



1859



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Programa computacional en Python para resolver Flujos de potencia del  
Sistema Eléctrico de Potencia.

Trabajo de Integración Curricular  
previo a la obtención del título de  
Ingeniero Electromecánico

AUTOR:

Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez

DIRECTOR:

Ing. Julio Roberto Gómez Peña Mg. Sc

Loja - Ecuador

2025

## Certificación

Loja, 14 de marzo de 2025

Ing. Julio Roberto Gómez Peña Mg. Sc

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Programa computacional en Python para resolver flujos de potencia del sistema eléctrico de potencia**, previo a la obtención del título de Ingeniero electromecánico, de la autoría del estudiante **Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez** con **cédula de identidad Nro. 1105176711**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



**Ing. Julio Roberto Gómez Peña Mg. Sc**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN**

**CURRICULAR**

## **Autoría**

Yo, **Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula de identidad:** 1105176711

**Fecha:** 13 de marzo de 2025

**Correo electrónico:** [gilson.jaramillo@unl.edu.ec](mailto:gilson.jaramillo@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0980181745

## Carta de autorización

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.**

Yo **Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez** declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Programa computacional en Python para resolver flujos de potencia del sistema eléctrico de potencia**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero electromecánico**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los catorce días del mes de enero del dos mil veinticinco.

**Firma:**



**Autor:** Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez

**Cédula de identidad:** 1105176711

**Dirección:** Barrio Bolonia

**Correo electrónico:** [gilson.jaramillo@unl.edu.ec](mailto:gilson.jaramillo@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0980181745

## **Dedicatoria**

A mi hermano Cristian, quien ha brindado su apoyo constante en cada etapa de mi vida, y ha sido un pilar fundamental para superar los desafíos que han surgido durante el transcurso de mi formación profesional. A mi papá Carlos y mi mamá Melva, que con esfuerzo y dedicación han sido la base que ha respaldado mi educación y formación en valores. A mis amigos quienes, han compartido emocionantes momentos de mi vida y han sido compañeros leales en este viaje.

*Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez*

### **Agradecimientos**

A mis maestros, quienes han cultivado en mí la curiosidad por la investigación y la búsqueda de soluciones apropiadas. Su influencia ha estimulado el desarrollo del pensamiento crítico y ha impulsado mi incesante búsqueda de conocimiento. A la Universidad Nacional de Loja, a la carrera de Ingeniería Electromecánica y a toda su planta docente, quienes han permitido desarrollar los conocimientos teóricos y prácticos que contribuyeron a la formación académica y profesional.

***Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez***

## Índice de contenidos

<b><u>PORTADA</u></b> .....	<b><u>I</u></b>
<b><u>CERTIFICACIÓN</u></b> .....	<b><u>II</u></b>
<b><u>AUTORÍA</u></b> .....	<b><u>III</u></b>
<b><u>CARTA DE AUTORIZACIÓN</u></b> .....	<b><u>IV</u></b>
<b><u>DEDICATORIA</u></b> .....	<b><u>V</u></b>
<b><u>AGRADECIMIENTOS</u></b> .....	<b><u>VI</u></b>
<b><u>ÍNDICE DE CONTENIDOS</u></b> .....	<b><u>VII</u></b>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i> .....	<i>X</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>XI</i>
<i>SIMBOLOGÍA</i> .....	<i>XV</i>
<b><u>1. TÍTULO</u></b> .....	<b><u>1</u></b>
<b><u>2. RESUMEN / ABSTRACT</u></b> .....	<b><u>2</u></b>
<b><u>3. INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b><u>4</u></b>
<b><u>4. MARCO TEÓRICO</u></b> .....	<b><u>6</u></b>
<b>4.1 CAPÍTULO I: SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA</b> .....	<b>6</b>
4.1.1 DIAGRAMA UNIFILAR .....	7
4.1.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN SEP .....	7
4.1.3 CANTIDADES POR UNIDAD .....	10
4.1.4 SELECCIÓN DE LA BASE PARA LOS VALORES POR UNIDAD .....	11
4.1.5 CAMBIO DE BASE.....	11
4.1.6 REPRESENTACIÓN DE LÍNEAS .....	11
4.1.7 SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO .....	11

<b>4.2</b>	<b>CAPÍTULO II: MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE POTENCIA</b>	<b>14</b>
4.2.1	CLASIFICACIÓN DE BARRAS	15
4.2.2	MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL	15
4.2.3	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	16
4.2.4	MÉTODO DESACOPLOADO RÁPIDO	17
<b>4.3</b>	<b>CAPÍTULO III: EL MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL</b>	<b>17</b>
4.3.1	CONVERGENCIA DEL MÉTODO GAUSS-SEIDEL	19
<b>4.4</b>	<b>CAPÍTULO IV: TRÁNSITO DE POTENCIA</b>	<b>19</b>
4.4.1	PÉRDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	20
<b>4.5</b>	<b>CAPÍTULO V: ELEMENTOS PARA LA REGULACIÓN DE VOLTAJE</b>	<b>20</b>
4.5.1	TRANSFORMADORES CON TAPS PARA EL FLUJO DE POTENCIA	21
4.5.2	BANCO DE CAPACITORES EN EL FLUJO DE POTENCIA	22
4.5.3	MOTORES SÍNCRONOS	22
<b>4.6</b>	<b>CAPÍTULO V: PYTHON</b>	<b>22</b>
4.6.1	ENTORNOS DE DESARROLLO INTEGRADO (IDE)	23
<b>4.7</b>	<b>CAPÍTULO VII: FUNCIONES UTILIZADAS EN PYTHON</b>	<b>23</b>
4.7.1	LIBRERÍAS	23
<b>4.8</b>	<b>CAPÍTULO VI: BASE DE DATOS</b>	<b>24</b>
4.8.1	BASES DE DATOS	25
4.8.2	ARCHIVOS DE TEXTO PLANO EN PYTHON	26
<b>5.</b>	<b><u>METODOLOGÍA</u></b>	<b><u>27</u></b>
<b>5.1</b>	<b>ÁREA DE TRABAJO</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>EQUIPOS Y MATERIALES</b>	<b>28</b>
5.2.1	EQUIPOS	28
5.2.2	MATERIALES	28
<b>5.3</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>28</b>
5.3.1	PRIMERO OBJETIVO	29
5.3.2	SEGUNDO OBJETIVO	37
5.3.3	TERCER OBJETIVO	43
<b>5.4</b>	<b>PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS</b>	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b><u>RESULTADOS</u></b>	<b><u>50</u></b>

<b>6.1</b>	<b>OBJETIVO 1.....</b>	<b>50</b>
<b>6.2</b>	<b>OBJETIVO 2.....</b>	<b>58</b>
<b>6.3</b>	<b>OBJETIVO 3.....</b>	<b>64</b>
<b><u>7.</u></b>	<b><u>DISCUSIÓN.....</u></b>	<b><u>67</u></b>
<b><u>8.</u></b>	<b><u>CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>69</u></b>
<b><u>9.</u></b>	<b><u>RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b><u>71</u></b>
<b><u>10.</u></b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>72</u></b>
<b><u>11.</u></b>	<b><u>ANEXOS.....</u></b>	<b><u>75</u></b>

## *Índice de tablas*

<b>Tabla 1:</b> Términos del jacobiano para el método de Newton-Raphson. ....	17
<b>Tabla 2:</b> Variables manejadas en el método Gauss-Seidel.....	18
<b>Tabla 3:</b> Datos de las líneas de la red del problema 1.....	50
<b>Tabla 4:</b> Datos de los nudos para la red del problema 1. ....	50
<b>Tabla 5:</b> Variables conocidas e incógnitas del problema 1.....	50
<b>Tabla 6:</b> Resultados del problema 1.....	51
<b>Tabla 7 :</b> Resumen de datos obtenidos del programa.....	52
<b>Tabla 8 :</b> Comparación de voltajes Problema 1. ....	53
<b>Tabla 9 :</b> Comparación de ángulos Problema 1. ....	53
<b>Tabla 10:</b> Comparación de potencia (P) Problema 1. ....	54
<b>Tabla 11 :</b> Comparación de potencia reactiva (Q) Problema 1. ....	54
<b>Tabla 12:</b> Datos de barra del sistema IEEE de 9 barras. ....	56
<b>Tabla 13:</b> Datos de líneas del sistema IEEE de 9 barras. ....	56
<b>Tabla 14:</b> Solución del flujo de potencia del sistema IEEE de 9 barras.....	57
<b>Tabla 15:</b> Comparación de resultados del sistema IEEE de 9 barras. ....	57
<b>Tabla 16:</b> Datos de líneas del sistema descrito.....	59
<b>Tabla 17:</b> Datos de la barra para el sistema descrito.....	59
<b>Tabla 18:</b> Datos del transformador del sistema.....	59
<b>Tabla 19:</b> Datos del capacitor del sistema.....	60
<b>Tabla 20:</b> Comparación de voltajes Problema 2. ....	62
<b>Tabla 21:</b> Comparación de datos incorporando un motor síncrono. ....	63
<b>Tabla 22:</b> Comparación del cambio de motor.....	65
<b>Tabla 23:</b> Comparación del cambio de la derivación del transformador. ....	66

## *Índice de figuras*

<b>Figura 1:</b> Diagrama unifilar de un SEP.....	7
<b>Figura 2:</b> Simbología del Generador.....	8
<b>Figura 3:</b> Simbología del transformador .....	8
<b>Figura 4:</b> Simbología de la línea de transmisión.....	9
<b>Figura 5:</b> Subestación.....	9
<b>Figura 6:</b> Red de distribución.....	10
<b>Figura 7:</b> Sistema Nacional de Transmisión.....	13
<b>Figura 8:</b> Distribución eléctrica en Ecuador.....	14
<b>Figura 9:</b> Transformador con relación de vueltas $1/t$ .....	21
<b>Figura 10:</b> Circuito equivalente del transformador.....	21
<b>Figura 11:</b> Modelo del capacitor.....	22
<b>Figura 12:</b> Modelo de compensador síncrono.....	22
<b>Figura 13:</b> Área de trabajo .....	27
<b>Figura 14:</b> Almacenamiento de variables .....	30
<b>Figura 15:</b> Proceso de ingreso de datos de líneas .....	30
<b>Figura 16:</b> Proceso resolver Ybarra .....	31
<b>Figura 17:</b> Ingresos de datos en barra Slack .....	32
<b>Figura 18:</b> Ingresos de datos en barras PQ.....	32
<b>Figura 19:</b> Ingresos de datos en barras PV.....	32
<b>Figura 20:</b> Proceso de arranque plano en el método Gauss-Seidel.....	33
<b>Figura 21:</b> Proceso iterativo considerando un error de convergencia.....	34
<b>Figura 22:</b> Cálculo de error y convergencia.....	35
<b>Figura 23:</b> Proceso para el cálculo del flujo de potencia.....	36
<b>Figura 24:</b> Ajuste de potencia en barra Slack .....	36
<b>Figura 25:</b> Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada.....	37
<b>Figura 26:</b> Proceso de ingreso de datos de líneas y transformadores.....	38
<b>Figura 27:</b> Proceso del cálculo de la Ybarra considerando capacitores.....	39
<b>Figura 28:</b> Ingreso de datos de los capacitores.....	40
<b>Figura 29:</b> Modificación del capacitor.....	40
<b>Figura 30:</b> Proceso para obtener la potencia considerando carga de motores síncronos.....	40
<b>Figura 31:</b> Ingresos de datos de motor síncrono.....	41
<b>Figura 32:</b> Modificaciones del motor síncrono.....	41

