})^* \tag{198}$$

$$S_{lin23} = 1.00056 - 0.03667j * -2.45125 - 1.16560j = -2.49538 - 1.07635j[pu]$$

$$S_{lin23real} = -2.49538 - 1.07635j \lfloor [pu] * 100[MVA] = -249.538 - 107.635j \lfloor [MVA]$$

$$S_{lin32} = (V_3) * (I_{lin32})^* \tag{199}$$

$$S_{lin32} = 1.02970 + 0.02460j * 2.45125 + 1.16560j = 2.49538 + 1.26053j[pu]$$

$$S_{lin32real} = 2.49538 + 1.26053j \lfloor [pu] * 100[MVA] = 249.538 + 126.053j \lfloor [MVA]$$

La Tabla 36 muestra el flujo de carga que se obtuvo en el caso 1, empleando el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

TABLA DE FLUJO DE CARGA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	-50.438	$-9.647j$
3	1	50.438	$10.902j$
1	2	150.375	$100.179j$
2	1	-150.375	$-92.410j$
2	3	-249.540	$-107.616j$
3	2	249.538	$126.053j$

Tabla 36: Flujo de carga para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de potencia en las lineas son:

$$S_{p13} = S_{lin13} + S_{lin31},$$

$$S_{p12} = S_{lin12} + S_{lin21},$$

$$S_{p23} = S_{lin23} + S_{lin32},$$

$$S_{p13} = -0.50438 - 0.09647j + 0.50438 + 0.10902j = 0 + 0.012550j[pu]$$

$$S_{p13real} = 0 + 0.012550j[pu] * 100[MVA] = 0 + 1.2550j\lfloor[pu]$$

$$S_{p12} = 1.50375 + 1.00179j - 1.50375 - 0.92410j = 0 + 0.07768j[pu]$$

$$S_{p12real} = 0 + 0.07768j[pu] * 100[MVA] = 0 + 7.7768j\lfloor[pu]$$

$$S_{p23} = -2.49538 - 1.07635j + 2.49538 + 1.26053j = 0 + 0.18418j[pu]$$

$$S_{p23real} = 0 + 0.18418j[pu] * 100[MVA] = 0 + 18.418j\lfloor[pu]$$

La Tabla 37 muestra las pérdidas de potencia en las líneas que se obtuvieron en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

TABLA DE PÉRIDAS DE POTENCIA			
Nodo		Flujo de carga	
Inicio	Final	P.activa [MW]	P.reactiva [MVAr]
1	3	0	$1.2550j$
1	2	0	$7.7768j$
2	3	0	$18.418j$

Tabla 37: Pérdidas de potencia en las líneas para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza los cálculos de potencia inyectada en los nodos:

$$S_{nodo1} = S_{lin13} + S_{lin12},$$

$$S_{nodo2} = S_{lin21} + S_{lin23},$$

$$S_{nodo3} = S_{lin31} + S_{lin32},$$

$$S_{nodo1} = (-0.504387 - 0.09647j) + (1.50375 + 1.00179j) = 0.99937 + 0.90532j[pu]$$

$$S_{nodo2} = (-1.50375 - 0.92410j) + (-2.49538 - 1.07635j) = -3.99914 - 2.00046j[pu]$$

$$S_{nodo3} = (0.50438 + 0.10902j) + (2.49538 + 1.26053j) = 2.99977 + 1.36956j[pu]$$

La Tabla 38 muestra el balance de potencia que se obtuvo en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

TABLA DE BALANCE DE POTENCIA							
Nodo		Potencia neta		Potencia generada		Potencia demandada	
Inicio	Final	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]	P[MW]	Q[MVAr]
1	3	100.000	$90.512j$	100.000	$90.512j$	0	0
1	2	-399.958	$-200.005j$	0.042	$-0.005j$	400	200
2	3	299.958	$136.935j$	299.958	$136.956j$	0	0

Tabla 38: Balance de potencia para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

5.1.23. *Solución por el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido utilizando Fluxtool*

Una vez se ingresan los datos del problema en el software, los resultados finales de las tensiones y balance de potencias en los nodos por medio del método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, se observan en la Figura 24.

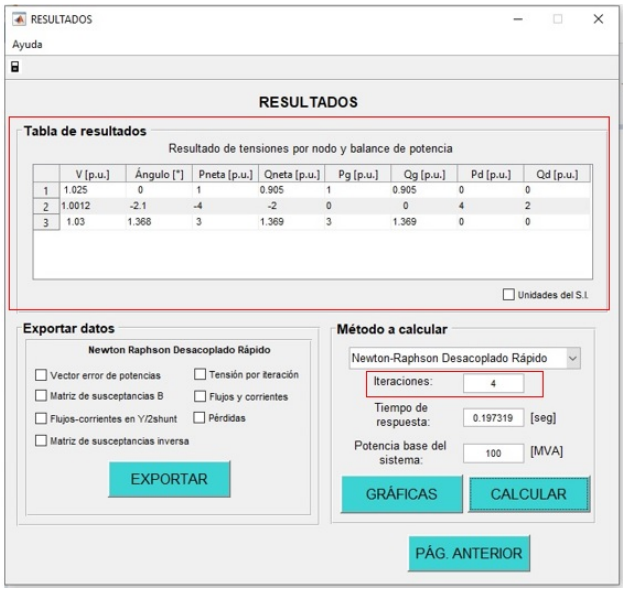


Figura 24: Resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia un total de 4 iteraciones para solucionar el problema planteado, además de esto, se dará paso a exportar los resultados mas relevantes del caso 1, los cuales son las tensiones nodales, ángulos, flujo de carga y pérdidas de potencia en las líneas. Para esto seleccionamos las casillas con dichos nombres y se procede a pulsar el botón **EXPORTAR** como se muestra en la Figura 25.

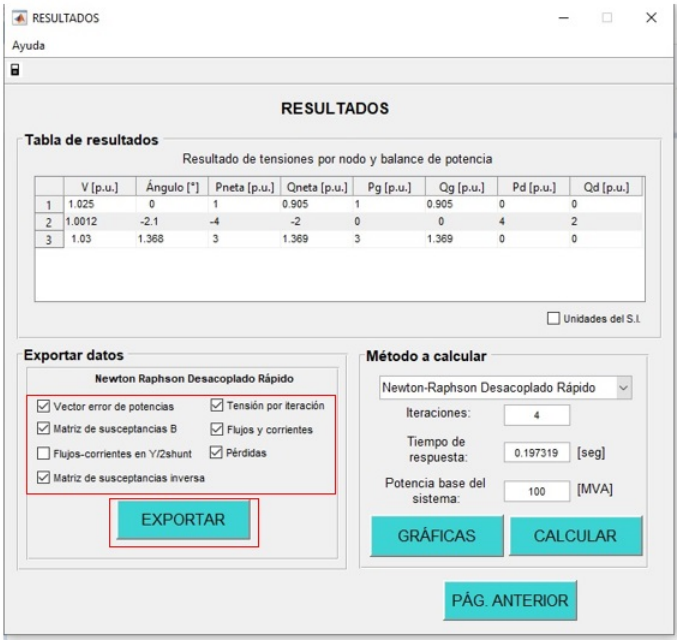


Figura 25: Exportar datos para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Figura 26 se muestran los valores de tensión y ángulo por cada iteración. Se puede observar que la primera columna muestra el número de la iteración, seguido de el número del nodos del sistema ordenado de menor a mayor junto con el resultado de su respectivo tensión y ángulo.

	A	B	C	D
1	ITERACIONES_DESRAPIDO	NODOST_DESRAPIDO	TENSION_DESRAPIDO_PU	ANGULO_DESRAPIDO_GRADOS
2	1	1	1,025	0
3	1	2	1,0025	-2,211172073
4	1	3	1,03	1,307233804
5	2	1	1,025	0
6	2	2	1,001210038	-2,093393061
7	2	3	1,03	1,370511855
8	3	1	1,025	0
9	3	2	1,001247304	-2,100349204
10	3	3	1,03	1,368353307
11	4	1	1,025	0
12	4	2	1,001247304	-2,100349204
13	4	3	1,03	1,368353307
14				

Hoja1 | Sheet2 | Sheet3 | **Tensión y ángulos** | Matriz de susceptancias | Matriz de susce

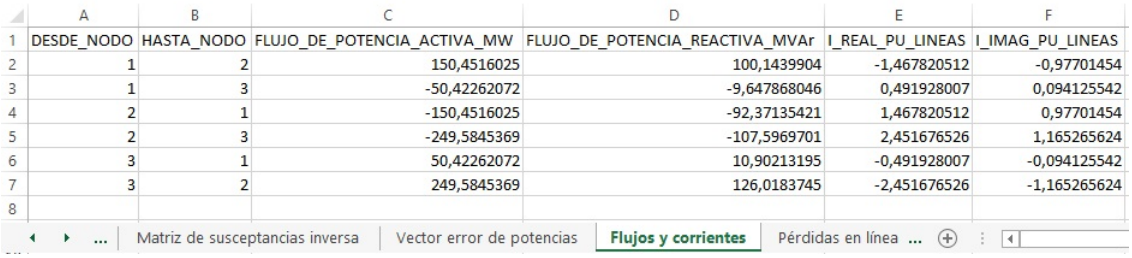
Figura 26: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 39 muestra la comparación y error de los resultados de tensión y ángulo mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES, ÁNGULOS Y ERROR							
		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Iteraciones	Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]	Tensión	Ángulo
1	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.00249	−2.21104	1, 0025	−2.21117	0.24838	−0.00587
	3	1.03	1.30691	1.03	1.30723	0	−0.02448
2	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001211	−2.093581	1.001241	−2.09339	−0.00299	0.00912
	3	1.03	1.36994	1.03	1.37051	0	−0.04160
3	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001241	−2.09989	1.001247	−2.10034	−0.00059	−0.02142
	3	1.03	1.36879	1.03	1.36835	0	0.03214
4	1	1.025	0	1.025	0	0	0
	2	1.001238	−2.09931	1.001247	−2.10034	−0.00089	−0.04906
	3	1.03	1.36879	1.03	1.36835	0	0.03214

Tabla 39: Comparativo de tensiones y ángulos entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 muestra los nodos en los que conecta cada línea, seguido de los valores del flujo de carga y corriente para cada una de estos elementos.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	150,4516025	100,1439904	-1,467820512	-0,97701454
3	1	3	-50,42262072	-9,647868046	0,491928007	0,094125542
4	2	1	-150,4516025	-92,37135421	1,467820512	0,97701454
5	2	3	-249,5845369	-107,5969701	2,451676526	1,165265624
6	3	1	50,42262072	10,90213195	-0,491928007	-0,094125542
7	3	2	249,5845369	126,0183745	-2,451676526	-1,165265624
8						

Figura 27: Resultados del flujo de carga con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 40 muestra la comparación y error de los resultados del flujo de carga en las líneas mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y ERROR							
Conexión nodo		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	3	−50.438	−9.647	−50.422	−9.647	0.03172	0
3	1	50.438	10.902	50.422	10.902	0.03172	0
1	2	150.375	100.179	150.451	100.143	−0.05054	0.03593
2	1	−150.375	−92.410	−150.451	−92.371	−0.05054	0.04220
2	3	−249.538	−107.635	−249.584	−107.596	−0.01843	0.03623
3	2	249.538	126.053	249.584	126.018	−0.01843	0.02776

Tabla 40: Comparativo del flujo de carga entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 muestra el número de líneas, seguido de los valores de pérdidas de potencia.



	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0	1,25426
3	2	0	7,77264
4	3	0	18,4214
5			

... | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | **Pérdidas en líneas**

Figura 28: Resultados de pérdidas de potencia con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 41 muestra la comparación y error de los resultados de pérdidas de potencia en las líneas, mediante la solución teórica y la solución dada por el software Fluxtool en el caso 1 para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, donde se requiere que el error sea menor al 1 %.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ERROR						
	Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Línea	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa	P.reactiva
1	0	1.2550	0	1.2542	0	0.06374
2	0	7.7768	0	7.7726	0	0.05400
3	0	18.418	0	18.421	0	−0.01628

Tabla 41: Comparativo de pérdidas de potencias entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como es evidente, el software calcula y muestra las diferentes tensiones y ángulos para cada iteración con un error menor al 1 % comparando con la solución teórica. Esto demuestra que el algoritmo programado funciona y sigue la base teórica del algoritmo original para el método de Newton Raphson Desacoplado rápido.

5.2. Caso 2

La Figura 29 muestra el diagrama de un sistema de potencia de 5 nodos con generación en los nodos 1 y 3. El voltaje en el nodo 1 es de $V_1 = 1.0\angle 0°[pu]$.El voltaje del nodo 3 es de $|V_3| = 1.05[pu]$, con una potencia activa generada de $50[MW]$ y una carga de $20[MW]$ y $20[Mvar]$. El nodo 5 tiene una carga $20[MW]$ y $20[Mvar]$. Las impedancias de las lineas y las impedancias de corto de los transformadores se dan en por unidad con una potencia base de $100MVA$ para todo el sistema.

Resolver el flujo de carga usando los métodos de Gauss-Seidel, Newton Raphson, Newton Raphson Desacoplado y Newton Raphson Desacoplado Rápido con un error de convergencia de 0.001.