<b>Figura 33:</b> Proceso del cálculo de la Ybarra considerando transformadores con tap, capacitores.....	42
<b>Figura 34:</b> Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada con corrección de voltaje. ....	43
<b>Figura 35:</b> Almacenamiento de datos en un archivo txt .....	44
<b>Figura 36:</b> Lectura y recuperación de datos de un archivo. ....	44
<b>Figura 37:</b> Código para modificar los datos de líneas.....	45
<b>Figura 38:</b> Código para modificar los datos del transformador .....	45
<b>Figura 39:</b> Código para modificar los datos del capacitor. ....	46
<b>Figura 40:</b> Código para modificar los datos de motor síncrono.....	46
<b>Figura 41:</b> Proceso para la modificación de los datos.....	47
<b>Figura 42:</b> Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada con almacenamiento de datos	48
<b>Figura 43:</b> Esquema unifilar de la red del Problema 1. ....	50
<b>Figura 44:</b> Ybarra obtenida del programa.....	51
<b>Figura 45:</b> Ybarra del sistema .....	51
<b>Figura 46:</b> Resultados obtenidos del programa.....	52
<b>Figura 47:</b> Esquema del problema en PowerWorld. ....	52
<b>Figura 48:</b> Resultados obtenidos del PowerWorld.....	53
<b>Figura 49:</b> Resultados finales Problema 1. ....	54
<b>Figura 50:</b> Simulación de límite en PowerWorld .....	55
<b>Figura 51:</b> Desarrollo de la función de límites en barras PV.....	55
<b>Figura 52:</b> Sistema IEEE de 9 barras. ....	55
<b>Figura 53:</b> Resultados obtenidos mediante el programa del sistema IEEE de 9 barras.....	57
<b>Figura 54:</b> Resultados de la simulación del sistema IEEE de 9 barras. ....	57
<b>Figura 55:</b> Problema modelo 2.....	58
<b>Figura 56:</b> Resultados Ybarra del problema modelo 2. ....	60
<b>Figura 57:</b> Simulación del problema modelo 2 en el programa PowerWorld .....	61
<b>Figura 58:</b> Resultados Ybarra obtenido de programa Powerworld.....	61
<b>Figura 59:</b> Resultados obtenidos de la herramienta desarrollada.....	62
<b>Figura 60:</b> Resultados obtenidos de la simulación de PowerWorld.....	62
<b>Figura 61:</b> Modificaciones a los resultados obtenidos. ....	63
<b>Figura 62:</b> Almacenamiento del número de barras .....	64
<b>Figura 63:</b> Almacenamiento de los datos de líneas.....	64
<b>Figura 64:</b> Almacenamiento de los datos de cada barra .....	64
<b>Figura 65:</b> Almacenamiento de los resultados. ....	64

<b>Figura 66:</b> Procedimiento para modificar los datos de motores síncronos. ....	65
<b>Figura 67:</b> Resultados al cambiar la carga del motor síncrono. ....	65
<b>Figura 68:</b> Procedimiento para modificar los datos del transformador. ....	66
<b>Figura 69:</b> Resultados al cambiar la derivación del transformador. ....	66

*Índice de anexos*

<b>Anexo 1:</b> Datos y resultados de problema modelo 1 sin límites.....	75
<b>Anexo 2:</b> Datos y resultados de problema modelo 1 con límites.....	75
<b>Anexo 3:</b> Datos y resultado del problema modelo 2.....	75
<b>Anexo 4:</b> Datos y resultado del problema modelo 2 añadiendo un motor síncrono con carga 40 Mvar en la barra 3. ....	76
<b>Anexo 5:</b> Datos y resultado del problema modelo 2 añadiendo un motor síncrono con carga 60 Mvar en la barra 3. ....	76
<b>Anexo 6:</b> Datos y resultado del problema modelo 2 cambiando la derivación del transformador a 0,95. ....	77
<b>Anexo 7:</b> Certificado de traducción del resumen .....	78

### *Simbología*

$V_B$ = corresponde a la tensión base.

$S_B$ = corresponde a la potencia base.

$I_B$ = corresponde a la corriente base.

$Z_B$ = corresponde a la impedancia base.

P: es la potencia activa.

Q: es la potencia reactiva.

k: es el número correspondiente a la iteración.

G: es la parte real de la admitancia, denominada conductancia

B: es la parte imaginaria de la admitancia, denominada susceptancia.

$\theta$ : representa el ángulo.

$\varepsilon$ : es un valor de tolerancia lo suficientemente pequeño.

$\alpha$ : es el factor de aceleración.

Y: admitancia.

X: reactancia.

$Y_{barra}$ : Matriz de admitancia,  $Y_{bus}$ .

t: derivación del transformador.

## **1. Título**

**Programa computacional en Python para resolver Flujos de potencia del Sistema Eléctrico de Potencia.**

## 2. Resumen / Abstract

El análisis de flujo de potencia desempeña un papel fundamental en la planificación y diseños de futuras expansiones del sistema eléctricos, así como en la determinación de las condiciones óptimas de operación de sistemas existentes. Este es un proceso iterativo que demanda una baja tolerancia al error, por esta razón, es esencial desarrollar herramientas que faciliten la solución de los métodos aplicados, garantizando eficiencia y precisión en los resultados. En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar un algoritmo en Python para la solución de flujos de potencia. La primera parte consiste en el desarrollo del algoritmo basado en el método Gauss-Seidel. Posteriormente, se han incorporados elementos de regulación de voltaje para desarrollar un análisis más completo. Específicamente se ha modelado el tap de transformador, los bancos de capacitores y los motores síncronos. En cuanto al almacenamiento de datos, se ha optado por utilizar un archivo de texto plano. En este archivo se almacenan dos tipos de datos: el primero corresponde a los valores iniciales de líneas y barras, y el segundo, corresponde a los resultados obtenidos de solución del flujo de potencia. Además, el archivo de texto permite acceder fácilmente a los datos iniciales, modificar estos valores y obtener variaciones en los resultados. Para validar el funcionamiento del algoritmo desarrollado se han resuelto problemas modelo, y utilizando el programa PowerWorld se han comparado los resultados, el error calculado es pequeño, por lo general menor a  $10^{-3}\%$ , lo que ha permitido validar la precisión y la eficacia del algoritmo.

*Palabras clave: Gauss-Seidel, regulación de voltaje, SEP, transformador.*

## **Abstract**

Power flow analysis is fundamental for planning and designing future power system expansions and determining the optimal operating conditions of existing systems. This iterative process requires a low error tolerance, making it essential to develop tools that ensure efficiency and accuracy in applying the methods. In this context, the primary objective of this research is to develop a Python algorithm for solving power flows. The first part consists of developing the algorithm based on the Gauss-Seidel method. Subsequently, voltage regulation elements have been incorporated to develop a more complete analysis. Specifically, the transformer tap, capacitor banks, and synchronous motors have been modeled. In terms of data storage, we have chosen to use a plain text file. Two types of data are stored in this file: the first corresponds to the initial values of the lines and busbars, and the second corresponds to the results obtained from the power flow solution. In addition, the text file allows easy access to the initial data, to modify these values and to obtain variations in the results. To validate the performance of the developed algorithm, model problems were solved, and the results were compared with the PowerWorld program. The calculated error is small, generally less than, which has allowed validation of the accuracy and efficiency of the algorithm.

**Keywords:** *Gauss-Seidel, voltage regulation, SEP, transformer.*

### 3. Introducción

El trabajo de investigación está enfocado en el desarrollo de una herramienta de carácter académico que cumple la función de analizar los flujos de cargas en los sistemas de eléctricos de potencia; para ello, se desarrolla una herramienta diseñada en Python la cual incluirá el modelado de elementos de corrección de voltaje, tales como ajustes en los transformadores, bancos de capacitores, y motores síncronos. Es importante señalar que el modelamiento y la simulación de los sistemas eléctricos, incluido el análisis de flujo de potencia, son estudios importantes en la optimización de las operaciones del sistema. Estos análisis no solo facilitan el desarrollo óptimo de las operaciones, sino que también permiten evaluar una futura ampliación del sistema eléctrico. Además, posibilitan la gestión de la generación, las cargas, el consumo, la distribución y otros elementos. También, el estudio de estos sistemas permite determinar el comportamiento en condiciones normales de operación y también en casos de emergencia.

Para la resolución de problemas de flujo de potencia, se han desarrollado varios métodos iterativos, entre los que se incluyen el método de Gauss-Seidel, el método de Newton-Raphson y el método de desacoplamiento rápido. Debido a que el análisis de flujo de potencia requiere de un proceso con una baja tolerancia al error, resulta esencial desarrollar herramientas que faciliten la solución de los métodos aplicados, garantizando eficiencia y precisión en los resultados.

Debido al desconocimiento de una herramienta computacional en Python que permita resolver de flujos de potencia y que incorpore el modelamiento de elementos de regulación de voltaje, se ha planteado el siguiente problema: “Falta de una herramienta práctica basada en Python a nivel educativo para el análisis de flujo de potencia en la FEIRNNR”.

Entonces, el proyecto de investigación surge de la necesidad de desarrollar una herramienta a nivel educativo, esta herramienta se desarrolló en Python con la finalidad de resolver flujos de potencia; además, no solo incluye el modelado de los elementos de regulación de voltaje, como, el ajuste por tap del transformador, la incorporación de banco de capacitores y/o de motores síncronos, sino que, también abarca un sistema de almacenamiento y gestión de resultados.

El desarrollo de esta investigación permite comprender el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia, el flujo de carga y los elementos de regulación de voltaje. Asimismo, busca contribuir a una mejora en la eficiencia y planificación de la generación eléctrica, siendo de interés para la comunidad científica y académica que estudia los sistemas

eléctricos de potencia. Además, esta herramienta puede ser utilizada como recurso académico para el aprendizaje de los sistemas eléctricos de potencia.

Se han encontrado trabajos relacionados con el desarrollo de herramientas para el análisis de flujo de potencia. Una de estas investigaciones es desarrollada por Tenelema (2019) en el trabajo: “Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados”. En este estudio, se utilizó Matlab® y una interfaz gráfica para desarrollar una aplicación que resuelve problemas de flujos de potencia. Por otra parte, Oleas (2019) abordó el tema en su trabajo “Control de voltaje en sistemas eléctricos de potencia usando transformadores con taps”, utilizando también Matlab® y el método de Newton-Raphson.

Los trabajos mencionados son modelos de herramientas computacionales, y cada una de ellos tiene un criterio de desarrollo diferente, abordando distintos tipos de temas con respecto al análisis de flujos de potencia. Asimismo, existen más trabajos de investigación que brindan un análisis más detallado a los otros métodos. Por otro lado, la investigación surge de la siguiente hipótesis: El desarrollo de la herramienta permitirá un mejor análisis de los flujos de carga en los sistemas eléctricos de potencia.

El objetivo general que guía a la investigación es: “Desarrollar un algoritmo para análisis de flujos de potencia.”

Del cual se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un algoritmo en lenguaje Python para el análisis de flujo de potencia basado en el método de Gauss-Seidel.
- Modelar en el algoritmo elementos que permitan la corrección de voltaje, tales como, el tap del transformador, agregar bancos de capacitores y considerar motores síncronos.
- Implementar en el algoritmo un sistema de almacenamiento y gestión de resultados a través de base de datos.

## 4. Marco teórico

### 4.1 Capítulo I: Sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP), son los encargados de suministrar energía eléctrica de manera continua a los centros de distribución y, posteriormente, a los centros de consumo. Por consiguiente, la interrupción en el suministro de energía puede tener impactos negativos en el sistema, debido a que la energía eléctrica no se almacena en grandes cantidades. Además, la energía suministrada debe cumplir con ciertas condiciones de calidad para garantizar el funcionamiento adecuado de los equipos conectados a la red sin comprometer su integridad (Ramírez, 2005).

Esto quiere decir que, la energía eléctrica suministrada debe mantener una calidad adecuada para poder manejar todo tipo de cargas. Además, el suministro eléctrico está en la obligación de ser confiable y mantener la calidad del servicio, ya que, si existen inconvenientes, estos causarán situaciones de riesgo, problemas técnicos y producción, así como importantes pérdidas económicas.

A continuación, se presenta la definición dada por Landa (2010) acerca de los sistemas eléctricos de potencia:

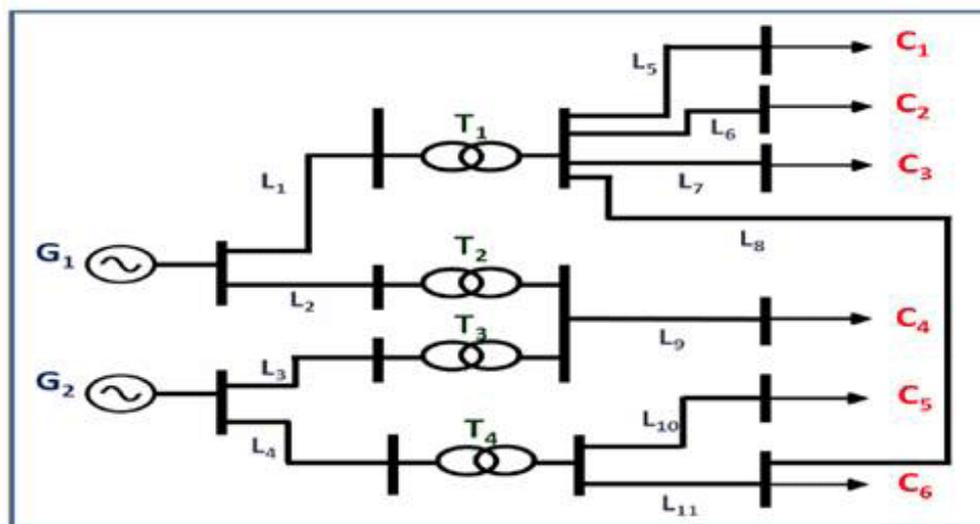
Un sistema eléctrico de potencia consiste en una gran diversidad de cargas eléctricas repartidas en una región en las plantas generadoras para producir la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas generadoras a los puntos de consumo y todo el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de la continuidad de servicio, de regulación de la tensión y de control de frecuencia requeridas. (p. 25)

Por otra parte, los sistemas eléctricos se encuentran compuestos por tres elementos: generación, transmisión y distribución. En el primero, la generación se ocupa de transformar la energía primaria en energía mecánica de rotación, luego, con ayuda de un generador, se convierte en energía eléctrica. En cambio, en la transmisión se transportan grandes cantidades de energía eléctrica desde los centros de producción a los centros de consumo, mediante las líneas de transmisión que permiten el desplazamiento de la energía. Por último, con respecto a la distribución, esta se encarga de transportar la energía eléctrica desde los centros de consumo a los usuarios finales, a través de las líneas de distribución y de los transformadores. Entonces, cada uno de estos elementos requieren de dispositivos para el correcto funcionamiento (Matulic, 2003).

### 4.1.1 Diagrama unifilar

El diagrama unifilar, también conocido como diagrama de una línea, es una representación simplificada de un circuito eléctrico. Generalmente, una forma de representarlo es el de un circuito equivalente monofásico, en el cual se incluye una de sus líneas y el neutro de retorno. En muchos casos, se simplifica aún más el diagrama al omitir el neutro del circuito y al utilizar símbolos estándar para indicar los elementos que componen la red, pero, se excluyen los valores referenciales del sistema. Además, las líneas de transmisión se simbolizan mediante una sola línea entre los nodos o barras (Grainger & Stevenson, 2001).

En la **Figura 1** muestra el diagrama unifilar de un SEP. Su objetivo principal es proporcionar información significativa sobre el sistema.



**Figura 1:** Diagrama unifilar de un SEP.

**Fuente:** Manfre y Brea (2015).

### 4.1.2 Elementos constitutivos de un SEP

Como se ha mencionado, un sistema eléctrico de potencia se encuentra formado por un conjunto de subsistemas, y estos a la vez están compuestos por cinco elementos: generación, transmisión, subestaciones, distribución y consumo. En estos elementos se incluyen componentes encargados de mejorar la calidad, confiabilidad y seguridad de la energía suministrada, además permiten reducir los costos energéticos al usuario o consumidor.

#### 4.1.2.1 Generadores

Como señala Toctaquiza (s.f), los generadores desempeñan el papel fundamental de producir la energía eléctrica del sistema. En este elemento se diseñan centrales que utilizan las fuentes de energías primarias para generar energía eléctrica, mediante el uso de una turbina y un alternador, y así producir una corriente con forma senoidal.

En la **Figura 2** se presenta la simbología utilizada para representar al generador.



**Figura 2:** Simbología del Generador.

**Fuente:** <https://n9.cl/olw86>

Entre las fuentes de generación más conocidas se encuentran:

- Central térmica
- Central Hidroeléctrica
- Central Nuclear
- Central Eólica
- Central Geotérmica
- Central Fotovoltaica

#### **4.1.2.2 Transformador**

Gómez et al. (2010) indican que el transformador, también conocido como transformador de potencia, es otro de los elementos fundamentales en las redes eléctricas. Estos dispositivos son utilizados para elevar, reducir o regular los niveles de las tensiones en la red eléctrica. En la **Figura 3** se presenta la simbología utilizada para representar el transformador.



**Figura 3:** Simbología del transformador.

**Fuente:** <https://n9.cl/3loif>

#### **4.1.2.3 Líneas de transmisión**

Acerca de líneas de transmisión, Pérez (2007) recalca que, “las líneas de transmisión encuentran numerosas aplicaciones no solo en el transporte de señales entre una fuente y una carga, sino también como circuitos resonantes, filtros y acopladores de impedancia” (p. 279). La simbología utilizada para representarla se indica en **Figura 4**.

---

**Figura 4:** Simbología de la línea de transmisión.

**Fuente:** <https://n9.cl/9bdnl>

#### 4.1.2.4 Subestaciones

Trashorras (2015) menciona que, las subestaciones eléctricas se encuentran formada por la aparata eléctrica y otros elementos que son necesarios para llevar a cabo diversas funciones, tales como: aumentar o disminuir los valores de tensión, controlar la frecuencia en la red, rectificar la corriente, compensar el factor de potencia, verificar el número de fases, conectar con otras redes o circuitos, entre otras. En la **Figura 5** se muestra un ejemplo de subestación eléctrica ubicada en Ecuador.



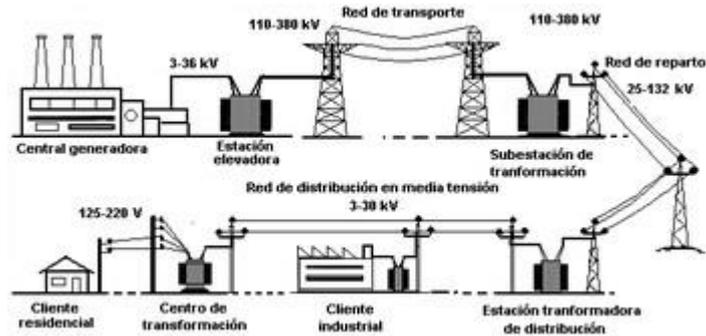
**Figura 5:** Subestación.

**Fuente:** <https://n9.cl/1mb2i>

#### 4.1.2.5 Redes de distribución

Toctaquiza (s.f) indica respecto a las redes de distribución: “son redes que se encuentran en zonas urbanas o rurales las cuales se encargan de hacer llegar a los diferentes usuarios, pueden ser aéreas o subterráneas” (p. 2)

Por ejemplo, en la **Figura 6** se muestra un diagrama del suministro eléctrico donde se indican las redes de distribución.



**Figura 6:** Red de distribución.

**Fuente:** <https://n9.cl/y9ibd>

### 4.1.3 Cantidades por unidad

Dado que las líneas de transmisión están diseñadas para transportar grandes cantidades de potencia, es común expresar los valores de voltaje en kilovoltios, mientras que los valores de potencia se suelen expresar en megawatts y en megavoltioamperio. Sin embargo, para simplificar estas cantidades, se suelen expresar en porcentaje o por unidad de un valor de base o de referencia especificado para cada una de ellas.

Con respecto al valor por unidad, Grainger y Stevenson (2001) indican que la cantidad y su base se encuentran directamente vinculadas, y esta relación se suele expresar de forma decimal. Por otra parte, existe otra relación denominada en por ciento, que toma un valor de 100 veces el de por unidad.

Ambos métodos son más comprensibles e indican de manera más clara la información, en comparación con el sistema internacional de unidades.

Como se indica en la **Ecuación (1)**, para realizar el cambio al valor por unidad (p.u.) de una variable, esta se debe dividir por el valor base o de referencia:

$$valor_{p.u.} = \frac{valor\ de\ la\ variable}{valor\ base} \quad (1)$$

Es importante el manejo de los valores base, ya que al especificar alguno de los valores base de parámetros como el voltaje, corriente, potencia e impedancia, se puede calcular el resto de ellos con solo indicar al menos dos de estos, dado que se encuentran relacionados entre sí.

En caso de un sistema monofásico, dada la tensión y la potencia,  $V_B$ ,  $S_B$ , el resto de las magnitudes base se hallan a partir de las **Ecuaciones (2) y (3)**:

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{V_{B1}} \quad (2)$$

$$Z_{B1} = \frac{V_{B1}^2}{S_{B1}} \quad (3)$$

Donde:

$I_{B1}$ : corresponde a la corriente.

$Z_{B1}$ : corresponde a la impedancia.

#### **4.1.4 Selección de la base para los valores por unidad**

Entonces, para convertir los valores de potencia y voltaje en valores por unidad se debe elegir sus valores base respectivos, con el objetivo de disminuir los procesos de conversiones de unidades, de tal manera que al seleccionar la base esta debe ser capaz de llevar la mayoría de valores a por unidad (Stevenson, 1986).

De esta forma, el cálculo se ve simplificado, primero se elige una base para una sección del circuito, luego se determinan las bases en las secciones restantes, procurando que solamente pocas magnitudes se deban convertir en una nueva base. Por otra parte, estas secciones se pueden identificar porque se encuentran divididas por transformadores.