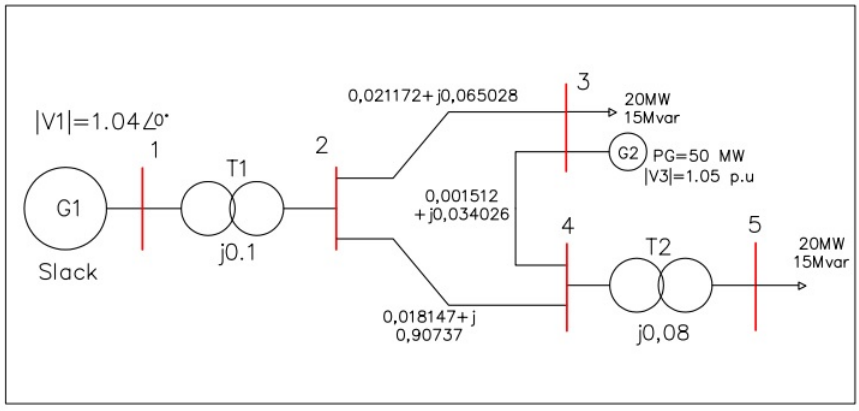


Figura 29: Diagrama para sistema de potencia de 5 nodos - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. *Recopilación de datos para el caso 2*

Se procede a calcular todas las potencias del sistema en por unidad, tomando como referencia una potencia base de $100[MVA]$.

$$S_{Generador2} = \frac{50 - 0j[MVA]}{100[MVA]} = 0.5[pu]$$

$$S_{carga1} = \frac{20 + 15j[MVA]}{100[MVA]} = 0.2 + 0.15j[pu]$$

$$S_{carga2} = \frac{20 + 15j[MVA]}{100[MVA]} = 0.2 + 0.15j[pu]$$

Teniendo las potencias del sistema en por unidad, se plantean los datos de condiciones iniciales para cada nodo, los cuales son planteados en la Tabla 42.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
2	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
3	PV	$1.05\angle 0^{\circ}$	0.5	0.2	0.15
4	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
5	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	0.2	0.15

Tabla 42: Condiciones iniciales - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 43 muestra los datos de las líneas del sistema.

Líneas	Impedancia de la línea [pu]	Longitud [km]
2-3	$0.021172 + 0.065028j$	20
2-4	$0.018147 + 0.090737j$	30
3-4	$0.001512 + 0.034026j$	10

Tabla 43: Datos básicos de las lineas - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 44 muestra los datos de los transformadores del sistema.

Transformadores	Impedancia de la línea [pu]
1-2	$0.1j$
4-5	$0.08j$

Tabla 44: Datos de transformadores - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se construye la matriz de admitancias o Ybus a partir de los datos de las líneas.

$$\text{Ybus}=\begin{bmatrix} -10j & 10j & 0 & 0 & 0 \\ 10j & 6.6463 - 34.5011j & -4.5269 + 13.9041j & -2.1194 + 10.5970j & 0 \\ 0 & -4.5269 + 13.9041j & 5.8303 - 43.2355j & -1.3034 + 29.3314j & 0 \\ 0 & -2.1194 + 10.5970j & -1.3034 + 29.3314j & 3.4227 - 52.4284j & 12.5j \\ 0 & 0 & 0 & 12.5j & -12.5j \end{bmatrix}$$

5.2.2. *Simulación del caso 2 en ETAP*

Es necesario tener un referente de los resultados del flujo de carga para el caso 2, ya que estos serviran como punto de comparación con los resultados que se obtengan del softare Fluxtool. Como es evidente, realizar el cálculo manual del flujo de carga para este caso resultaría un proceso extenuante, por lo tanto, se procede a realizar la simulación de este sistema de potencia en el software ETAP como lo muestra la Figura 30.

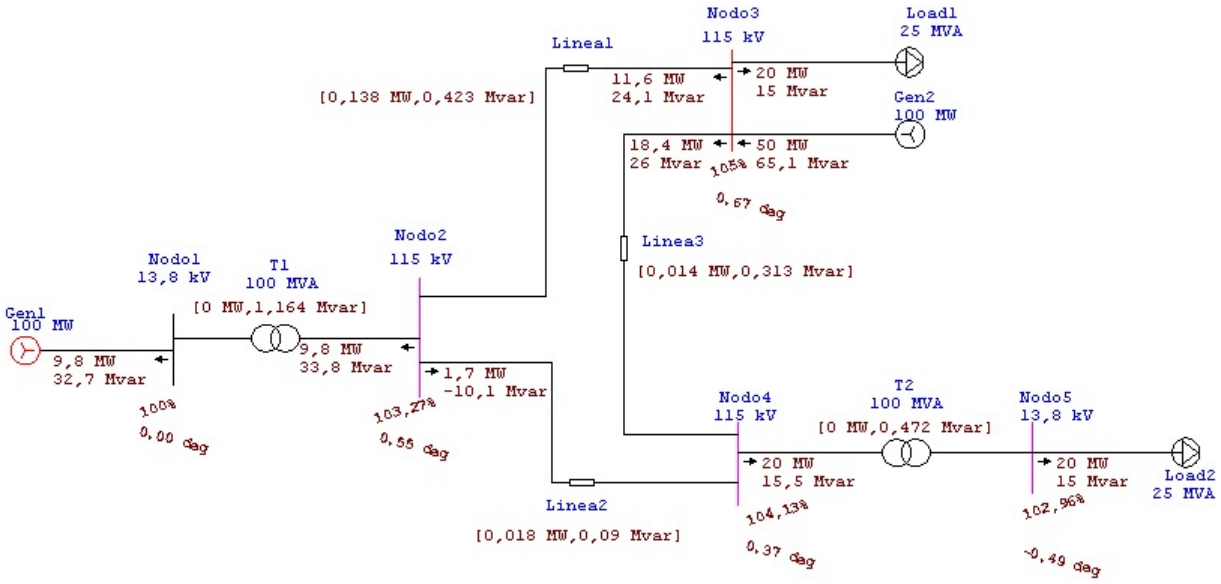


Figura 30: Flujo de carga simulado en el software ETAP - Caso 2. [15]

Los resultados de las tensiones, ángulos y potencias en cada nodo son mostrados en la Tabla 45.

RESULTADOS TENSIONES Y ÁNGULOS ETAP		
Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]
1	1	0
2	1.0327	0.55
3	1.05	0.67
4	1.0413	0.37
5	1.0296	−0.49

Tabla 45: Resultados de tensiones y ángulos con el software ETAP - Caso 2. [15]

Los resultados de los flujos de carga y pérdidas de potencia en los elementos del sistema son mostrados en la Tabla 46.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y PÉRDIDAS EN ETAP					
Nodo		Flujo de carga		Pérdidas de potencia	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
1	2	−9.830	−32.668	0	1.1638
2	1	9.830	33.832		
2	3	−11.483	−23.708	0.1378	0.4231
3	2	11.621	24.131		

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y PÉRDIDAS EN ETAP					
2	4	1.652	−10.124	0.0179	0.0895
4	2	−1.635	10.214		
3	4	18.379	25.998	0.0139	0.03129
4	3	−18.365	−25.686		
4	5	20.00	15.472	0	0.4717
5	4	−20.00	−15.00		

Tabla 46: Flujos de carga y pérdidas de potencia con el software ETAP- Caso 2. [15]

Una vez se tienen los valores de las tensiones incognitas, flujos de potencia y pérdidas de potencia de referencia, se introducen todos los datos del sistema de potencia en el software Fluxtool y se procede a obtener los resultados de dichas variables para todos los métodos de solución para el flujo de carga.

5.2.3. *Solución del caso 2 utilizando Fluxtool*

Se da inicio a calcular los valores para el método de Gauss-Seidel. La Figura 31 muestra los valores que se obtuvieron.

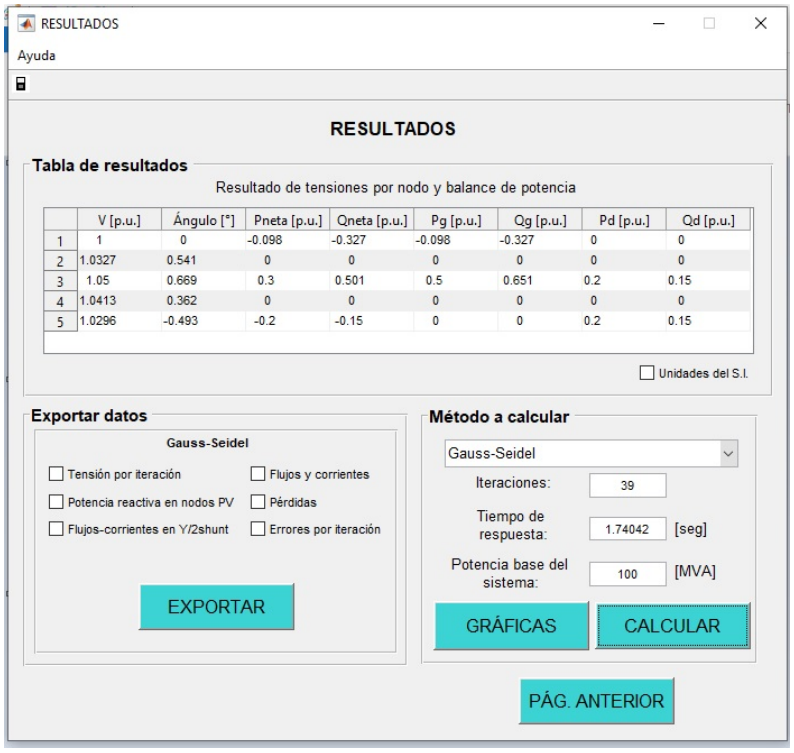


Figura 31: Tesiones y ángulos para Gauss-Seidel - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 32 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Gauss-Seidel.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	-9,752685996	-32,67506284	0,09752686	0,326750628
3	2	1	9,752685996	33,83783746	-0,09752686	-0,326750628
4	2	3	-11,45317096	-23,70776505	0,113065847	0,228508428
5	2	4	1,672095927	-10,12225328	-0,015264819	0,098163894
6	3	2	11,59078894	24,13044696	-0,113065847	-0,228508428
7	3	4	18,37376051	25,99661616	-0,17786881	-0,245525536
8	4	2	-1,654186354	10,21180312	0,015264819	-0,098163894
9	4	3	-18,35986219	-25,68384882	0,17786881	0,245525536
10	4	5	19,99983971	15,47191715	-0,192997174	-0,14736127
11	5	4	-19,99983971	-15,00021112	0,192997174	0,14736127
12						

Tensión y ángulos | Potencia reactiva en nodos PV | Vector de errores | Flujos y corrientes | Pér ...

Figura 32: Flujos de carga para Gauss-Seidel - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

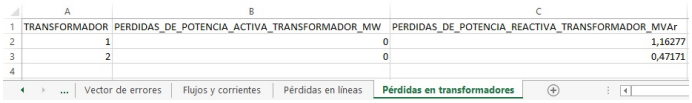
Las Figuras 33 y 34 muestran los resultados de pérdidas en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Gauss-Seidel.



	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,13762	0,42268
3	2	0,01791	0,08955
4	3	0,0139	0,31277
5			

Vector de errores | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | Pérdidas en trar

Figura 33: Pérdidas de potencia en líneas para Gauss-Seidel - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.



	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	1,16277
3	2	0	0,47171
4			

Vector de errores | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | Pérdidas en transformadores

Figura 34: Pérdidas de potencia en transformadores para Gauss-Seidel - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Se da inicio a calcular los valores para el método de Newton Raphson. La Figura 35 muestra los valores que se obtuvieron.

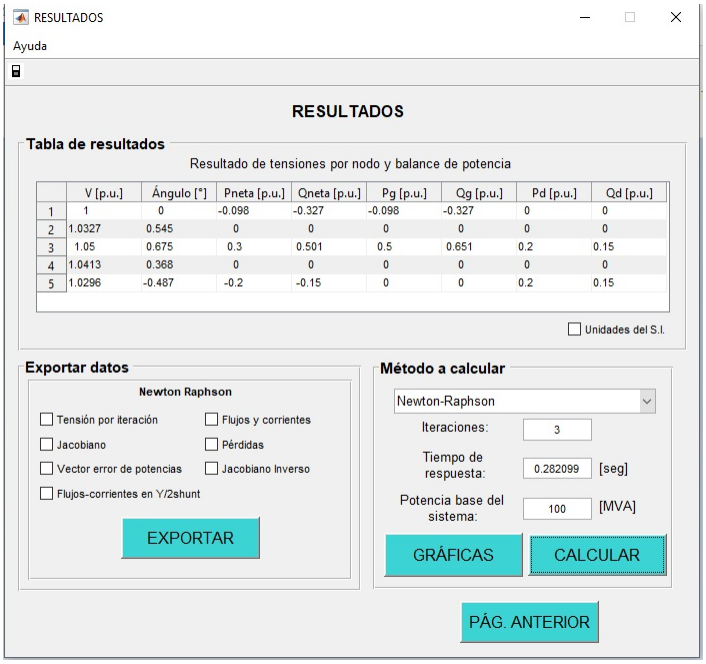


Figura 35: Tesiones y ángulos para Newton Raphson - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 36 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson.

DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
1	2	-9,830437944	-32,66820709	0,098304379	0,326682071
2	1	9,830437944	33,83205636	-0,098304379	-0,326682071
2	3	-11,48290264	-23,70757178	0,113371602	0,228496649
2	4	1,652464696	-10,12448457	-0,015067222	0,098185421
3	2	11,6206558	24,13066891	-0,113371602	-0,228496649
3	4	18,37934421	25,99858721	-0,177945095	-0,245527096
4	2	-1,634558329	10,21401838	0,015067222	-0,098185421
4	3	-18,36544167	-25,6857249	0,177945095	0,245527096
4	5	20,00000004	15,47170658	-0,193012317	-0,147341676
5	4	-20,00000004	-14,99999999	0,193012317	0,147341676

Jacobiano | Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas

Figura 36: Flujos de carga para Newton Raphson - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 37 y 38 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson.

LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
1	0,13775	0,4231
2	0,01791	0,08953
3	0,0139	0,31286

Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdi

Figura 37: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
1	0	1,16385
2	0	0,47171

Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | Pérdidas en transformadores

Figura 38: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Se da inicio a calcular los valores para el método de Newton Raphson Desacoplado. La Figura 39 muestra los valores que se obtuvieron.

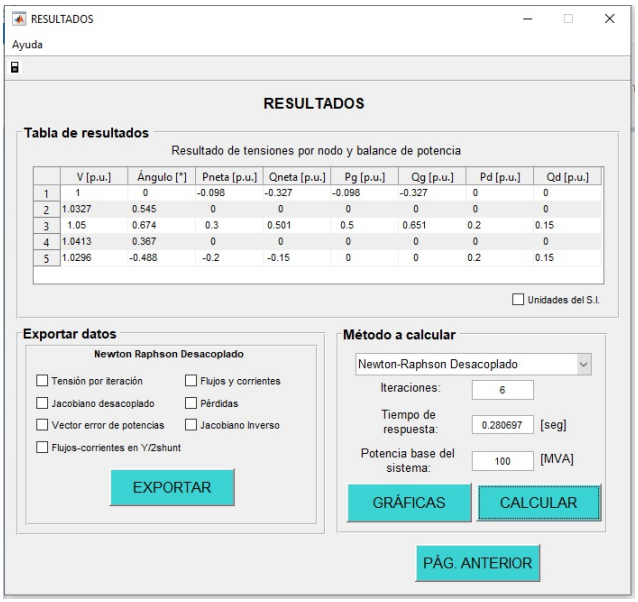


Figura 39: Tesiones y ángulos para Newton Raphson Desacoplado - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 40 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado.

DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
1	2	-9,830051251	-32,67092423	0,098300513	0,326709242
2	1	9,830051251	33,83494343	-0,098300513	-0,326709242
2	3	-11,46083469	-23,71057164	0,11315781	0,228527175
2	4	1,666646208	-10,12435622	-0,01520455	0,098185222
3	2	11,59851485	24,13344456	-0,11315781	-0,228527175
3	4	18,37326617	25,99844023	-0,177883703	-0,245528909
4	2	-1,648732368	10,21392739	0,01520455	-0,098185222
4	3	-18,3593668	-25,68564923	0,177883703	0,245528909
4	5	20,00050311	15,47172167	-0,193015308	-0,147344153
5	4	-20,00050311	-15	0,193015308	0,147344153

Figura 40: Flujos de carga para Newton Raphson Desacoplado - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 41 y 42 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado.

LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
1	0,13768	0,42287
2	0,01791	0,08957
3	0,0139	0,31279

Figura 41: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson Desacoplado - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
1	0	1,16402
2	0	0,47172

Figura 42: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson Desacoplado - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Se da inicio a calcular los valores para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido. La Figura 43 muestra los valores que se obtuvieron.

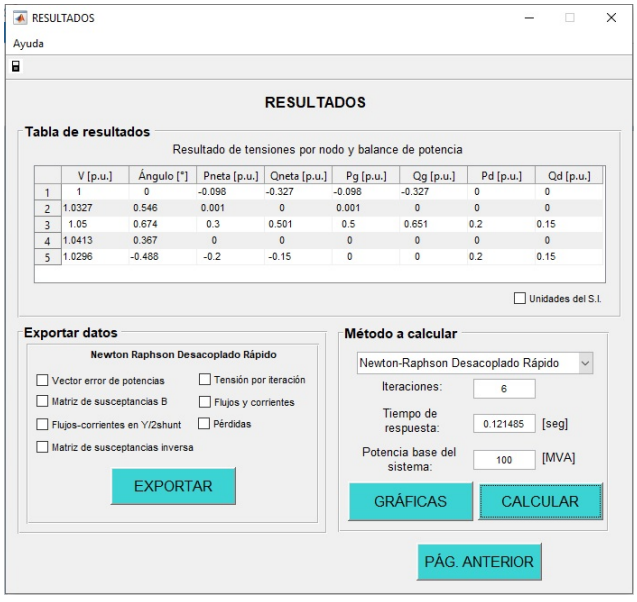
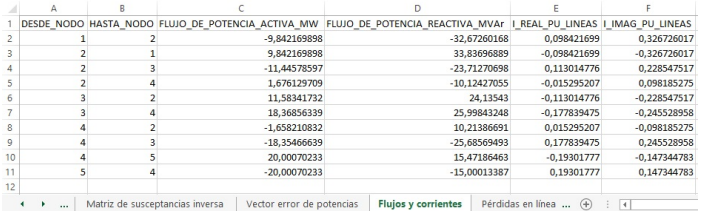


Figura 43: Tensiones y ángulos para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 44 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.



	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	2	-9,842169898	-32,67260168	0,098421699	0,326726017
3	2	1	9,842169898	33,83696889	-0,098421699	-0,326726017
4	2	3	-11,44578597	-23,71270698	0,113014776	0,228547517
5	2	4	1,676129709	-10,12427055	-0,015295207	0,098185275
6	3	2	11,58341732	24,13543	-0,113014776	-0,228547517
7	3	4	18,36856339	25,99843248	-0,177839475	-0,245528958
8	4	2	-1,658210832	10,21386691	0,015295207	-0,098185275
9	4	3	-18,35466639	-25,68569493	0,177839475	0,245528958
10	4	5	20,00070233	15,47186463	-0,19301777	-0,147344783
11	5	4	-20,00070233	-15,00013387	0,19301777	0,147344783
12						

... | Matriz de susceptancias inversa | Vector error de potencias | **Flujos y corrientes** | Pérdidas en línea ...

Figura 44: Flujos de carga para Newton Raphson Desacoplado Rápido- Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 45 y 46 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.



	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,13763	0,42272
3	2	0,01792	0,0896
4	3	0,0139	0,31274
5			

... | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | **Pérdidas en líneas** | Pérdid

Figura 45: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.



	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	1,16437
3	2	0	0,47173
4			

... | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | **Pérdidas en transformadores** | Flujos y corrientes en Yshui ...

Figura 46: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo los resultados para todos los métodos por medio del software Fluxtool, se realiza una comparación entre la simulacion y los valores calculados por Fluxtool para la tensiónes, ángulos, flujo de carga y pérdidas en los elementos.

La Tabla 47 muestra el resumen de los valores de tensíón y ángulo para todos los método que se obtuvieron por medio del programa Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES Y ÁNGULOS EN FLUXTOOL			
Método	Nodos	Resultados Fluxtool	
		Tensión [p.u.]	Ángulo [°]
Gauss-Seidel	1	1	0
	2	1.0327	0.541
	3	1.05	0.669
	4	1.0413	0.362
	5	1.0296	−0.493
N. Raphson	1	1	0
	2	1.0327	0.545
	3	1.05	0.675
	4	1.0413	0.368
	5	1.0296	−0.487

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES Y ÁNGULOS EN FLUXTOOL			
N. Raphson Des.	1	1	0
	2	1.0327	0.545
	3	1.05	0.674
	4	1.0413	0.367
	5	1.0296	−0.488
N. Raphson Des. Ráp.	1	1	0
	2	1.0327	0.546
	3	1.05	0.674
	4	1.0413	0.367
	5	1.0296	−0.488

Tabla 47: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool - Caso 2.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla 48 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool. Como se puede evidenciar, el resultado de error de los ángulos en los nodos 2 y 4 para el método de Gauss-Seidel, sobrepasa el 1 % establecido. Esto no corresponde a un error de alguno de los programas que se están comparando, si no al error estándar que maneja el software ETAP, el cual es de 0.000001 para el método de Gauss-Seidel [15], por tanto, este valor es mucho menor al establecido en el enunciado del caso 2. En otras palabras, el software referencia emplea más iteraciones para dar su respuesta y esto hace que se encuentre está diferencia de resultados representada en el valor de error calculado de la tabla. A diferencia de los otros métodos, en ningún caso el error de las tensiónes y ángulos en los nodos supera el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN TENSIONES Y ÁNGULOS			
Método	Nodos	Error %	
		Tensión	Ángulo
Gauss-Seidel	1	0	0
	2	0	1.6363
	3	0	0.149
	4	0	2.1621
	5	0	−0.6122
N. Raphson	1	0	0
	2	0	0.9090
	3	0	−0.7462
	4	0	0.5405
	5	0	0.6122
N. Raphson Des.	1	0	0
	2	0	0.9090
	3	0	−0.5970
	4	0	0.8108
	5	0	0.4081
N. Raphson Des. Ráp.	1	0	0
	2	0	0.7272
	3	0	−0.5970
	4	0	0.8108
	5	0	0.4081

Tabla 48: Error calculado para las tensiones y ángulos entre ETAP y Fluxtool - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 49 resume los valores de los flujos de carga para todos los métodos según lo calculado en Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA EN FLUXTOOL				
	Nodo		Resultados Fluxtool	
Método	Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
Gauss-Seidel	1	2	−9.752	−32.675
	2	1	9.752	33.838
	2	3	−11.453	−23.708
	3	2	11.591	24.130
	2	4	1.672	−10.122
	4	2	−1.654	10.212
	3	4	18.374	25.997
	4	3	−18.360	−25.684
	4	5	19.999	15.472
	5	4	−19.999	−15.000
N.Raphson	1	2	−9.830	−32.668
	2	1	9.830	33.832
	2	3	−11.483	−23.708
	3	2	11.621	24.131
	2	4	1.652	−10.124
	4	2	−1.635	10.214
	3	4	18.379	25.999
	4	3	−18.365	−25.686
	4	5	20.000	15.472
	5	4	−20.000	−14.999
N.Raphson Des.	1	2	−9.830	−32.671
	2	1	9.830	33.835
	2	3	−11.461	−23.710
	3	2	11.599	24.133
	2	4	1.667	−10.124
	4	2	−1.649	10.214
	3	4	18.373	25.998
	4	3	−18.359	−25.686
	4	5	20.000	15.472
	5	4	−20.000	−15
N. Raphson Des. Ráp.	1	2	−9.842	−32.673
	2	1	9.842	33.834
	2	3	−11.446	−23.713
	3	2	11.584	24.135
	2	4	1.676	−10.124
	4	2	−1.658	10.214
	3	4	18.369	25.998
	4	3	−18.355	−25.686
	4	5	20.000	15.472
	5	4	−20.000	−15

Tabla 49: Flujos de carga con Fluxtool - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 50 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool. Como se puede evidenciar, el resultado de error del flujo de carga en los nodos 2 y 4 para el método de Gauss-Seidel, sobrepasa el 1 % establecido. Esto no corresponde a un error de alguno de los programas que se están comparando, si no al error estándar que maneja el software ETAP, el cual es de 0.000001 para el método de Gauss-Seidel [15], por tanto, este valor es mucho menor al establecido

en el enunciado del caso 2. En otras palabras, el software referencia emplea más iteraciones para dar su respuesta y esto hace que se encuentre está diferencia de resultados representada en el valor de error calculado de la tabla. A diferencia de los otros métodos, en ningún caso el error del flujo de carga en los nodos supera el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN FLUJOS DE CARGA				
	Nodo		Error %	
Método	Inicio	Final	P.activa	P.reactiva
Gauss-Seidel	1	2	0.7935	−0.0214
	2	1	0.7935	−0.0177
	2	3	0.2613	0
	3	2	0.2582	0.0041
	2	4	−1.2107	0.0198
	4	2	−1.1621	0.0196
	3	4	0.0272	0.0038
	3	4	0.0272	0.0078
	4	5	0.0050	0
	5	4	0.0050	0
N. Raphson	1	2	0	0
	2	1	0	0
	2	3	0	0
	3	2	0	0
	2	4	0	0
	4	2	0	0
	3	4	0	−0.0038
	4	3	0	0
	4	5	0	0
	5	4	0	0.0067
N. Raphson Des.	1	2	0	−0.0092
	2	1	0	−0.0089
	2	3	0.1916	−0.0084
	3	2	0.1893	−0.0083
	2	4	−0.9080	0
	4	2	−0.8563	0
	3	4	0.0326	0
	4	3	0.0327	0
	4	5	0	0
	5	4	0, 0000	0
N. Raphson Des. Ráp.	1	2	−0.1221	−0.0153
	2	1	−0.1221	−0.0059
	2	3	0.3222	−0.0211
	3	2	0.3184	−0.0166
	2	4	−1.4528	0
	4	2	−1.4067	0
	3	4	0.0544	0
	4	3	0.0545	0
	4	5	0	0
	5	4	0	0

Tabla 50: Error calculado del flujo de carga entre ETAP y Fluxtool - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra la Tabla 51, que reune los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores calculados en Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN FLUXTOOL				
Método	Elemento		Resultado Fluxtool	
		No.	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
Gauss-Seidel	Línea	1	0.1376	0.4227
		2	0.0179	0.0895
		3	0.0139	0.3128
	Transformador	1	0	1.1628
		2	0	0.4717
N. Raphson	Línea	1	0.1377	0.4231
		2	0.0179	0.0895
		3	0.0139	0.3129
	Transformador	1	0	1.1638
		2	0	0.4717
N. Raphson Des.	Línea	1	0.1377	0.4229
		2	0.0179	0.0896
		3	0.0139	0.3128
	Transformador	1	0	1.1640
		2	0	0.4717
N. Raphson Des. Ráp.	Línea	1	0.1376	0.4227
		2	0.0179	0.0896
		3	0.0139	0.3127
	Transformador	1	0	1.1644
		2	0	0.4717

Tabla 51: Pérdidas de potencia en transformadores y líneas con Fluxtool - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 52 se aprecian los resultados entregados por el software ETAP para las de pérdidas de líneas y transformadores.