#### **4.1.5 Cambio de base**

Con respecto a la impedancia de un elemento en un sistema dado, esta se expresa en valores por unidad, pero al emplear una base diferente a la principal, se debe transformar de una base a otra, ya que, al realizar los cálculos todas las impedancias del sistema deben indicarse con la misma relación de impedancia base (Grainger & Stevenson, 2001).

La **Ecuación (4)** es utilizada cuando se requiere cambiar una impedancia dada en por unidad sobre una nueva base, también dada en por unidad.

$$Z_{nueva} = Z_{dada} * \left( \frac{U_{B_{dados}} \text{ base}}{U_{B_{nuevos}} \text{ base}} \right)^2 * \left( \frac{S_{B_{nuevos}} \text{ base}}{S_{B_{dados}} \text{ base}} \right) \quad (4)$$

#### **4.1.6 Representación de líneas**

Según Grainger y Stevenson (2001) las líneas de transmisión se clasifican en: líneas cortas, líneas de longitud media y líneas de transmisión largas. Las líneas cortas, como su nombre indica, tienen una longitud pequeña que se encuentra por debajo de los 80 km, en cambio, las líneas medias están entre el rango de 80 km a 240 km de longitud, por último, las líneas de transmisión largas presentan longitudes mayores a 240 km. Además, en las líneas de transmisión largas es indispensable el uso de constantes para mejorar la exactitud del cálculo.

#### **4.1.7 Sistema eléctrico ecuatoriano**

##### **4.1.7.1 Estructura institucional**

Arros (2018) indica que la estructura institucional del Ecuador está formada por el Ministerio de coordinación de sectores estratégicos (MICSE); el Ministerio de Electricidad y

Energías Renovables (MEER); la Agencia de regulación y control de Electricidad (ARCONEL); y, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE).

#### **4.1.7.2 Cadena Productiva**

Como indica Arros (2018) “la cadena productiva de Ecuador se compone de tres agentes: generación, transmisión y distribución” (p. 10).

##### **4.1.7.2.1 Generación**

Cabe señalar que la generación de energía eléctrica en Ecuador está compuesta por todas las plantas de generación que se encuentran enlazadas al Sistema Nacional Interconectado. También es importante señalar que ninguna de esta empresa puede desempeñar funciones de transmisión o distribución, ya sea de manera independiente o a través de tercero, debido a las regulaciones establecidas por el Estado. Además, ninguna de estas empresas puede manejar más del 25% del volumen de generación del sistema Nacional (Arros, 2018).

##### **4.1.7.2.2 Transmisión**

Sobre la transmisión, Arros (2018) indica que en el Ecuador la empresa Transelectric es la encargada del transporte de energía eléctrica, y es responsable de la elaboración de un plan de expansión del sistema eléctrico, pero, la aprobación del plan estará a cargo del Organismo Regulador. Además, Transelectric forma parte de la Corporación Eléctrica de Ecuador CELEC EP.

Por otro lado, en la **Figura 7** se indica el mapa del Sistema Nacional de Transmisión, se indica con color rojo la línea de transmisión de 500 kV. Asimismo, se identifica con color azul las líneas de transmisión principales de 230 kV y con color negro las líneas de transmisión secundaria de 138 kV.



**Figura 7:** Sistema Nacional de Transmisión.

Fuente: <https://n9.cl/ryka5>

#### 4.1.7.2.3 Distribución

Por último, sobre la distribución, Arros (2018) señala que son las empresas titulares las encargadas de proporcionar el suministro de energía a los consumidores finales. Entonces, en la **Figura 8** se indica el reparto de las empresas encargadas de la distribución eléctrica en Ecuador, en donde se destaca a la empresa CNEL como la principal distribuidora de energía eléctrica.

El tipo de consumidor se divide en: consumidor regulado y grandes consumidores. Primero, se define al consumidor regulado como el tipo de consumidor que está obligado a cumplir con las regulaciones, tarifas y reglamentos establecidos por la Ley; estos consumidores se suelen caracterizar por un consumo no muy alto de potencia y reciben el servicio por medio de una empresa distribuidora. En cambio, los grandes consumidores son el tipo de consumidor que tienen un alto consumo de potencia, no inferior a 700 kW en un periodo de 6 meses, y que demuestra un consumo mínimo anual de 4 800 MWh.



**Figura 8:** Distribución eléctrica en Ecuador.

Fuente: **MERNNR** (2019)

## 4.2 Capítulo II: Modelos matemáticos para el análisis de flujo de potencia

El flujo de carga o flujo de potencia está orientado al cálculo de voltaje con su respectivo ángulo, potencia activa y reactiva, en todas las barras (nodos) de un sistema dado, ya sea que este corresponda a un sistema de transporte o de distribución de una red eléctrica. En el cálculo intervienen los valores relacionados con la potencia generada en las barras; de la misma manera, se consideran los consumos de las cargas en las barras (Gómez, Ramos, Macías, Ramos, & Santos, 2003).

Para obtener el flujo de potencia es necesario recurrir a un proceso iterativo, aplicando métodos basados en sistemas de ecuaciones no lineales, esto permite determinar los valores de voltaje en todos los nodos, y posteriormente encontrar los valores faltantes de potencia que definen al sistema. Inicialmente, se tienen valores de prueba para el método utilizado, y en cada iteración se avanzan los resultados hasta que estos convergen con un error muy bajo.

#### 4.2.1 Clasificación de barras

Chillán (2021) señala 3 tipos de barras a considerar en el análisis de flujos de potencia: la barra de carga (PQ), la barra de voltaje controlado (PV) y la barra de compensación (Slack).

La barra de carga, barra PQ o barra de voltaje no controlado, en este tipo de barra se indica la potencia activa y reactiva como una carga; comúnmente, no se indica una generación de potencia en esta barra considerando un valor de cero. Sus incógnitas son el voltaje y el ángulo.

Por otro lado, la barra de voltaje controlado, barra PV, es nombrada de esta manera debido a que la magnitud del voltaje indica debe mantenerse constante en todo el proceso iterativo. Sus incógnitas son la potencia reactiva y el ángulo del voltaje. Una vez determinada la potencia reactiva, se debe encontrar el nuevo valor complejo del voltaje, el cual debe ajustarse para cumplir lo anteriormente mencionado.

Por último, en la barra de compensación, barra slack, se especifica inicialmente el valor del voltaje y el ángulo correspondiente; estos valores permanecen sin cambio alguno a lo largo del proceso iterativo. Sin embargo, es necesario calcular la potencia activa y reactiva de la barra.

#### 4.2.2 Método de Gauss-Seidel

El método de Gauss-Seidel es un método iterativo para resolver problemas de flujos de potencia, su principal característica radica en su simplicidad y facilidad de comprensión. Sin embargo, el principal problema del método Gauss-Seidel es la convergencia lenta del resultado y esta es directamente proporcional al factor de aceleración. Este factor, llamado factor de aceleración, se utiliza para reducir el número de iteraciones necesarias para que el resultado converja y suele tomar valores entre 1,4 y 1,6.

Sobre la convergencia del método (Tenelema, 2019), indica que esta “se vuelve cada vez más lenta a medida que el tamaño del sistema se expande; y, por lo tanto, no es muy común emplearlo para estudios prácticos de flujo de carga que involucren flujos de potencia en redes complejas” (p. 4).

Para la solución, en las barras de voltaje controlado (PV), se tiene que considerar la ecuación de voltaje, ver **Ecuación (5)**, y la ecuación de potencia reactiva en la barra, ver **Ecuación (6)**.

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} * V_j^k - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} * V_j^{(k-1)} \right] \quad (5)$$

$$Q_i^k = -Im * [V_i^{(k-1)*} (\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} * V_j^k + \sum_{j=i}^n Y_{ij} * V_j^{(k-1)})] \quad (6)$$

Donde:

P: es la potencia activa.

Q: es la potencia reactiva.

k: es el número correspondiente a la iteración.

En la barra PV, se requiere ajustar la magnitud  $V_i^k$  al valor de voltaje especificado  $V_i^{esp}$ , mediante la **Ecuación (7)**.

$$V_i^k = V_i^{k+1} * \frac{V_i^{esp}}{V_i^{k+1}} \quad (7)$$

#### 4.2.3 Método de Newton-Raphson

Uno de los métodos de mayor uso es el método de Newton-Raphson, el cual en comparación con el método de Gauss-Seidel, es más eficiente debido a su propiedad de convergencia. Además, el método permite alcanzar la solución en una cantidad específica de iteraciones sin considerar el tamaño del sistema, lo cual es una importante ventaja en comparación con los otros métodos (Tenelema, 2019).

Para la solución del SEP por el método de Newton-Raphson se utiliza la **Ecuación (8)** y la **Ecuación (9)**.

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j * (G_{ij} * \cos\theta_{ij} + B_{ij} * \sin\theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j * (G_{ij} * \sin\theta_{ij} - B_{ij} * \cos\theta_{ij}) \quad (9)$$

Donde:

G: es la parte real de la admitancia, denominada conductancia

B: es la parte imaginaria, denominada susceptancia.

$\theta$ : representa el ángulo.

En cada iteración debe resolverse el siguiente sistema lineal de ecuaciones, ver **Ecuación (10)**.

$$[J]^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (10)$$

La matriz Jacobiano “J” se expresa en la **Ecuación (11)**.

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para el cálculo de la matriz del jacobiano, se utilizan los términos del jacobiano, resumidos en la **Tabla 1**.

**Tabla 1:** Términos del jacobiano para el método de Newton-Raphson.

Para $i=j$	Para $i \neq j$
$H_{ij} = V_i * V_j * (G_{ij} * \sin\delta_{ij} - B_{ij} * \cos\theta_{ij})$	$H_{ii} = V_i^2 * B_{ii} + Q_i$
$N_{ij} = -V_i * V_j * (G_{ij} * \cos\delta_{ij} - B_{ij} * \sin\theta_{ij})$	$N_{ii} = -V_i^2 * G_{ii} - P_i$
$M_{ij} = V_i * V_j * (G_{ij} * \cos\delta_{ij} - B_{ij} * \sin\theta_{ij})$	$M_{ii} = V_i^2 * G_{ii} - P_i$
$L_{ij} = -V_i * V_j * (G_{ij} * \sin\delta_{ij} - B_{ij} * \cos\theta_{ij})$	$L_{ii} = V_i^2 * B_{ii} - Q_i$

Una vez obtenido el resultado, se debe corregir los mismos de acuerdo con la **Ecuación (12)**.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (12)$$

#### 4.2.4 Método desacoplado rápido

El método de desacoplado rápido, se deriva a partir de las ecuaciones del método de Newton-Raphson, donde las submatrices N y M se desprecian, dando como resultado la **Ecuación (13)** y **Ecuación (14)**.

$$[B'] * [\Delta\theta] = [\Delta P/V] \quad (13)$$

$$[B''] * [\Delta V] = [\Delta Q/V] \quad (14)$$

### 4.3 Capítulo III: El método de Gauss-Seidel

Para resolver los flujos de potencia mediante el método de Gauss-Seidel, inicialmente, se desarrolla la matriz de admitancia  $Y_{bus}$ , siguiendo la formulación planteada por González (2007) en la **Ecuación (15)**:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

De modo que, para llenar la matriz  $Y_{bus}$  se emplea lo indicado en las **Ecuaciones (16)** y **(17)**:

$$Y_{ii} = \sum_{k \in \Omega} Y_{ik} \quad (16)$$

Donde:

$\Omega$ : indica la cantidad de nodos aledaños al nodo  $i$ .