TABLA DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN ETAP			
		Resultado Neplan	
Elemento	No.	P.activa[MW	P.reactiva[MVAr]
Línea	1	0.1378	0.4231
	2	0.0179	0.0895
	3	0.0139	0.3129
Transformador	1	0	1.1638
	2	0	0.4717

Tabla 52: Pérdidas en transformadores y líneas con el software ETAP - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla 53 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN PÉRDIDAS DE POTENCIA				
			Error %	
Método	Elemento	No.	P.activa	P.reactiva
Gauss-Seidel	Línea	1	0.1451	0.0945
		2	0	0
		3	0	0.0320
	Transformador	1	0	0.0859
		2	0	0

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN PÉRDIDAS DE POTENCIA				
N. Raphson	Línea	1	0.0726	0
		2	0	0
		3	0	0
	Transformador	1	0	0
		2	0	0
N. Raphson Des.	Línea	1	0.0726	0.0473
		2	0	−0.1117
		3	0	0.0320
	Transformador	1	0	−0.0172
		2	0	0
N. Raphson Des. Ráp.	Línea	1	0.1451	0.0945
		2	0	−0.1117
		3	0	0.0639
	Transformador	1	0	−0.0516
		2	0	0

Tabla 53: Error calculado de pérdidas de potencia entre ETAP y Fluxtool - Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que en ningún caso el error en las pérdidas de potencia en los elémentos del sistema supera el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

5.3. Caso 3

La Figura 47 muestra el diagrama del sistema de potencia de 9 nodos tomado de la IEEE. Se tiene generadores en los nodos 1, 2 y 3. El voltaje en el nodo 1 es de $V_1 = 1.04\angle 0°[pu]$.El voltaje del nodo 2 es de $|V_2| = 1.025[pu]$, con una potencia activa generada de $163[MW]$. El voltaje del nodo 3 es de $|V_3| = 1.025[pu]$, con una potencia activa generada de $85[MW]$. El nodo 5 tiene una carga $125[MW]$ y $50[Mvar]$. El nodo 6 tiene una carga $90[MW]$ y $30[Mvar]$. El nodo 8 tiene una carga $100[MW]$ y $35[Mvar]$.Las impedancias de las lineas, las susceptancias de las líneas y las impedancias de corto de los transformadores se dan en por unidad con una potencia base de $100MVA$ para todo el sistema.

Resolver el flujo de carga usando los métodos de Gauss-Seidel, Newton Raphson, Newton Raphson Desacoplado y Newton Raphson Desacoplado Rápido con un error de convergencia de 0.001.

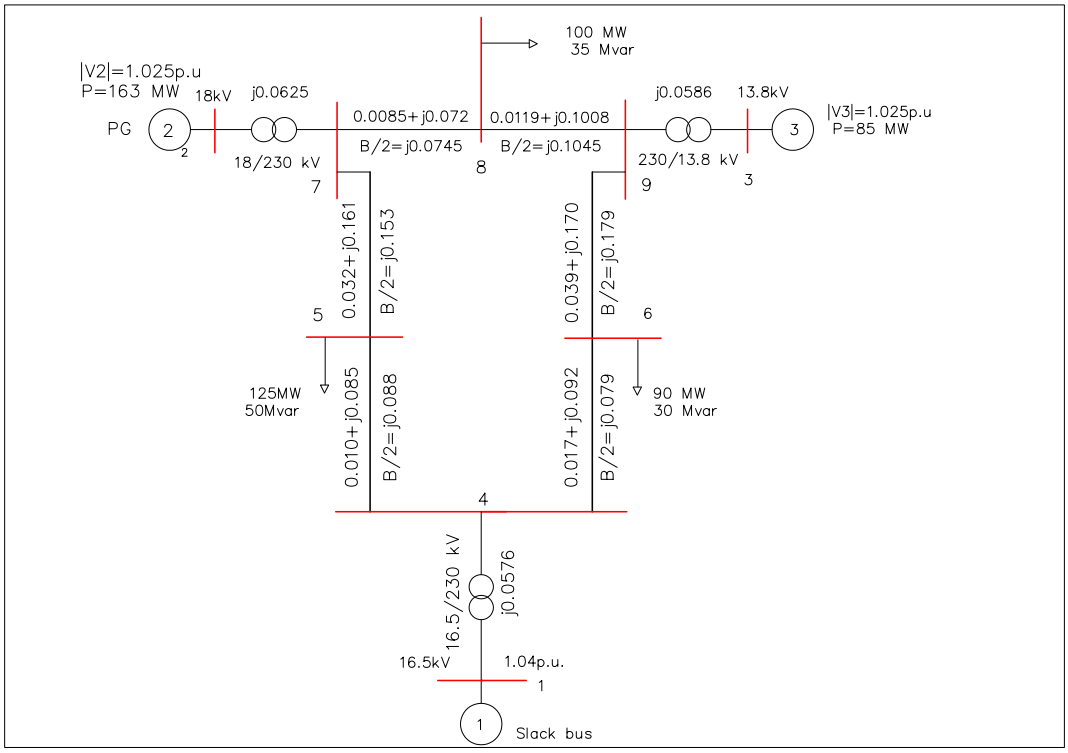


Figura 47: Sistema de potencia IEEE 9 nodos - Caso 3. [16]

5.3.1. *Recopilación de datos para el caso 3*

Se procede a calcular todas las potencias del sistema en por unidad, tomando como referencia una pontecia base de $100[MVA]$.

$$S_{Generador2} = \frac{163 - 0j[MVA]}{100[MVA]} = 1.63[pu]$$

$$S_{Generador3} = \frac{85 - 0j[MVA]}{100[MVA]} = 0.85[pu]$$

$$S_{carga1} = \frac{125 + 50j[MVA]}{100[MVA]} = 1.25 + 0.5j[pu]$$

$$S_{carga2} = \frac{90 + 30j[MVA]}{100[MVA]} = 0.9 + 0.3j[pu]$$

$$S_{carga3} = \frac{100 + 35j[MVA]}{100[MVA]} = 1 + 0.35j[pu]$$

Teniendo las potencias del sistema en por unidad, en la Tabla 54 se plantean los datos de condiciones iniciales para cada nodo.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.04\angle 0^{\circ}$	-	-	-
2	PV	$1.025\angle 0^{\circ}$	1.63	-	-
3	PV	$1.025\angle 0^{\circ}$	0.85	-	-
4	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
5	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	1.25	0.5
6	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	0.9	0.3
7	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
8	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	1	0.35
9	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-

Tabla 54: Condiciones iniciales - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 55 se muestran los datos de las líneas del sistema.

Líneas	Impedancia de la línea [pu]	Susceptancia/2 de la línea [pu]	Longitud [km]
4-5	$0.010 + 0.085j$	$0.088j$	1
5-7	$0.0132 + 0.0161j$	$0.153j$	1
7-8	$0.0085 + 0.072j$	$0.0745j$	1
8-9	$0.0119 + 0.1008j$	$0.1045j$	1
9-6	$0.039 + 0.170j$	$0.179j$	1
6-4	$0.017 + 0.092j$	$0.079j$	1

Tabla 55: Datos básicos de líneas - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 56 muestra los datos de los transformadores del sistema.

Transformadores	Impedancia de la línea [pu]
1-2	$0.0576j$
2-7	$0.0625j$
3-9	$0.0586j$

Tabla 56: Datos de transformadores - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se construye la matriz de admitancias o Ybus a partir de los datos de las líneas.

$$\text{Ybus}=\begin{bmatrix} -17.3611j & 0 & 0 & 17.3611j & 0 & \dots \\ 0 & -16j & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -17.0648j & 0 & 0 & \dots \\ 17.3611j & 0 & 0 & 3.3074 - 39.3089j & -1.3652 + 11.6041j & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1.3652 + 11.6041j & 2.5528 - 17.3382j & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1.9422 + 10.5107j & 0 & \dots \\ 0 & 16j & 0 & 0 & -1.1876 + 5.9751j & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 17.0648j & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.0648j \\ -1.9422 + 10.5107j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.1876 + 5.9751j & 0 & 0 \\ 3.2242 - 15.8409j & 0 & 0 & -1.2820 + 5.5882j \\ 0 & 2.8047 - 35.4456j & -1.6171 + 13.6980j & 0 \\ 0 & -1.6171 + 13.6980j & 2.7722 - 23.3032j & -1.1551 + 9.7843j \\ -1.2820 + 5.5882j & 0 & -1.1551 + 9.7843j & 2.4371 - 32.1539j \end{bmatrix}$$

5.3.2. *Simulación del caso 3 en ETAP*

Es necesario tener un referente de los resultados del flujo de carga para el caso 3, ya que estos serviran como punto de comparación con los resultados que se obtengan del softare Fluxtool. Como es evidente, realizar el cálculo manual del flujo de carga para este caso resultaría un proceso extenuante, por tanto, se procede a realizar la simulación de este sistema de potencia en el software ETAP como lo muestra la Figura 48.

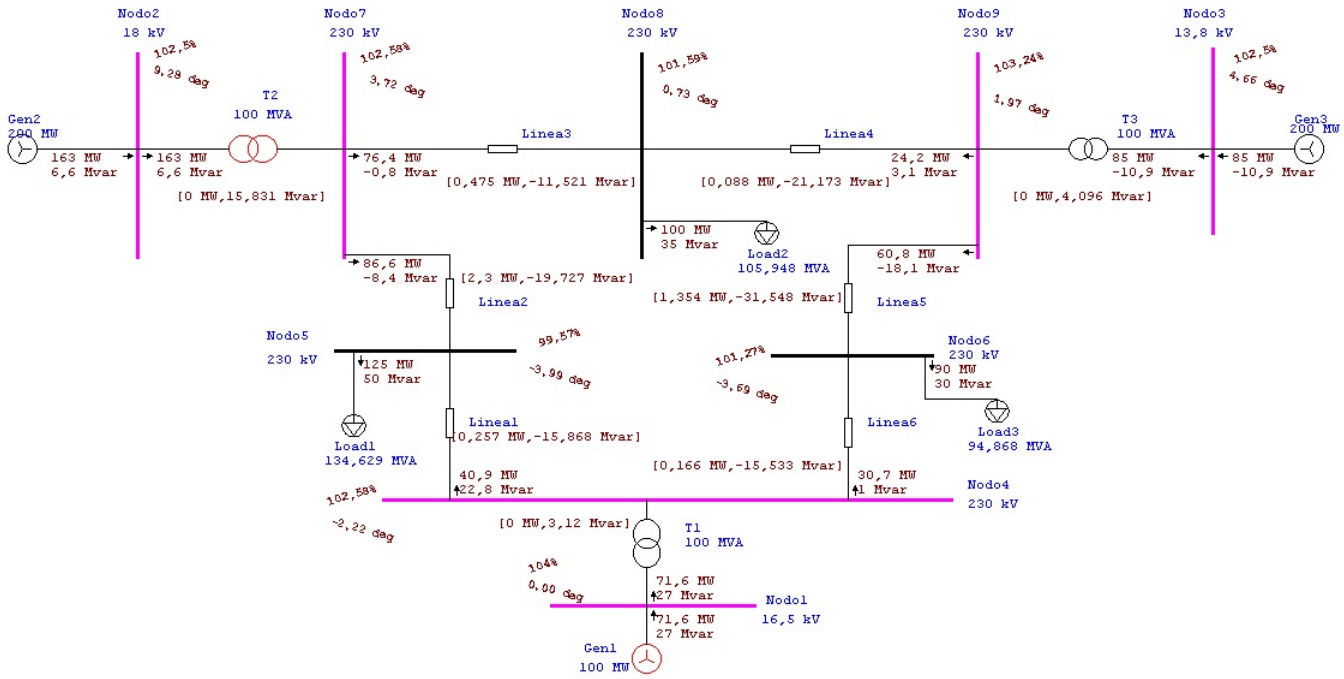


Figura 48: Flujo de carga simulado en el software ETAP - Caso 3. [15]

Los resultados de las tensiones, ángulos y potencias en cada nodo son mostrados en la Tabla 57.

RESULTADOS TENSIONES Y ÁNGULOS ETAP		
Nodos	Tensión [p.u.]	Ángulo [°]
1	1.04	0
2	1.025	9.28
3	1.025	4.66
4	1.0258	−2.22
5	0.9957	−3.99
6	1.0127	−3.69
7	1.0258	3.72
8	1.0159	0.73
9	1.0324	1.97

Tabla 57: Resultados de tensiones y ángulos con el software ETAP - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los flujos de carga y pérdidas de potencia en los elementos del sistema son mostrados en la Tabla 58.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA Y PÉRDIDAS EN ETAP					
Nodo		Flujo de carga		Pérdidas de potencia	
Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
1	4	71.641	26.966	0	3.1205
4	1	−71.641	−23.845		
2	7	163	6.604	0.0002	15.8314
7	2	−163	9.228		
3	9	85	−10.892	0	0.4096
9	3	−85	14.988		
4	5	40.937	22.827	0.2573	−1.5869
5	4	−40.679	−38.695		
5	7	−84.321	−11.305	2.2997	−19.7275
7	5	86.621	−8.422		
7	8	76.379	−0.805	0.4753	−11.5212
8	7	−75.904	−10.716		
8	9	−24.096	−24.284	0.0880	−21.1729
9	8	24.184	3.111		
9	6	60.816	−18.099	1.3538	−31.5481
6	9	−59.462	−13.499		
6	4	−30.538	−16.551	0.1664	−15.5327
4	6	30.704	1.029		

Tabla 58: Flujos de carga y pérdidas de potencia con el software ETAP- Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. *Solución del caso 3 utilizando Fluxtool*

Una vez se tienen los valores de las tensiones incognitas, flujos de potencia y pérdidas de potencia de referencia, se introducen todos los datos del sistema de potencia en el software Fluxtool y se procede a obtener los resultados de dichas variables para todos los métodos de solución para el flujo de carga.

Se da inicio a calcular los valores para el método de Gauss-Seidel. La Figura 49 muestra los valores que se obtuvieron.

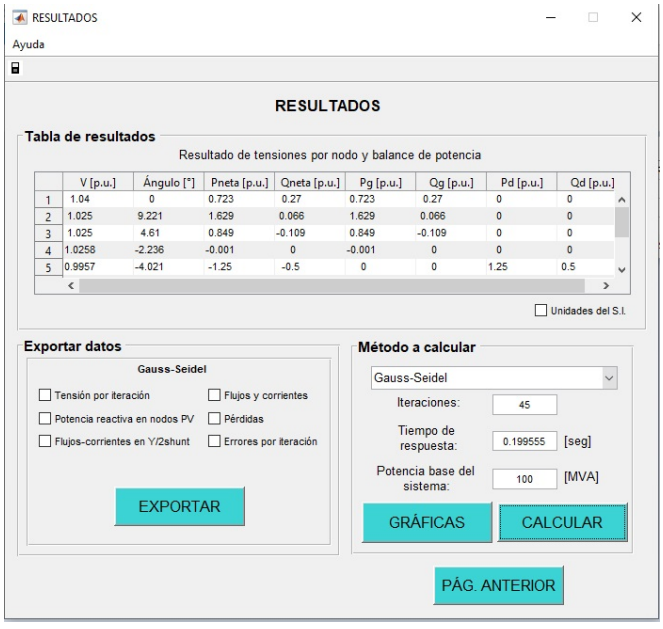


Figura 49: Tesiones y ángulos para Gauss-Seidel - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 50 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron para el método de Gauss-Seidel.

	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	4	72,25510362	26,97783619	-0,694760612	-0,259402271
3	2	7	162,8673467	6,609322583	-1,578750476	0,190960692
4	3	9	84,86977686	-10,88289673	-0,81678519	0,172381536
5	4	1	-72,25510362	-23,80994076	0,694760612	0,259402271
6	4	5	41,21302785	22,84532235	-0,383090345	-0,415812932
7	4	6	30,9394089	0,988946487	-0,292645249	-0,1822137
8	5	4	-40,95367339	-38,62598102	0,392756025	0,238201658
9	5	7	-84,08931637	-11,36271231	0,83509179	-0,1355372
10	6	4	-30,77079221	-16,4920377	0,300995288	0,021398544
11	6	9	-59,26859816	-13,49756743	0,580949577	-0,194625622
12	7	2	-162,8673467	9,196421486	1,578750476	-0,190960692
13	7	5	86,37629092	-8,399024485	-0,834441854	-0,173054937
14	7	8	76,37859754	-0,788557084	-0,748344171	-0,096676524
15	8	7	-75,90333692	-10,713633	0,742570126	-0,055267413
16	8	9	-24,16802714	-24,28297791	0,235835613	0,022244085
17	9	3	-84,86977686	14,9664579	0,81678519	-0,172381536
18	9	6	60,61339216	-18,075696	-0,575372369	-0,170957145
19	9	8	24,2563847	3,109238105	-0,240690029	-0,236219406

... | Tensión y ángulos | Potencia reactiva en nodos PV | Vector de errores | **Flujos y corrientes** | Pér ...

Figura 50: Flujos de carga para Gauss-Seidel - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 51 y 52 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron para el método de Gauss-Seidel.

	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,25935	-15,78066
3	2	2,28697	-19,76174
4	3	0,47526	-11,50219
5	4	0,08836	-21,17374
6	5	1,34479	-31,57326
7	6	0,16862	-15,50309
8			

... | Potencia reactiva en nodos PV | Vector de errores | Flujos y corrientes | Pé

Figura 51: Pérdidas de potencia en líneas para Gauss-Seidel - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	3,1679
3	2	0	15,80574
4	3	0	4,08356
5			

... | Vector de errores | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | **Pérdidas en transformadores** | Flujo ...

Figura 52: Pérdidas de potencia en transformadores para Gauss-Seidel - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 53 muestra la tensión por cada nodo y un total de 45 iteraciones para el método de Gauss-Seidel.

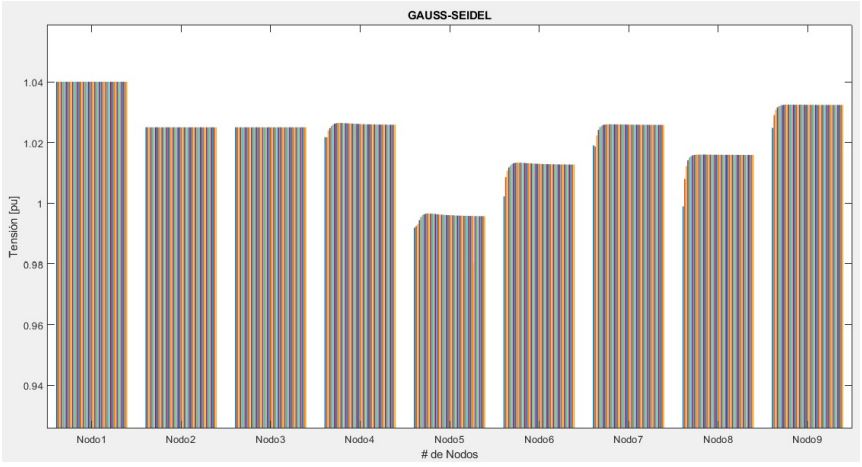


Figura 53: Iteraciones para Gauss-Seidel - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Se calculan los valores para el método de Newton Raphson. La Figura 54 muestra los valores que se obtuvieron.

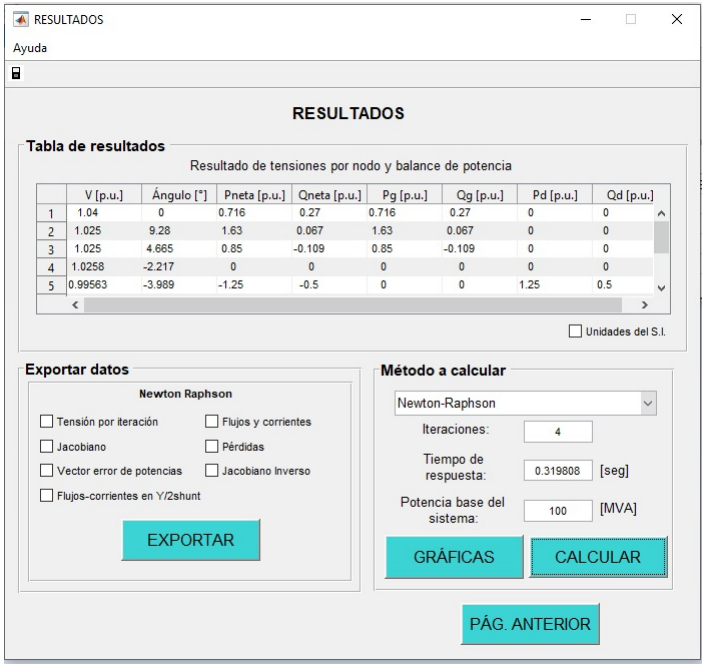


Figura 54: Tesiones y ángulos para Newton Raphson - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 55 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron para el método de Newton Raphson.

	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	4	71,64102147	27,04592353	-0,688855976	-0,260056957
3	2	7	163	6,653660318	-1,579898827	0,192377651
4	3	9	85	-10,85970907	-0,81790514	0,173037978
5	4	1	-71,64102147	-23,923127	0,688855976	0,260056957
6	4	5	40,93735171	22,89312062	-0,380564255	-0,416050667
7	4	6	30,70366976	1,030006374	-0,290425802	-0,182422106
8	5	4	-40,67983748	-38,68724883	0,390150601	0,238445563
9	5	7	-84,32016252	-11,31275117	0,837361208	-0,136314084
10	6	4	-30,53726287	-16,54336524	0,298705375	0,021611394
11	6	9	-59,46273713	-13,45663476	0,582750811	-0,195198247
12	7	2	-163	9,17814884	1,579898827	-0,192377651
13	7	5	86,62013383	-8,380817398	-0,836946516	-0,172260533
14	7	8	76,37986617	-0,797331442	-0,748456381	-0,095872414
15	8	7	-75,90458254	-10,70417739	0,74253762	-0,056063567
16	8	9	-24,09541746	-24,29582261	0,235154329	0,022160269
17	9	3	-85	14,9553273	0,81790514	-0,173037978
18	9	6	60,81658598	-18,07483572	-0,577434981	-0,170373943
19	9	8	24,18341402	3,119508418	-0,240204655	-0,236128775
20						

... Jacobiano | Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdidas en línea ...

Figura 55: Flujos de carga para Newton Raphson - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 56 y 57 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson.

	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,25751	-15,79413
3	2	2,29997	-19,69357
4	3	0,47528	-11,50151
5	4	0,088	-21,17631
6	5	1,35385	-31,53147
7	6	0,16641	-15,51336
8			

... Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdid

Figura 56: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	3,1228
3	2	0	15,83181
4	3	0	4,09562
5			

Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | **Pérdidas en transformadores** | Flujos y corrientes en Yshui ...

Figura 57: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 58 muestra la tensión por cada nodo y un total de 4 iteraciones para el método de Newton Raphson.

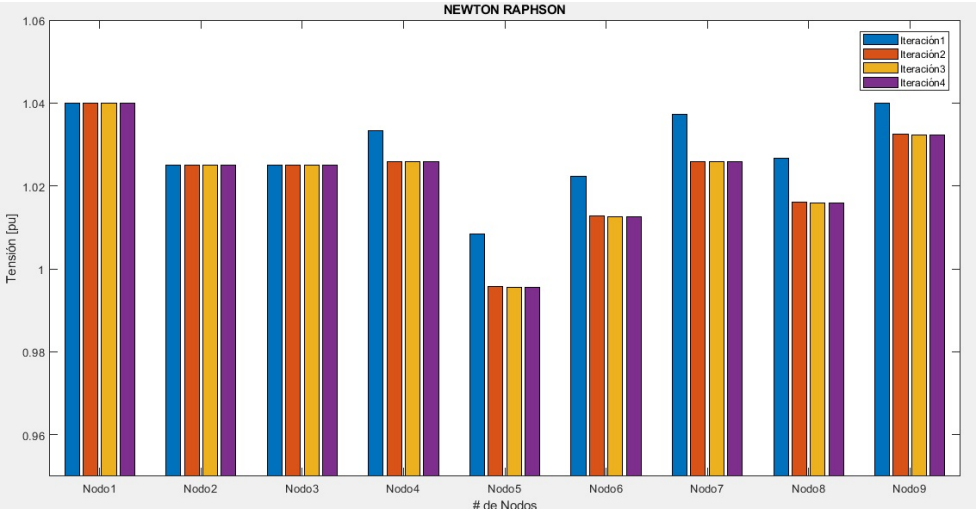


Figura 58: Iteraciones para Newton Raphson - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Se calculan los valores para el método de Newton Raphson Desacoplado. La Figura 59 muestra los valores que se obtuvieron.

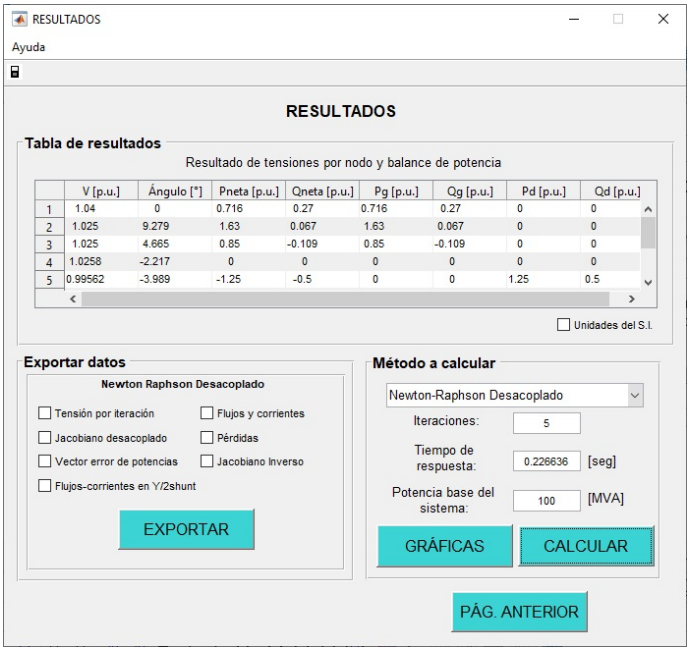


Figura 59: Tesiones y ángulos para Newton Raphson Desacoplado - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 60 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron para el método de Newton Raphson Desacoplado.