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -Y_{ij} \quad (17)$$

Posteriormente, se identifican las barras involucradas en el sistema, especificando su tipo, las variables conocidas y las variables desconocidas, como se resume en la **Tabla 2**.

**Tabla 2:** Variables manejadas en el método Gauss-Seidel.

Tipo	Variables conocidas	Variables desconocidas
<b>Slack</b>	$v, \theta$	$P, Q$
<b>PQ</b>	$P, Q$	$v, \theta$
<b>PV</b>	$P, v$	$Q, \theta$

Como indica Olivares (2007), el método de Gauss-Seidel es un proceso iterativo, el cual comienza con la suposición inicial de un conjunto de valores que utilizarán las variables desconocidas de voltaje y ángulos. En este caso, se utiliza un "arranque plano", en donde, se asume un valor inicial de 1 p.u. para el voltaje y de 0 grados para el ángulo. Luego, para la resolución de las incógnitas de barras PV, se calculan los valores de tensiones y potencias empleando las **Ecuaciones (5)** y **(6)**. Después de obtener los nuevos valores de tensiones, estos deben ser corregidos para mantener los valores iniciales. Este proceso se indica en la **Ecuación (7)**.

Para la resolución de las incógnitas de barras PQ, se obtiene el valor de tensión, utilizando la **Ecuación (5)**. Luego, se revisa la convergencia del resultado; si es favorable, se concluye el proceso; y si no es favorable, se continúa con otra iteración, conservando los valores obtenidos. Por último, para verificar si el resultado ha logrado la convergencia se utiliza la **Ecuación (18)**.

$$\text{Máx}|V_i^{k+1} - V_i^k| \leq \varepsilon \quad (18)$$

Donde:

$\varepsilon$ : es un valor de tolerancia lo suficientemente pequeño.

#### 4.3.1 *Convergencia del método Gauss-Seidel*

Como indica Zamora (1988), debido a la característica de convergencia del método de Gauss-Seidel, se ha dado lugar a que se quiera reducir considerablemente el número de iteraciones. Una de las soluciones implica utilizar el factor de aceleración. Este proceso modifica el valor del voltaje en cada iteración y hace que cada vez sea más cercano al valor que llevará a la convergencia del resultado. En la **Ecuación (19)** se indica el proceso utilizado para acelerar el método Gauss-Seidel.

$$V_{i,acel}^k = (1 - \alpha)V_{i,acel}^{(k-1)} + \alpha V_i^k \quad (19)$$

Donde:

$\alpha$ : es el factor de aceleración.

Generalmente, el factor de aceleración  $\alpha$  suele tomar un valor de 1,6, pero es necesario considerar cada caso de manera particular. Pongamos por caso, en los sistemas de alta interconexión  $\alpha$  suele tomar un valor de 1,4, en cambio, para sistemas radiales  $\alpha$  suele tomar un valor de 1,6. Estos valores no pueden superar el valor de 2.

#### 4.4 **Capítulo IV: Tránsito de potencia**

En lo que se refiere al tránsito de potencia, Gómez (2010) señala que en este cálculo se encontrarán las condiciones óptimas del régimen permanente de un sistema, particularmente los valores relacionados con los voltajes de las barras y al flujo de potencia de líneas como de los transformadores. Además, el flujo de carga está formado por dos etapas, en la primera etapa se obtienen el voltaje en todas las barras del sistema; mientras que, en la segunda etapa, se realiza el cálculo de todas las variables importantes, como los flujos de potencia activa y reactiva, pérdidas del sistema, entre otros.

Entonces, el tránsito de potencia nos permite determinar el voltaje en módulo y fase de las barras de un sistema eléctrico, a partir del cual se determinarán las potencias que circularán por los ramales de la red. Una vez finalizado el análisis de flujo de carga, y conociendo los valores de tensión en todas las barras, se puede obtener la corriente en los nudos y los flujos de potencia. Entonces, para el tránsito de potencia, primero se determina la corriente de la línea de transmisión según lo indicado en la **Ecuación (20)**.

$$I_{ij} = Y_{ij}(V_i - V_j) \quad (20)$$

Después de obtener la corriente de la línea, se puede obtener la potencia según se indica en la **Ecuación (21)**.

$$S_{ij} = V_i * I_{ij}^* \quad (21)$$

De la ecuación anterior, se puede obtener la potencia activa y la potencia reactiva, como se muestra en la **Ecuación (22)** y la **Ecuación (23)**.

$$P_{ij} = Re\{V_i * I_{ij}^*\} \quad (22)$$

$$Q_{ij} = Im\{V_i * I_{ij}^*\} \quad (23)$$

#### **4.4.1 Pérdidas de energía eléctrica**

En cuanto a las pérdidas de energía, Paniagua (2018) señala que, también son conocidas como fugas de energía eléctrica y estas pérdidas se presentan de distintas formas, pero la más común es en forma de calor disipado. Entonces, para obtener las pérdidas totales de un sistema eléctrico, se debe resolver la diferencia entre la energía que ingresa a la red y la energía consumida por las cargas del sistema.

Es importante señalar la presencia de pérdidas técnicas en cualquier sistema de distribución, estas son pérdidas comunes que no pueden ser eliminadas completamente, sin embargo, se puede disminuir su porcentaje mediante mejoras en la red. Asimismo, las principales causas que generan pérdidas técnicas son el efecto Joule y el efecto Corona; otros aspectos a considerar es la pérdida independiente en las cargas del sistema. Estas pérdidas están asociadas a las propias características de conducción y conversión de la energía eléctrica, y se encuentran directamente relacionadas con la estructura de la red, el mantenimiento del sistema, los equipos utilizados y el tipo de operación para el que fueron diseñados.

#### **4.5 Capítulo V: Elementos para la regulación de voltaje**

En un sistema eléctrico de Potencia, es necesario mantener el voltaje y la frecuencia constantes en cada punto del suministro, y garantizar un voltaje libre de armónicos y un factor de potencia unitario (Maldonado, 1987).

Uno de los factores que pueden perjudicar de manera significativa la calidad del suministro en un SEP son las variaciones en la carga eléctrica. Estas fluctuaciones pueden corregirse mediante la compensación, que implica la entrega o absorción controlada de cierta cantidad de potencia reactiva con el fin de estabilizar el sistema y mantener los parámetros eléctricos dentro de los límites.

Por lo que, es importante mantener el nivel de voltaje dentro de límites admisibles en todas las barras del sistema eléctrico para garantizar su calidad y seguridad. En general, se

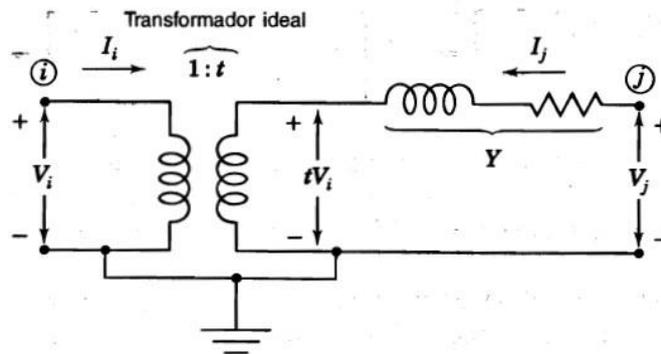
considera un rango normal de operación que permite variaciones de voltaje de hasta un  $\pm 5\%$ . Esto es fundamental para que el sistema eléctrico funcione de manera confiable y evite problemas como fluctuaciones de voltaje que puedan afectar a los equipos conectados a la red eléctrica (Oleas, 2019).

#### 4.5.1 Transformadores con taps para el flujo de potencia.

En cuanto a los transformadores con taps o transformadores regulantes, Grainger y Stevenson (2001) señalan que:

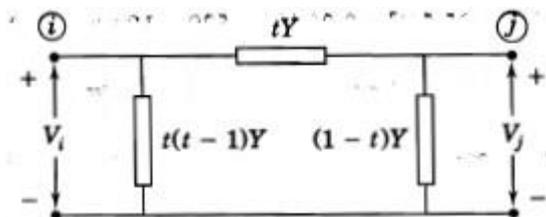
Los transformadores regulantes se pueden usar para controlar los flujos de potencia real y reactiva en un circuito. La admitancia  $Y$  en por unidad es el recíproco de la impedancia en por unidad del transformador que tienen relación de transformación  $1:t$ . La admitancia  $Y$  se encuentra sobre el lado del transformador ideal más cercano al nodo  $j$ , que es el lado de cambio de derivaciones (p. 339).

En la **Figura 9**, se presenta el esquema de un transformador con taps de derivación. Mientras que, en la **Figura 10** se indica el circuito equivalente del transformador con relación de vueltas  $1/t$ , donde se indican las admitancias de nodo cuando  $t$  es real.



**Figura 9:** Transformador con relación de vueltas  $1/t$ .

**Fuente:** Grainger y Stevenson (2001).



**Figura 10:** Circuito equivalente del transformador.

**Fuente:** Grainger y Stevenson (2001).

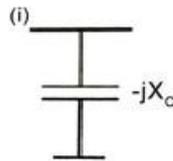
La expresión de la  $Y_{barra}$  obtenida, se indica en la **Ecuación (24)**

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |t|^2 * Y & -t * Y \\ -t * Y & Y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \quad (24)$$

#### 4.5.2 Banco de capacitores en el flujo de potencia.

Los capacitores son elementos empleados en los sistemas eléctricos, cuya finalidad de uso es compensar la potencia reactiva de la red, además de emplearse en la gestión de la calidad de la energía y la eficiencia operativa. Además, los capacitores pueden utilizar la conexión en paralelo o en serie, la conexión en paralelo cumple la finalidad de inyectar potencia reactiva y compensar la potencia inductiva de la propia red; con ello se reduce la caída de voltaje, mejora el factor de potencia y las pérdidas son reducidas. Otra forma de conectar capacitores es en serie, y son usados en líneas de transmisión y distribución y sobre transformadores individuales de distribución, disminuyendo la caída de tensión en el circuito, y, por tanto, mejorando la regulación de voltaje del mismo (Maldonado, 1987).

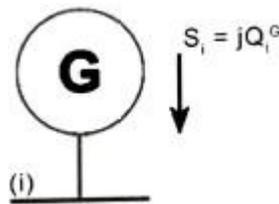
Los capacitores son normalmente representados con sus reactancias, tal como se indica en la **Figura 11**.



**Figura 11:** Modelo del capacitor.

#### 4.5.3 Motores síncronos.

Monjo (s.f.) describe a los motores síncronos como: “máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica de rotación” (p. 1). Una de sus características es que puede ser usado como generador de corriente alterna o como motor síncrono. Por otra parte, en la **Figura 12** se indica el modelamiento matemático de un compensador síncrono, en la cual se indica que su potencia activa no tomará ningún valor y solo estará determinada por su potencia reactiva.