	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	4	71,63981907	27,04952179	-0,688844414	-0,260091556
3	2	7	162,9908378	6,661916469	-1,579826779	0,192257614
4	3	9	84,99835254	-10,85710468	-0,817891412	0,173010285
5	4	1	-71,63981907	-23,92671334	0,688844414	0,260091556
6	4	5	40,94267185	22,90636769	-0,380611864	-0,416180589
7	4	6	30,65564756	1,003218597	-0,289971755	-0,18214525
8	5	4	-40,68503446	-38,69917712	0,390198335	0,238576858
9	5	7	-84,31448676	-11,31893117	0,837312983	-0,136248445
10	6	4	-30,48979692	-16,52001861	0,298248276	0,021332209
11	6	9	-59,43774316	-13,44791844	0,582493537	-0,195332998
12	7	2	-162,9908378	9,168181295	1,579826779	-0,192257614
13	7	5	86,61419479	-8,375378362	-0,836896101	-0,172323358
14	7	8	76,37066645	-0,794958327	-0,748371706	-0,095908768
15	8	7	-75,8954886	-10,70725899	0,742454292	-0,056026358
16	8	9	-24,10118027	-24,30006132	0,235212511	0,022205068
17	9	3	-84,99835254	14,95253515	0,817891412	-0,173010285
18	9	6	60,79042083	-18,08965085	-0,57718441	-0,170244556
19	9	8	24,18922369	3,124321051	-0,240262171	-0,236172715
20						

... | Jacobiano | Jacobiano inverso | Vector error de potencias | **Flujos y corrientes** | Pérdidas en líneas ...

Figura 60: Flujos de carga para Newton Raphson Desacoplado - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 61 y 62 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado.

	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,25764	-15,79281
3	2	2,29971	-19,69431
4	3	0,47518	-11,50222
5	4	0,08804	-21,17574
6	5	1,35268	-31,53757
7	6	0,16585	-15,5168
8			

... | Jacobiano inverso | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdi

Figura 61: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson Desacoplado - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	3,12281
3	2	0	15,8301
4	3	0	4,09543
5			

... | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | **Pérdidas en transformadores** | ...

Figura 62: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson Desacoplado - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 63 muestra la tensión por cada nodo y un total de 5 iteraciones para el método de Newton Raphson Desacoplado.

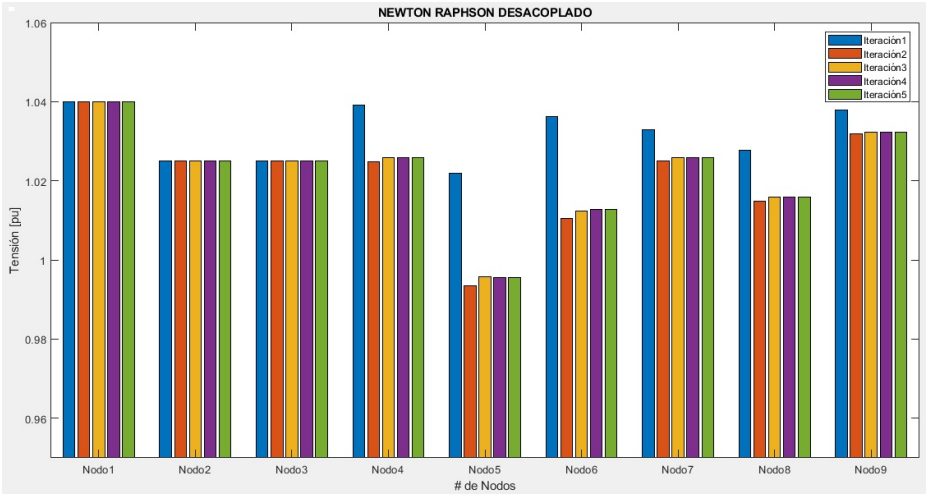


Figura 63: Iteraciones para Newton Raphson Desacoplado- Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Los valores que se obtuvieron para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido, se ven en la Figura 64.

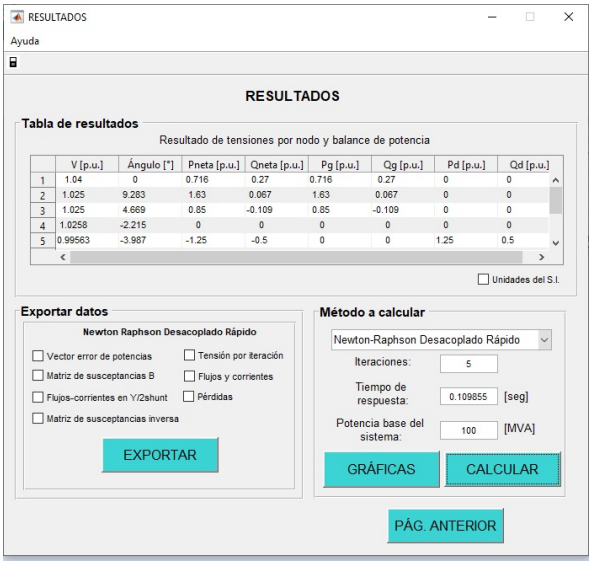


Figura 64: Tensiones y ángulos para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 65 muestra los resultados de flujos de carga que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

	A	B	C	D	E	F
1	DESDE_NODO	HASTA_NODO	FLUJO_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	FLUJO_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr	I_REAL_PU_LINEAS	I_IMAG_PU_LINEAS
2	1	4	71,5936408	27,03202933	-0,688400392	-0,259923359
3	2	7	162,9967194	6,656747437	-1,57986177	0,192427573
4	3	9	84,99994025	-10,85616358	-0,817895793	0,17305819
5	4	1	-71,5936408	-23,91324707	0,688400392	0,259923359
6	4	5	40,92426364	22,89766377	-0,38044424	-0,416079604
7	4	6	30,63710298	0,995040097	-0,289797407	-0,182053323
8	5	4	-40,66682608	-38,692633	0,39002502	0,238473249
9	5	7	-84,33016405	-11,30571366	0,837455171	-0,13640982
10	6	4	-30,47146297	-16,51341981	0,298068723	0,021237832
11	6	9	-59,4512283	-13,4326507	0,582612804	-0,195505049
12	7	2	-162,9967194	9,174449961	1,57986177	-0,192427573
13	7	5	86,63067954	-8,385171766	-0,837054804	-0,172164913
14	7	8	76,37094648	-0,794840279	-0,748378444	-0,095860271
15	8	7	-75,89576821	-10,70747781	0,742450811	-0,056074968
16	8	9	-24,10090571	-24,29631762	0,235210018	0,02215136
17	9	3	-84,99994025	14,9517332	0,817895793	-0,17305819
18	9	6	60,80452536	-18,10287777	-0,577323323	-0,170075805
19	9	8	24,18893513	3,12039777	-0,240274073	-0,236118968
20						

Matriz de susceptancias inversa | Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdidas en línea

Figura 65: Flujos de carga para Newton Raphson Desacoplado Rápido- Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 66 y 67 muestran los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores que se obtuvieron al exportar los datos para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

	A	B	C
1	LINEA	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_MVAr
2	1	0,25744	-15,79497
3	2	2,30052	-19,69089
4	3	0,47518	-11,50232
5	4	0,08803	-21,17592
6	5	1,3533	-31,53553
7	6	0,16564	-15,51838
8			

Vector error de potencias | Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas

Figura 66: Pérdidas de potencia en líneas para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C
1	TRANSFORMADOR	PERDIDAS_DE_POTENCIA_ACTIVA_TRANSFORMADOR_MW	PERDIDAS_DE_POTENCIA_REACTIVA_TRANSFORMADOR_MVAr
2	1	0	3,11878
3	2	0	15,8312
4	3	0	4,09557
5			

Flujos y corrientes | Pérdidas en líneas | **Pérdidas en transformadores** | Flujos y corrientes en Yshu

Figura 67: Pérdidas de potencia en transformadores para Newton Raphson Desacoplado Rápido - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 68 muestra la tensión por cada nodo y un total de 5 iteraciones para el método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.

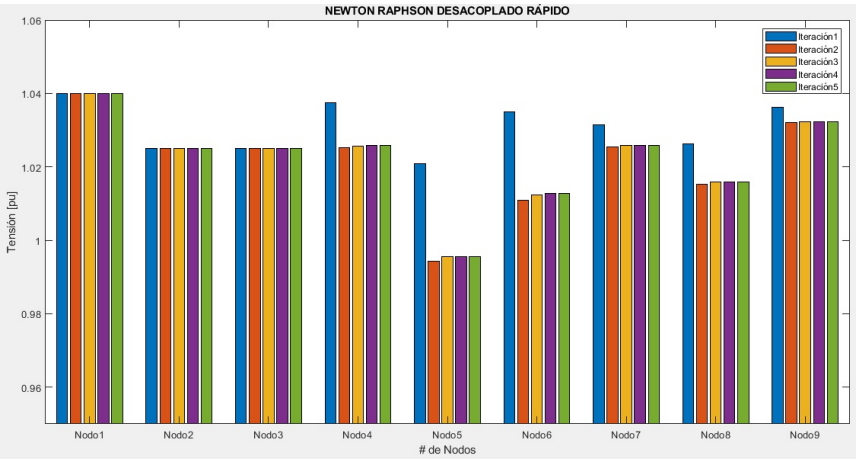


Figura 68: Iteraciones para Newton Raphson Desacoplado Rápido- Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 69 muestra la gráfica que exporta Fluxtool del resumen de iteraciones en todos los métodos para el flujo de carga en el caso 3. La mayor cantidad de iteraciones fueron por parte del método de Gauss-Seidel, con un total de 45 y el método que obtuvo menos iteraciones fue Newton Raphson, con un total de 4. Se puede concluir que Newton Raphson es el método mas efectivo para resolver el flujo de carga cuando se tienen sistemas de potencia de gran tamaño. Tambíen es posible recurrir a los métodos Desacoplado y Desacoplado Rápido para ahorrar recursos del sistema, ya que el número de iteraciones que se obtienen a partir de estos métodos, siguen siendo mucho menor a las obtenidas por Gauss-Seidel.

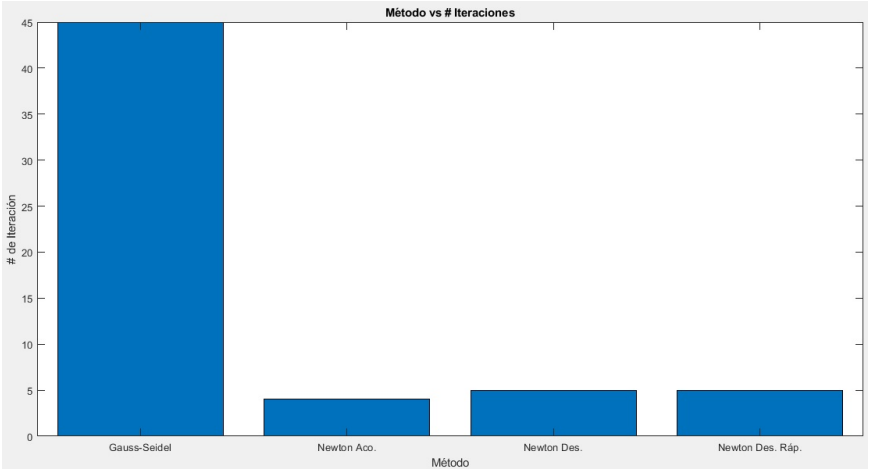


Figura 69: Iteraciones de todos los métodos para el flujo de carga - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo los resultados para todos los métodos por medio del software Fluxtool, se realiza una comparación entre la simulacion y los valores calculados por Fluxtool para la tensiones, ángulos, flujo de carga y pérdidas en los elementos.

La Tabla 59 muestra el resumen de los valores de tensíón y ángulo para todos los método que se obtuvieron por medio del programa Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE TENSIONES Y ÁNGULOS EN FLUXTOOL			
Método	Nodos	Resultados Fluxtool	
		Tensión [p.u.]	Ángulo [°]
Gauss-Seidel	1	1.04	0
	2	1.025	9.221
	3	1.025	4.61
	4	1.0258	−2.236
	5	0.9957	−4.021
	6	1.0127	−3.718
	7	1.0258	3.665
	8	1.0159	0.673
	9	1.0324	1.916
N. Raphson	1	1.04	0
	2	1.025	9.28
	3	1.025	4.665
	4	1.0258	−2.217
	5	0.9956	−3.989
	6	1.0127	−3.687
	7	1.0258	3.72
	8	1.0159	0.728
	9	1.0324	1.977
N. Raphson Des.	1	1.04	0
	2	1.025	9.279
	3	1.025	4.665
	4	1.0258	−2.217
	5	0.9956	−3.989
	6	1.0127	−3.685
	7	1.0258	3.719
	8	1.0159	0.727
	9	1.0324	1.967
N. Raphson Des. Ráp.	1	1.04	0
	2	1.025	9.283
	3	1.025	4.669
	4	1.0258	−2.215
	5	0.9956	−3.987
	6	1.0127	−3.683
	7	1.0258	3.723
	8	1.0159	0.731
	9	1.0324	1.9671

Tabla 59: Resultados de tensiones y ángulos con Fluxtool - Caso 3.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 60 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool. Como se puede evidenciar, el resultado de error en los ángulos en los nodos 7, 8 y 9, para el método de Gauss-Seidel, sobrepasa el 1 % establecido. Esto no corresponde a un error

de alguno de los programas que se están comparando, si no al error estándar que maneja el software ETAP, el cual es de 0.000001 para el método de Gauss-Seidel [15], por tanto, este valor es mucho menor al establecido en el enunciado del caso 3. En otras palabras, el software de referencia emplea más iteraciones para dar su respuesta y esto hace que se encuentre esta diferencia de resultados representada en el valor de error calculado de la tabla. A diferencia de los otros métodos, en ningún caso el error de las tensiónes y ángulos en los nodos supera el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN TENSIONES Y ÁNGULOS			
Método	Nodos	Error %	
		Tensión	Ángulo
Gauss-Seidel	1	0	0
	2	0	0.6358
	3	0	1.0730
	4	0	−0.7207
	5	0	−0.7769
	6	0	−0.7588
	7	0	1.4785
	8	0	7.8082
	9	0	2.7411
N. Raphson	1	0	0
	2	0	0
	3	0	−0.1073
	4	0	0.1351
	5	0	0.0251
	6	0	0.0813
	7	0	0
	8	0	0.2740
	9	0	−0.3553
N. Raphson Des.	1	0	0
	2	0	0.0108
	3	0	−0.1073
	4	0	0.1351
	5	0	0.0251
	6	0	0.1355
	7	0	0.0269
	8	0	0.4110
	9	0	0.1523
N. Raphson Des. Ráp.	1	0	0
	2	0	−0.0323
	3	0	−0.1931
	4	0	0.2252
	5	0	0.0752
	6	0	0.1897
	7	0	−0.0806
	8	0	−0.1370
	9	0	0.1523

Tabla 60: Error calculado para las tensiones y ángulos entre ETAP y Fluxtool - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 61 muestra el resumen de los valores de los flujos de carga para todos los métodos según lo calculado en

Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA EN FLUXTOOL				
Método	Nodo		Resultados Fluxtool	
	Inicio	Final	P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
Gauss-Seidel	1	4	72.255	26.978
	4	1	−72.255	−23.810
	2	7	162.867	6.610
	7	2	−162.867	9.196
	3	9	84.870	−10.883
	9	3	−84.870	14.966
	4	5	41.213	22.845
	5	4	−40.954	−38.626
	5	7	−84.089	−11.363
	7	5	86.376	−8.399
	7	8	76.379	−0.789
	8	7	−75.903	−10.714
	8	9	−24.168	−24.283
	9	8	24.256	3.109
	9	6	60.613	−18.076
	6	9	−59.269	−13.498
	6	4	−30.771	−16.492
	4	6	30.939	0.989
N.Raphson	1	4	71.641	27.046
	4	1	−71.641	−23.923
	2	7	163	6.654
	7	2	−163	9.178
	3	9	85	−10, 860
	9	3	−85	14.955
	4	5	40.937	22.893
	5	4	−40.680	−38.687
	5	7	−84.320	−11.313
	7	5	86.620	−8.381
	7	8	76.380	−0.797
	8	7	−75.905	−10.704
	8	9	−24.095	−24.296
	9	8	24.183	3.120
	9	6	60.817	−18.075
	6	9	−59.463	−13.457
	6	4	−30.537	−16.543
	4	6	30.704	1.030
N.Raphson Des.	1	4	71.640	27.050
	4	1	−71.640	−23.927
	2	7	162.991	6.662
	7	2	−162.991	9.168
	3	9	84.998	−10.857
	9	3	−84.998	14.953
	4	5	40.943	22.906
	5	4	−40.685	−38.699
	5	7	−84.314	−11.319
	7	5	86.614	−8.375
	7	8	76.371	−0.795

contínúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA EN FLUXTOOL				
	8	7	−75.895	−10.707
	8	9	−24.101	−24.300
	9	8	24.189	3.124
	9	6	60.790	−18.090
	6	9	−59.438	−13.448
	6	4	−30.490	−16.520
	4	6	30.656	1.003
N. Raphson Des. Ráp.	1	4	71.594	27.032
	4	1	−71.594	−23.913
	2	7	162.997	6.657
	7	2	−162.998	9.174
	3	9	84.999	−10.856
	9	3	−84.999	14.952
	4	5	40.924	22.898
	5	4	−40.667	−38.693
	5	7	−84.330	−11.306
	7	5	86.631	−8.385
	7	8	76.371	−0.795
	8	7	−75.896	−10.707
	8	9	−24.101	−24.296
	9	8	24.189	3.120
	9	6	60.805	−18.103
	6	9	−59.451	−13.433
	6	4	−30.471	−16.513
	4	6	30.637	0.995

Tabla 61: Flujos de potencias con Fluxtool - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 62 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN FLUJOS DE CARGA				
	Nodo		Error %	
Método	Inicio	Final	P.activa	P.reactiva
Gauss-Seidel	1	4	−0.8571	−0.0445
	4	1	−0.8571	0.1468
	2	7	0.0816	−0.0909
	7	2	0.0816	0.3468
	3	9	0.1529	0.0826
	9	3	0.1529	0.1468
	4	5	−0.6742	−0.0789
	5	4	−0.6760	0.1783
	5	7	0.2751	−0.5130
	7	5	0.2828	0.2731
	7	8	0	1.9876
	8	7	0.0013	0.0187
	8	9	−0.2988	0.0041
	9	8	−0.2977	0.0643
	9	6	0.3338	0.1271

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN FLUJOS DE CARGA				
	6	9	0.3246	0.0074
	6	4	−0.7630	0.3565
	4	6	−0.7654	3.887
N. Raphson	1	4	0	−0.2967
	4	1	0	−0.3271
	2	7	0	−0.7571
	7	2	0	0.5418
	3	9	0	0.2938
	9	3	0	0.2202
	4	5	0	−0.2891
	5	4	−0.0025	0.0207
	5	7	0.0012	−0.0708
	7	5	0.0012	0.4868
	7	8	−0.0013	0.9938
	8	7	−0.0013	0.1120
	8	9	0.0042	−0.0494
	9	8	0.0041	−0.2893
	9	6	−0.0016	0.1326
	6	9	−0.0017	0.3111
	6	4	0.0033	0.0483
	4	6	0	0
N. Raphson Des.	1	4	0.0014	−0.0445
	4	1	0.0014	0.1468
	2	7	0.0055	−0.0909
	7	2	0.0055	0.3468
	3	9	0.0024	0.0826
	9	3	0.0024	0.1468
	4	5	−0.0147	−0.0789
	5	4	−0.0147	0.1783
	5	7	0.0083	−0.5130
	7	5	0.0081	0.2731
	7	8	0.0105	1.9876
	8	7	0.0119	0.0187
	8	9	−0.0208	0.0041
	9	8	−0.0207	0.0643
	9	6	0.0428	0.1271
	6	9	0.0404	0.0074
	6	4	0.1572	0.3565
	4	6	0.1563	2.5267
N. Raphson Des. Ráp.	1	4	0.0656	−0.2448
	4	1	0.0656	−0.2852
	2	7	0.0018	−0.8025
	7	2	0.0012	0.5852
	3	9	0.0012	0.3305
	9	3	0.0012	0.2402
	4	5	0.0318	−0.3110
	5	4	0.0295	0.0052
	5	7	−0.0107	−0.0088
	7	5	−0.0115	0.4393
	7	8	0.0105	1.2422
	8	7	0.0105	0.0840
	8	9	−0.0208	−0.0494

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN FLUJOS DE CARGA				
	9	8	−0.0207	−0.2893
	9	6	0.0181	−0.0221
	6	9	0.0185	0.4889
	6	4	0.2194	0.2296
	4	6	0.2182	3.3041

Tabla 62: Error calculado del flujo de carga entre ETAP y Fluxtool - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede evidenciar, el resultado de error del flujo de carga en los nodos 7-8 y 4-6, para el método de Gauss-Seidel, sobrepasa el 1 % establecido. Para los métodos de Newton Raphson Desacoplado y Desacoplado Rápido, en los nodos 7-8 y 4-6, tambien se sobrepasa el 1 % en el flujo de potencia reactiva. Esto no corresponde a un error de alguno de los programas que se están comparando, si no al error estándar que maneja el software ETAP, el cual es de 0.000001 para el método de Gauss-Seidel [15] y 0.0001 para Newton Raphson [15], por tanto, este valor es mucho menor al establecido en el enunciado del caso 3 el cual es 0.001. En otras palabras, el software de referencia emplea más iteraciones para dar su respuesta y esto hace que se encuentre esta diferencia de resultados representada en el valor de error calculado de la tabla. Para el caso del método de Newton Raphson, el error se mantuvo por debajo del 1 %, esto quiere decir que es el método más efectivo para sistemas de potencia con una mayor cantidad de nodos.

A continuación se muestra la Tabla 63, que reune los resultados de pérdidas de potencia en líneas y transformadores calculados en Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN FLUXTOOL				
Método	Elemento	No.	Resultados Fluxtool	
			P.activa[MW]	P.reactiva[MVAr]
Gauss-Seidel	Línea	1	0.2594	−15.7807
		2	2.2870	−19.7617
		3	0.4753	−11.5022
		4	0.0884	−21.1737
		5	1.3448	−31.5733
		6	0.1686	−15.5031
	Transformador	1	0	3.1679
		2	0	15.8057
		3	0	4.0836
N. Raphson	Línea	1	0.2575	−15.7941
		2	2.3000	−19.6936
		3	0.4753	−11.5015
		4	0.0880	−21.1763
		5	1.3539	−31.5315
		6	0.1664	−15.5134
	Transformador	1	0	3.1228
		2	0	15.8318
		3	0	4.0956
N. Raphson Des.	Línea	1	0.2576	−15.7928
		2	2.2997	−19.6943
		3	0.4752	−11.5022
		4	0.0880	−21.1757
		5	1.3527	−31.5376
		6	0.1659	−15.5168
	Transformador	1	0	3.1228
		2	0	15.8301

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN FLUXTOOL				
		3	0	4.0954
N. Raphson Des. Ráp.	Línea	1	0.2574	−15.7950
		2	2.3005	−19.6909
		3	0.4752	−11.5023
		4	0.0880	−21.1759
		5	1.3533	−31.5355
		6	0.1656	−15.5184
	Transformador	1	0	3.1188
		2	0	15.8312
		3	0	4.0956

Tabla 63: Pérdidas de potencia en transformadores y líneas con Fluxtool - Caso 3. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 64 se muestran los valores de error que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación realizada en ETAP y los valores dados por Fluxtool.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN PÉRDIDAS DE POTENCIA				
Método	Elemento	No.	Error %	
			P.activa	P.reactiva
Gauss-Seidel	Línea	1	−0.8162	0.5564
		2	0.5522	−0.1734
		3	0	0.1649
		4	−0.4545	−0.0038
		5	0.6648	−0.0799
		6	−1.3221	0.1906
	Transformador	1	0	−1.5190
		2	0	0.1623
		3	0	0.3027
N. Raphson	Línea	1	−0.0777	0.4720
		2	−0.0130	0.1718
		3	0	0.1710
		4	0	−0.0161
		5	−0.0074	0.0526
		6	0	0.1243
	Transformador	1	0	−0.0737
		2	0	−0.0025
		3	0	0.0098
N. Raphson Des.	Línea	1	−0.1166	0.4802
		2	0	0.1683
		3	0.0210	0.1649
		4	0	−0.0132
		5	0.0813	0.0333
		6	0.3005	0.1024
	Transformador	1	0	−0.0737
		2	0	0.0082
		3	0	0.0146
	Línea	1	−0.0389	0.4663
		2	−0.0348	0.1855
		3	0.0210	0.1640

continúa en la página siguiente

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN PÉRDIDAS DE POTENCIA				
N. Raphson Des. Ráp.		4	0	−0.0142
		5	0.0369	0.0399
		6	0.4808	0.0921
	Transformador	1	0	0.0545
		2	0	0.0013
		3	0	0.0098

Tabla 64: Error calculado de pérdidas de potencia entre ETAP y Fluxtool - Caso 3. Fuente: Elaboración propia

Se observa que el resultado de error en las pérdidas de potencia en la línea 6, para el método de Gauss-Seidel, sobrepasa el 1 % establecido. Esto no corresponde a un error de alguno de los programas que se están comparando, si no al error estándar que maneja el software ETAP, el cual es de 0.000001 para el método de Gauss-Seidel [15], por tanto, este valor es mucho menor al establecido en el enunciado del caso 3. En otras palabras, el software de referencia emplea más iteraciones para dar su respuesta y esto hace que se encuentre esta diferencia de resultados representada en el valor de error calculado de la tabla. Para los otros métodos, en ningún caso el error de las pérdidas de potencia supera el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

5.4. Caso 4

El caso estudio determinado para este método es el mostrado en la Figura 70, el cual, es un sistema de 3 nodos con generadores conectados a las barras 1 y 2; tiene asignado al nodo 1 como el nodo Slack, el nodo dos es un nodo PV y el nodo tres una barra de carga [6].