**Figura 12:** Modelo de compensador síncrono.

**Fuente:** (Moura, Moura, & Rocha, 2018)

## 4.6 Capítulo V: Python

Gonzales R. (2011) indica sobre el lenguaje de programación Python: “es un lenguaje similar a Perl, pero con una sintaxis muy limpia y que favorece un código legible” (p. 7). También, es considerado un lenguaje de script que necesita de un programa intérprete para su

ejecución, se destacan sus cualidades de: tipado dinámico, fuertemente tipado, multiplataforma y orientado a objetos. Asimismo, se ha destacado por su amplio uso en proyectos informáticos, debido a sus características de software libre y código abierto. Además, su escritura de código es clara, muy similar al lenguaje C++, pero mucho más comprensible. Python también ofrece versatilidad en el desarrollo de aplicaciones y herramientas informáticas gracias a la incorporación de múltiples librerías.

#### **4.6.1 Entornos de desarrollo integrado (IDE)**

La definición dada por González A. (2015) acerca del IDE es: “un programa compuesto por un conjunto de herramientas que proveen facilidades a los programadores para agilizar el proceso de desarrollo de software. Consta de un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica” (p. 13). Entonces, es posible trabajar con varios entornos, por ejemplo, IDLE, que viene predeterminado al instalar Python, la cual presenta una experiencia básica en el desarrollo de código; por otro lado, existen IDE con mejor interfaz: Visual Studio Code, PyCharm, Spyder, entre otros, que proporcionan una mejor comprensión y visibilidad del código.

##### **4.6.1.1 PyCharm**

PyCharm es un entorno de desarrollo utilizado para diseño de sitios web, programas y procesos de datos, debido a que, proporciona lo esencial respecto a la codificación y tiene funciones útiles como: la coloración sintáctica, el autocompletado de código, la detección de errores o advertencias, permite acceder fácilmente al código fuente de un objeto. Además, se puede agregar automáticamente un import cuando se utiliza por primera vez un elemento externo en un archivo; y permite formatear rápidamente y de manera eficaz el código fuente, además, se proporciona una multitud de pequeñas funcionalidades que facilitan la escritura y el mantenimiento del código (Chazallet, 2016).

### **4.7 Capítulo VII: Funciones utilizadas en Python**

#### **4.7.1 Librerías**

##### **4.7.1.1 Librería NumPy**

NumPy es una librería de Python diseñada para el cálculo numérico y el estudio de datos. En la cual, se incluye una nueva clase de objetos denominados arrays que brinda un mejor soporte en la representación en distintas dimensiones de un mismo tipo de datos. Adicionalmente, las funciones que brinda esta librería son muy eficientes para el manejo de las variables generadas; de modo que, son usualmente usadas en el manejo de vectores y matrices. (Sánchez A. , 2022).

#### 4.7.1.2 Librería math

Burrucco (2021) indica que: “La librería math es proveída por Python como parte de su "librería estándar" y ofrece funciones matemáticas para uso en el campo de los números reales”. Estas funciones son muy utilizadas, por ejemplos las funciones trigonométricas como “**math.cos()**”, “**math.sin()**”, “**math.tan()**” permite evaluar el coseno, seno y tangente, respectivamente. Por otro lado, la función “**math.degrees()**” se emplea en la conversión de grados a radianes y la función “**math.radians()**” de radianes a grados. Además, las constantes numéricas como  $\pi$  y el número  $e$  son las funciones “**math.pi**” y “**math.e**”, respectivamente.

#### 4.7.1.3 Librería copy

Python Software Foundation (2020) indica sobre las declaraciones de asignación: “no copian objetos, crean enlaces entre un objetivo y un objeto. Para colecciones que son mutables o que contienen elementos mutables, a veces se necesita una copia para que uno pueda cambiar una copia sin cambiar la otra”

Esto quiere decir que, al momento de crear una copia de una variable, una falla común es almacenarla en otra variable; debido a que estará relacionada con los cambios que sufra la original a lo largo de los procesos. Dicho de otra manera, se crea una referencia, por lo que no es conveniente su uso. Por el contrario, utilizar “**copy.deepcopy()**” permitirá el guardado de valores y estos no cambiarán al menos que se indiquen en algún proceso.

### 4.8 Capítulo VI: Base de datos

Desde el surgimiento de la informática, esta ha priorizado la generación de herramientas que simplifiquen la gestión de datos. Entonces, una base de datos desempeña un papel fundamental en cualquier proyecto, ya que facilita de manera significativa el almacenamiento, la organización y el acceso a la información. Además, las bases de datos encuentran aplicación en la gestión de empresas e instituciones públicas, también son ampliamente utilizadas en entornos científicos con el objeto de almacenar información experimental. En otras palabras, al ser herramientas muy prácticas en agrupar y ordenar información de cualquier tipo, estas se pueden aplicar a distintos ámbitos.

La base de datos ofrece muchas ventajas como: la independencia, integridad, seguridad, mejor documentación y acceso simultáneo a los datos, menor redundancia, coherencia de los resultados, reducción del espacio. Pero, incorporar una base de dato en proyectos conlleva costos iniciales, requerimientos de hardware y software, mantenimientos continuos y complejidad de diseño (Cabello, 2010).

La versatilidad con la que se representa la información es una característica importante de la base de datos. En consecuencia, la información contenida debe permitir que distintos

procedimientos sean capaces de construir diversos registros a partir de la información existente en la misma. Asimismo, la independencia lógica y física de los datos son propiedades importantes para el uso de bases de datos en proyectos. De modo que, la independencia física se refiere a separar las estructuras lógicas de información de las estructuras físicas conjuntamente con la distribución del almacenamiento. En cambio, la independencia lógica permite modificar la estructura lógica de información sin ver afectadas las herramientas utilizadas en el manejo de los datos.

Por último, el criterio de base de dato que expone Martínez (2015) es: “un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso” (p. 14).

#### **4.8.1 Bases de datos**

##### **4.8.1.1 SQLite**

Con respecto a la base de datos SQLite, SQLite (2022) comenta acerca de las funciones de su herramienta:

SQLite es una biblioteca en proceso que implementa un motor de base de datos SQL transaccional, autónomo y sin configuración; el código de SQLite es de dominio público y, por lo tanto, se puede utilizar de forma gratuita para cualquier fin, comercial o privado. A diferencia de la mayoría de las otras bases de datos SQL, SQLite no tiene un proceso de servidor separado.

##### **4.8.1.2 MySQL**

Por otro parte, en cuanto a la base de datos MySQL, Oracle (s.f.) expresa sobre su herramienta:

MySQL es la base de datos de código abierto más popular del mundo. Según DB-Engines, MySQL se ubica como la segunda base de datos más popular, detrás de Oracle Database. Dado que MySQL es de código abierto, incluye numerosas funciones desarrolladas en estrecha colaboración con los usuarios durante más de 25 años.

Conviene subrayar que, MySQL es ampliamente usada para gestionar grandes bases de datos, por este motivo se emplea en sitios web de comercio electrónico, redes sociales y en diversas aplicaciones altamente exigentes. Además, ofrece características importantes: es rápido, confiable, escalable, flexible, fácil de usar, multifuncional y se encuentra en contante desarrollo.

##### **4.8.1.3 PostgreSQL**

Por último, en lo que se refiere a la base de datos PostgreSQL (s.f.), PostgreSQL (s.f.) señala que:

PostgreSQL es un potente sistema de base de datos objetos-relacional de código abierto que utiliza y amplía el lenguaje SQL combinado con muchas funciones que almacenan y escalan de forma segura las cargas de trabajo de datos más complicadas.

Entonces, el sistema de base de datos PostgreSQL brinda una gran cantidad de funciones que permiten a los desarrolladores crear aplicaciones, administrar datos, desarrollar entornos libres de fallas. También, es capaz de administrar cualquier conjunto de datos sin importar su tamaño; con respecto a sus campos de uso, estos van desde el comercio electrónico, analítica, sistemas de información, detección y prevención de fraudes.

#### **4.8.1.4 Archivo de texto plano**

Acercas del archivo de texto plano, González (2023) indica que este tipo de archivos son utilizados como medios de almacenamiento en herramientas y programas computacionales. El tipo de formato empleado es parecido estructuralmente al de una tabla, en la cual, sus filas indican registros y sus columnas describen las características del registro.

Este tipo de archivos de formato (txt) se caracterizan por ser fáciles de manejar, y su principal propósito son las tareas de almacenamiento, intercambio y procesamiento de datos. Así pues, se encuentran aplicados tanto en el modelado de programas y aplicativos como en el diseño de dominios web. Además, una característica destacable es que para funcionar no se requiere de un servidor externo.

Como con una base de datos SQL, seguimos disfrutando de las ventajas de tener los datos y el código separados. Casi todas las aplicaciones para manejar datos permiten exportar a un archivo de texto plano, tipo CSV, lo cual evita tener que programar un conversor para incorporar datos de manera masiva a nuestra aplicación web (Sánchez A. , 2013).

#### **4.8.2 Archivos de texto plano en Python**

Turkel y Crymble (2012) indican que Python es un lenguaje de programación que está orientado a objetos. Esto se refiere a que la base de la programación es el “objeto”, este se define con el tipo de datos a ingresar y puede interactuar con otros objetos. Además, los métodos permiten acceder y modificar los datos de un objeto.

En el manejo de archivos de texto plano, se utilizan las funciones “**open()**” y “**write()**”. La función “**open()**” se encarga de ejecutar el archivo; y junto con el parámetro “**r**”, permite leer la información que contiene el archivo; en cambio, al utilizar el parámetro “**w**”, se indica que en el archivo se escribirá o sobrescribirá la información; por último, al utilizar el parámetro “**a**”, se indica que se va a anexar información en el archivo.

## 5. Metodología

### 5.1 Área de trabajo

El trabajo está enfocado en el área de análisis de los flujos de carga en sistemas eléctricos de potencia. Se ha desarrollado una herramienta de carácter educativo que será de gran utilidad en las materias de Sistemas Eléctricos de Potencia y Optimización de Operaciones de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Como tal, esta herramienta puede ser utilizada por profesionales y expertos en el campo de la ingeniería eléctrica y la gestión de sistemas eléctricos. La investigación busca contribuir a la mejora de la eficiencia en la distribución generación eléctrica y es de interés para la comunidad científica y académica que estudia sistemas eléctricos de potencia, además, la herramienta puede ser utilizada como recurso de aprendizaje.

El proyecto de investigación, que involucra el desarrollo de un algoritmo para el análisis de flujos de potencia, se llevó a cabo en el bloque A7 de la UNL, las coordenadas correspondientes son:  $4^{\circ}01'50''$  S y  $79^{\circ}11'58''$  W, ver **Figura 13**.



**Figura 13:** Área de trabajo

## 5.2 Equipos y materiales

### 5.2.1 Equipos

#### ➤ Software

- Python
- PowerWorld
- Herramientas de cálculo
- Word

#### ➤ Herramientas digitales

- draw.io

### 5.2.2 Materiales

- Computador
- Calculadora científica
- Cuaderno de apuntes

## 5.3 Procedimiento

El proyecto de investigación corresponde al tipo de investigación de ingeniería aplicada, ya que se enfocará en el desarrollo de una herramienta para el análisis de flujos de potencia.

Para el desarrollo de la herramienta se optó por el lenguaje de programación Python. Este enfoque se seleccionó debido a las destacadas propiedades de Python, que incluyen su condición de software libre y su considerable popularidad. Estas características hacen de Python una elección idónea para la implementación de proyectos que involucran herramientas matemáticas y la optimización de procesos. La combinación de su versatilidad y amplio respaldo de la comunidad lo posiciona como una herramienta valiosa en el desarrollo de la herramienta propuesta.

La selección del entorno de desarrollo integrado (IDE) desempeña un papel fundamental en el proceso de desarrollo de la herramienta. En este caso, se ha seleccionado PyCharm como IDE para trabajar con Python, debido a que es un entorno reconocido por su robustez y conjunto de características que facilitan el desarrollo de aplicaciones en este lenguaje.

Para la resolución de flujos de potencia se ha optado por el método de Gauss-Seidel debido a su simplicidad en comparación con el método de Newton-Raphson. No obstante, es crucial señalar algunas de sus limitaciones, siendo una de las más notables el mayor número de iteraciones requeridas para lograr la convergencia del resultado dentro del cálculo.

Sin embargo, para mitigar el problema mencionado anteriormente, se ha considerado el factor de aceleración indicado en la **Ecuación (19)**. Este factor permite reducir el número de iteraciones necesario para que el cálculo del flujo de potencia converja.

Después de considerar los aspectos mencionados, se procederá al desarrollo de la herramienta. Para ello es necesario instalar las librerías “Numpy” y “Math” en el IDE. “Numpy” se emplea para la creación de matrices y vectores, mientras que la librería “Math” es empleada en operaciones trigonométricas y de ángulos.

### 5.3.1 Primer objetivo

La primera parte de la investigación consiste en el desarrollo de una herramienta, diseñada en solucionar los flujos de potencias cuando solo intervienen líneas de transmisión. Para ello, primero se indica la cantidad de barras que tiene el sistema a analizar, con la finalidad de elaborar las matrices y vectores que servirán de medio para guardar datos, posterior, se solicita el ingreso de la impedancia correspondientes a cada línea.

En primer lugar, para resolver un flujo de potencias utilizando el método Gauss-Seidel, se debe resolver la matriz  $Y_{barra}$  ( $Y_{bus}$ ) con se indica en la **Ecuación (15)**. Para ello, considerando las **Ecuaciones (16)** y **(17)** se debe llenar adecuadamente la matriz  $Y_{barra}$ . Por otra parte, si los datos referentes a las admitancias de la línea se encuentran en valores de impedancia (resistencia y reactancia), se debe convertir el valor de la admitancia como el inverso de la impedancia, tal como se indica en la **Ecuación (25)**.

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (25)$$

Tanto la impedancia como la admitancia se representan en números complejos, sumado al hecho de que dentro de la lógica del programa las líneas  $i - j$  y  $j - i$  son iguales, al tratarse de la misma línea. Entonces, los valores referentes se agrupan en una matriz de números complejos según lo anteriormente indicado, los datos faltantes se completan de acuerdo con la igualdad  $i - j = j - i$ . Una de las funciones utilizadas corresponde a: “numpy.zeros”, usada para crear una matriz de ceros con la finalidad de almacenar dichos valores, junto con la indicación del tipo de dato de acuerdo con: “dtype= complex”, en este caso utilizado para definir que el contenido será de números complejos, , este proceso se indica en la **Figura 14**.

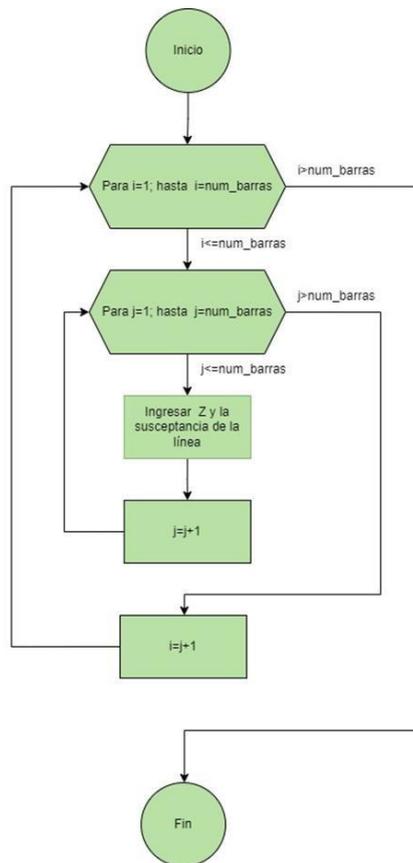
```

def crear_variables(num_barras):
    z_de_linea= np.zeros( shape: (num_barras, num_barras), dtype=complex)
    matriz_susceptancia = np.zeros( shape: (num_barras, num_barras), dtype=complex)
    y_transformador = np.zeros( shape: (num_barras, num_barras), dtype=complex)
    derivacion = np.zeros((num_barras, num_barras))
    matrix_de_conexion = np.zeros((num_barras, num_barras))
    y_matriz = np.zeros( shape: (num_barras, num_barras), dtype=complex)
    #Capacitor
    banco_cap = np.zeros((num_barras), dtype=complex)
    #Motor sincrono
    P_motorsin = np.zeros((num_barras))
    Q_motorsin = np.zeros((num_barras))
    return (z_de_linea, matriz_susceptancia, y_transformador, derivacion,
            matrix_de_conexion, y_matriz,banco_cap, P_motorsin, Q_motorsin)

```

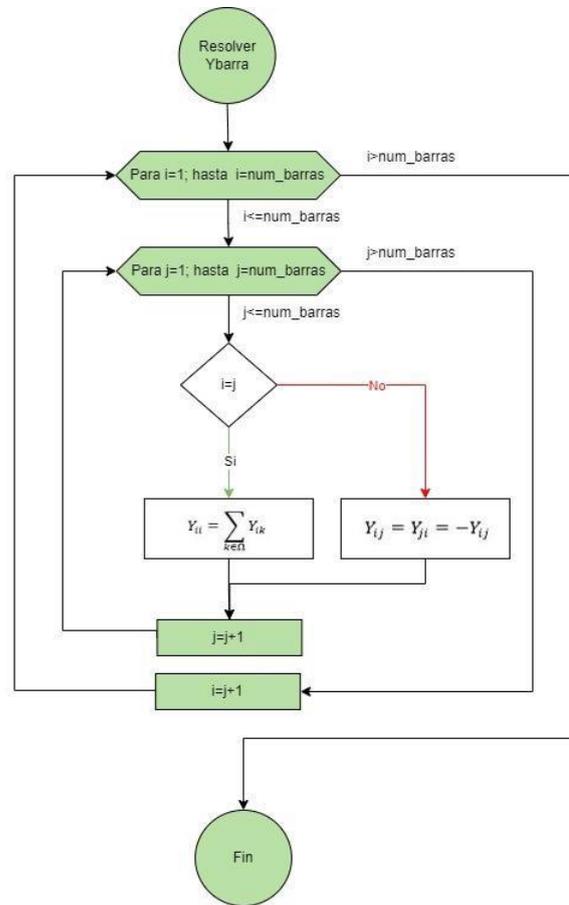
**Figura 14:** Almacenamiento de variables

Entonces, es imprescindible generar vectores y matrices, y conjuntamente con el uso de bucles “for” recorrer las matrices creadas y llenar los datos correspondientes de las líneas. Como se indica en el diagrama de la **Figura 15**, el proceso indicado corresponde al ingreso de las impedancias y susceptancias de las líneas.



**Figura 15:** Proceso de ingreso de datos de líneas

De igual forma, se resuelve la matriz  $Y_{barra}$ , con la ayuda de bucles “for”; y conjuntamente con el condicional “if”, esto permite organizar los elementos de la matriz y solucionar  $Y_{barra}$ . Este proceso se detalla en el diagrama de la **Figura 16**.



**Figura 16:** Proceso resolver Ybarra

Antes de continuar con la solución y una vez obtenida la matriz  $Y_{barra}$ , es necesario identificar cada barra que forma el sistema. Luego, el siguiente paso consiste en guardar los valores referentes a cada barra: el voltaje (v), el ángulo ( $\theta$ ), la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q). Aunque, para cada una de las barras se tendrá que ingresar algunos datos necesarios para la solución:

- En el caso de una barra Slack, es necesario proporcionar tanto el voltaje como el ángulo, como se detalla en la **Figura 17**

```

if c[k] == 1:
    v[k] = float(input("Ingrese el voltaje: "))
    An = float(input("Ingrese el ángulo: "))
    Ag[k]=An
    A[k] = math.cos(An) + math.sin(An) * 1j
    P_ini[k] = 0
    Q_ini[k] = 0
  
```

**Figura 17:** Ingresos de datos en barra Slack

- En el caso de una barra PQ, se deben ingresar la potencia consumida y la potencia reactiva consumida, tal como se indica en la **Figura 18**.

```
elif c[k] == 2:
    Pc = float(input("Ingrese Potencia consumida: "))
    Pcarga[k] = -Pc
    Qc = float(input("Ingrese Potencia reactiva consumida: "))
    Qcarga[k] = -Qc
    v[k] = 1
    Ag[k]=0
    A[k] = math.cos(0) + math.sin(0) * 1j
```

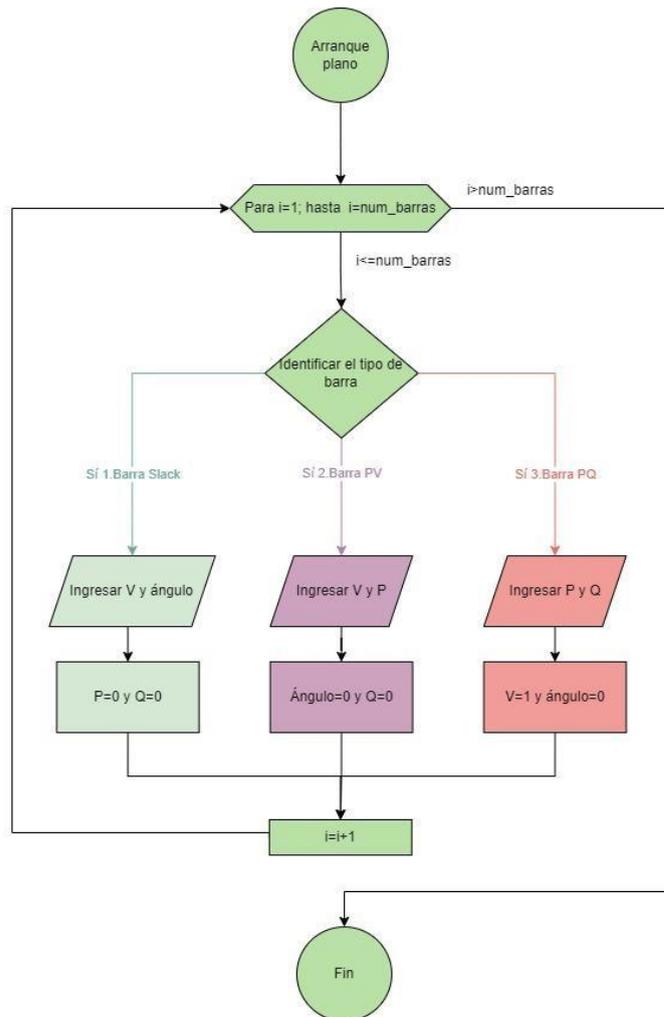
**Figura 18:** Ingresos de datos en barras PQ