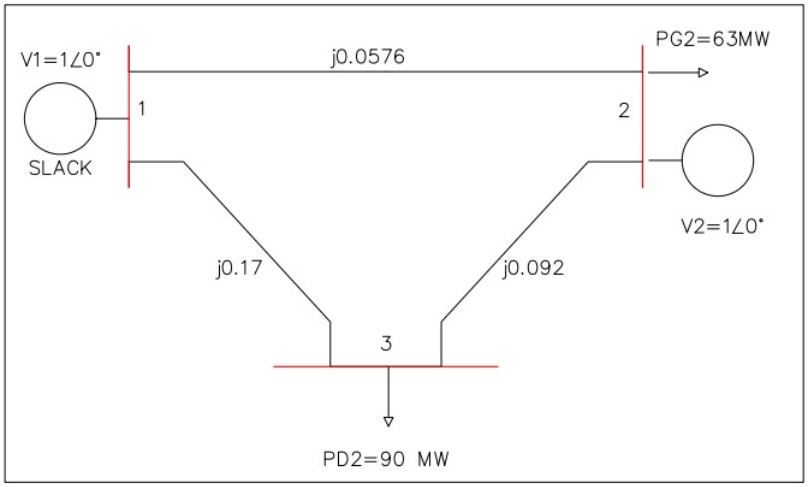


Figura 70: Diagrama para sistema de potencia de 3 nodos - Caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Para dar solución a este método se siguen los siguientes pasos:

- Se definen los valores de condiciones iniciales.
- Las tensiones en los nodos del sistema son equivalentes a $1[p.u.]$.
- La parte resistiva de los elementos del sistema son equivalentes a 0.

- Se extrae la matriz B, que es el componente imaginario de la matriz de admitancias.
- Se procede a calcular la matriz de incidencia A. Cuando un elemento esté conectado al inicio del nodo, será representado con el numero 1, y la conexión al final del nodo será representado por -1. Los elementos que no tengan relación de conexión con algún nodo, su valor será 0.
- Se calcula la matriz diagonal b, conformada por el valor de la admitancia de cada elemento del sistema.
- Se calcula el vector de ángulos en los nodos θ, según la ecuación (35).
- Finalmente, se calcula el flujo de potencia activa en las líneas dado por la ecuación (36).

Este método es líneal , por tanto, no requiere de iteraciones para encontrar una solución.

5.4.1. *Recopilación de datos para el caso 4*

Se procede a calcular todas las potencias del sistema en por unidad, tomando como referencia una potencia base de $100[MVA]$.

$$S_{gen1} = \frac{63 + 0j[MVA]}{100[MVA]} = 0.63[pu]$$

$$S_{carga1} = \frac{10 + 5j[MVA]}{100[MVA]} = 0.1 + 0.05j[pu]$$

$$S_{carga2} = \frac{90 + 30j[MVA]}{100[MVA]} = 0.9 + 0.3j[pu]$$

En la Tabla 65, las condiciones iniciales son reunidas en valores en por unidad para cada nodo del sistema.

Nodo	Típo	Tensión [pu]	Pg [pu]	Pd [pu]	Qd [pu]
1	Slack	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	-	-
2	PV	$1.0\angle 0^{\circ}$	0.63	0.1	0.05
3	PQ	$1.0\angle 0^{\circ}$	-	0.9	0.3

Tabla 65: Condiciones iniciales - Caso 4. [6]

La Tabla 66 muestra los datos para cada línea del sistema.

Líneas	Impedancia de la línea [pu]	Longitud [km]
1-2	$j0.0576$	1
2-3	$j0.092$	1
1-3	$j0.17$	1

Tabla 66: Datos de las líneas caso 4. [6]

5.4.2. *Solución teórica del flujo de carga en DC para el caso 4.*

Procedemos a construir la matriz Ybus, la cual para este caso es nombrada matriz de susceptancia B.

$$B = \begin{bmatrix} 23.2435j & -17.3611j & -5.8824j \\ -17.3611j & 28.2307j & -10.8696j \\ -5.8824j & -10.8696j & 16.7519j \end{bmatrix}$$

Luego, se calcula la matriz de incidencia A.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{200}$$

Para el calculo de la matriz b, se da el valor de la susceptancia a los componentes de la diagonal, para los componentes fuera de la diagonal se iguala a cero. Dado esto, tenemos que:

$$b = \begin{bmatrix} 17.3611 & 0 & 0 \\ 0 & 10.8696 & 0 \\ 0 & 0 & 5.8824 \end{bmatrix} \tag{201}$$

Para calcular el vector de ángulos θ, se toma la matriz B y se elimina la columna 1 y la fila 1 que corresponden a los datos referentes al nodo Slack, luego con la matriz resultante se calcula su inverso y se multiplica por el vector de potencias netas.

Recordemos que $P_{Ni} = P_{Gi} - P_{Di}$, que quiere decir que la potencia neta es igual a la potencia generada menos la potencia demanada para el nodo i.

$$\theta = \begin{bmatrix} 28.2307j & -10.8696j \\ -10.8696j & 16.7519j \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} - \\ 0.63 - 0.1 \\ 0 - 0.9 \end{bmatrix} \tag{202}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0025 \\ -0.0554 \end{bmatrix} \tag{203}$$

Por último, se calcula el vector de resultados, donde se busca encontrar el valor del flujo de potencia de cada línea. El modelo matemático es el mostrado en la ecuación (184).

Para este caso obtenemos lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} P_{L1} \\ P_{L2} \\ P_{L3} \end{bmatrix} = S_B \cdot b \cdot A \cdot \theta \tag{204}$$

$$\begin{bmatrix} P_{L1} \\ P_{L2} \\ P_{L3} \end{bmatrix} = 100[MVA] \cdot \begin{bmatrix} 17.3611 & 0 & 0 \\ 0 & 10.8696 & 0 \\ 0 & 0 & 5.8824 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0025 \\ -0.0554 \end{bmatrix} \tag{205}$$

El vector resultado del flujo de carga del anterior calculo es:

$$\begin{bmatrix} P_{L1} \\ P_{L2} \\ P_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4243 \\ 57.4243 \\ 32.5757 \end{bmatrix} [MW] \tag{206}$$

Como se mencinó anteriormente, este método no requiere de más iteraciones y por tanto se da por termiando el ejercicio.

5.4.3. *Solución del flujo en DC utilizando Fluxtool*

Una vez se ingresan los datos del problema en el software, los resultados finales de los ángulos nodales y flujos de carga en DC se observan en la Figura 71.

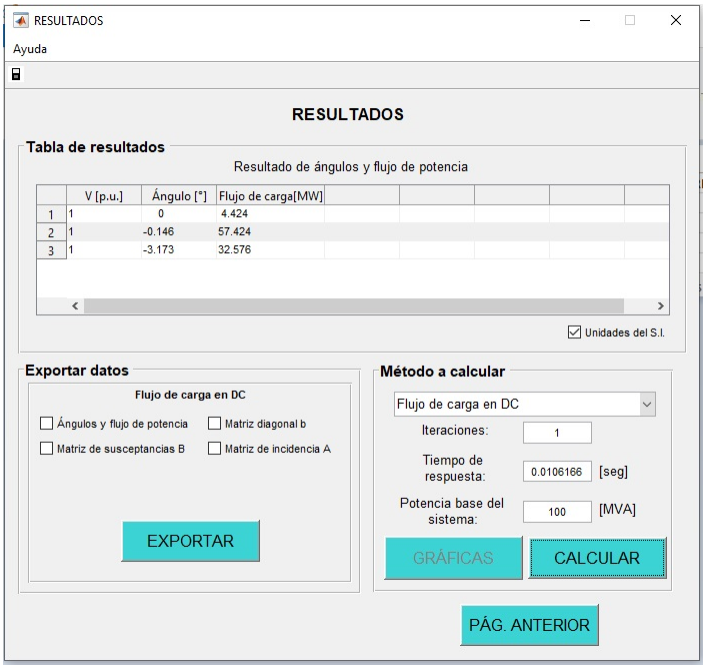


Figura 71: Resultados con Fluxtool para el flujo de carga en DC - Caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia una única iteración para solucionar el problema planteado, además de esto, el programa muestra las variables de ángulo en los nodos y el flujo de potencia activa en DC.

La Tabla 67 muestra la comparación y error de los resultados de ángulos y flujos de carga, mediante la solución teórica y la solución por medio del software Fluxtool para el caso 4 con el método de Flujo de carga en DC.

TABLA DE RESULTADOS DE ERROR EN ÁNGULOS Y FLUJOS DE CARGA							
		Resultados teóricos		Resultados Fluxtool		Error %	
Iteraciones	Línea	Ángulo [°]	Flujo [MW]	Ángulo [°]	Flujo [MW]	Ángulo	Flujo
1	1	0	4.4243	0	4.424	0	0
	2	−0.1460	57.4243	−0.146	57.424	0	−0.00142
	3	−3.1730	32.5757	−3.173	32.576	0	0.001

Tabla 67: Comparativo de ángulos y flujos entre resultados teóricos y resultados con Fluxtool para el Flujo de carga en DC - Caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que en ningún caso el error de los ángulos en los nodos y flujos de carga superan el 1 %, lo cual demuestra que el software realizado en el presente proyecto es totalmente funcional.

6. CONCLUSIONES

Se elaboró un programa para el cálculo del flujo de potencia en sistemas eléctricos utilizando el software MATLAB, empleando los métodos numéricos iterativos Gauss-Seidel, Newton Raphson y sus algoritmos de cálculo acelerados y análisis bajo corriente directa. Enfocado en que sea utilizado por estudiantes para que les permita extraer información de importancia que no entregan otros softwares y así puedan mejorar sus prácticas de estudio.

Se demuestra que es posible crear una herramienta utilizando un software de programación para ayudar a resolver problemas y ejercicios de estudio de diferentes asignaturas que estén relacionadas con las ciencias exactas.

Cuando se trabaja con modelos matemáticos de tipo iterativo y se quiere evaluar la respuesta con valores dados por un software comercial, se debe definir que se esté trabajando con el mismo error de tolerancia, dado que dichos softwares manejan un valor de error muy pequeño y esto hace que realicen muchas más iteraciones y por tanto, entregan una respuesta más próxima que va a diferir con los datos calculados teóricamente.

Se logró probar el software desarrollado en el presente proyecto con diferentes casos de estudio, comparando las variables de tensión, ángulo, flujo de carga y pérdidas de pontecia en los elementos, con los diferentes métodos iterativos. Para los casos desarrollados teóricamente, el error obtenido fue inferior al 1 %, al igual que los resultados de error en la comparación de las variables ya mencionadas entregados por Fluxtool y el software ETAP, con la excepción que se presentó en el método de Gauss-Seidel, donde hubo errores entre el 1 % y 7 % debido al error de convergencia estándar que maneja ETAP, el cual es mucho menor al error de convergencia establecido en los enunciados de los casos 2 y 3.

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

[1] J. Grainger and W. J. Stevenson, Analisis de Sistemas de Potencia. México, 1996.

[2] O. Line, A. S. Control, D. Adquisition, and T. Line, "Flujo de Potencia," pp. 1–27.

[3] A. BARON and L. FLORES, INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE POTENCIA VOL III. .

[4] A. Barón and F. Luis, Introducción al análisis de sistemas de potencia. Bogotá, 1993.

[5] R. Seminario, "Metodos Númericos Para Ingenieria," Libro, p. 69, 2012.

[6] T. Load and F. Problem, "Appendix A DC Load Flow."

[7] G. A. GUTIERREZ MONSALVE, "Estudio Comparativo Sobre Metodologias De Flujo De Potencia En Sistemas De Distribucion," vol. 1, p. 180, 2008.

[8] S. Isa, "Power Flow Analysis Software Using Matlab," pp. 1–24, 2014.

[9] Y. Liang, "Improved Gauss-Seidel iterative method on power networks," 2004.

[10] U. Eminoglu, T. Gözel, and M. H. Hocaoglu, "DSPFAP: Distribution systems power flow analysis package using matlab graphical user interface (GUI)," Comput. Appl. Eng. Educ., vol. 18, no. 1, pp. 1–13, 2010.

[11] F. Quille, "Optimización de flujo de potencia en el sistema eléctrico ecuatoriano con programación no lineal bajo Matlab," Univ. Politécnica Sales., p. 104, 2015.

[12] J. Arturo, P. Venzor, O. N. Ortega, N. Abraham, and C. Nevarez, "Interfaz gráfica para el cálculo de flujos de potencia en redes eléctricas Introducción Métodos," no. 56, pp. 226–233, 2015.

[13] J. F. Bedoya Villamil and W. F. Isaza Perez, "Estabilidad de tensión por el método de análisis modal en el sistema electrico de Pereira," p. 37, 2011.

[14] H. Saadat, Power System Analysis. USA. pp. 251, 1999.

[15] Operation Technology Inc. (2014). ETAP® (12.6) [Software]. Recuperado de https://etap.com/es/company/about-us.

[16] A. Jahic, T. Konjic, " Powet System Fault Direction, Classification and Location using Artificial Neural Networks". ISAPS, 4-5, 2017.

8. ANEXOS

Anexo 1: Manual general de usuario para el programa Fluxtool

Anexo 2: Ejemplo práctico para el uso correcto de Fluxtool.