- En cambio, si la barra es de tipo PV, se requiere ingresar tanto la potencia como el voltaje, como se muestra en la **Figura 19**.

```
elif c[k] == 3:
    v[k] = float(input("Ingrese voltaje: "))
    P_ini[k] = float(input("Ingrese la potencia generada: "))
    Pcarga[k]=-(float(input("Ingrese el valor P de la carga: ")))
    Qcarga[k]=-(float(input("Ingrese el valor Q de la carga: ")))
    Ag[k]=0
    A[k] = math.cos(0) + math.sin(0) * 1j
    Q_ini[k] = 0
```

**Figura 19:** Ingresos de datos en barras PV

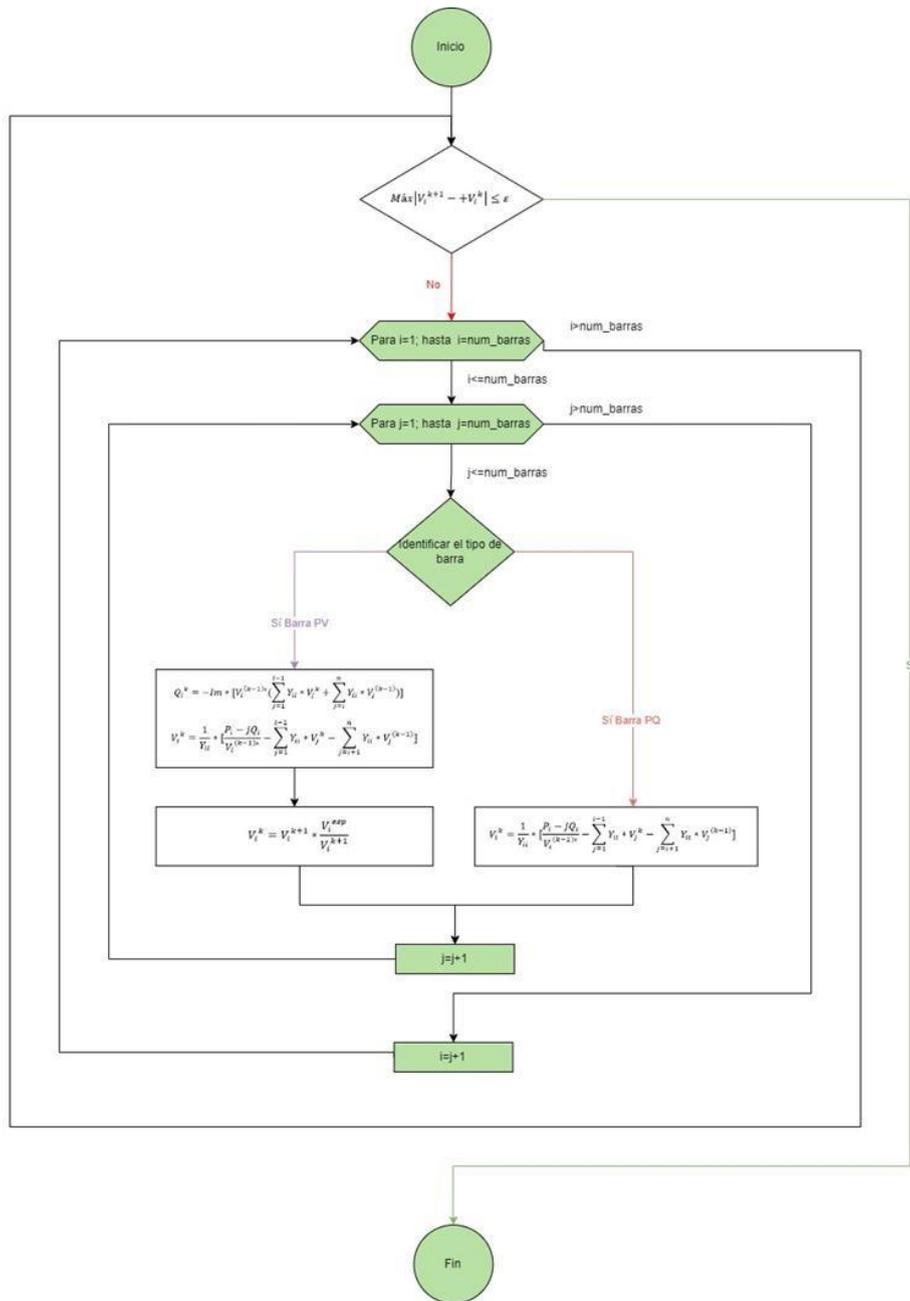
Como se observa, en caso de que no se especifiquen los valores de voltajes y ángulos, se establece un “inicio plano”, en el cual el voltaje tomará un valor de 1 p.u. y el ángulo 0. En el diagrama de la **Figura 20** se indica el proceso de arranque plano de variables en la herramienta.



**Figura 20:** Proceso de arranque plano en el método Gauss-Seidel.

Al iniciar las iteraciones, si la barra corresponde a barra Slack, los valores de voltaje y ángulos se mantienen en cada iteración. Si la barra corresponde a una barra PQ, se obtiene el valor del voltaje con su respectivo ángulo de acuerdo con la **Ecuación (5)**. En caso de una barra PV, primero se calcula el valor de la potencia reactiva (Q), como se indica en la **Ecuación (6)**, y luego con este valor se determina el nuevo valor del voltaje junto con su ángulo correspondiente; pero es primordial conservar el voltaje inicial de la barra PV, en consecuencia, el valor se corrige siguiendo lo indicado en la **Ecuación (7)**.

Este procedimiento se repite en cada iteración durante el análisis de flujo de carga, hasta lograr la convergencia del resultado. Para decidir si se ha logrado la convergencia, se emplea la fórmula de error indicada en la Ecuación (18). De modo que, se calcula el error considerando los voltajes obtenidos en la iteración actual y los voltajes de la iteración anterior. Entonces, la convergencia se alcanza cuando el voltaje calculado satisface el criterio de error establecido, señalando que los resultados han convergido a una solución aceptable, como se indica en el diagrama de la **Figura 22**.



**Figura 21:** Proceso iterativo considerando un error de convergencia.

Con respecto al valor de tolerancia utilizado en la herramienta desarrollada, es de  $\epsilon = 10^6$  y esta elección se basa en la consideración de que no se especifica ninguna cantidad, pero según Gómez et al. (2003) “ $\epsilon$  es un valor suficientemente pequeño”. En la **Figura 22** se indica la función desarrollada para validar el error.

```

# Calculo del error
for i in range(num_barras):
    error[i] = abs(v[i] - original_v[i])
# print("vector de error", error)
for i in range(num_barras):
    if error[i] <= 0.000001:
        conver[i] = 1
    else:
        conver[i] = 0
# print("vector de convergencia", conver)
convergencia = all(x == 1 for x in conver)
if convergencia:
    m = 1
    # print("El proceso ha convergido")
else:
    m = 0
return v, A, Q, original_v

```

**Figura 22:** Cálculo de error y convergencia.

Durante el proceso anteriormente indicado, en una barra Slack, no se realizan cálculos, por lo que los valores de voltaje y ángulo indicados inicialmente se mantienen constantes. En cuanto a la potencia en la barra Slack, esta se ajusta después de que los resultados convergen. En primer lugar, se obtiene la corriente en las líneas de transmisión adyacentes a la barra Slack utilizando la **Ecuación (20)**; posteriormente, se calcula la potencia de acuerdo con la **Ecuación (21)**, y finalmente, se suman las potencias para obtener la potencia en la barra Slack. Este proceso se detalla en el diagrama de la **Figura 23**. La función resultante para el ajuste de la potencia en la barra Slack se indica en la **Figura 24**.

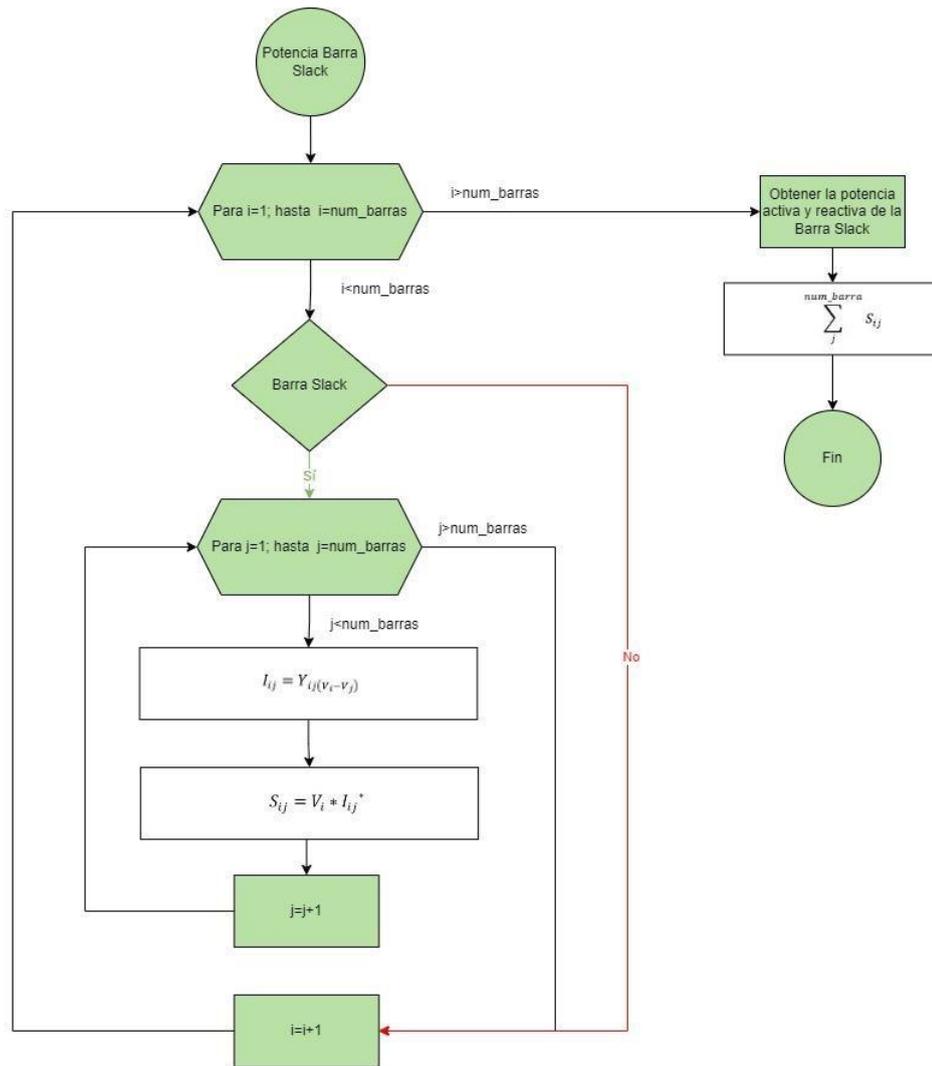
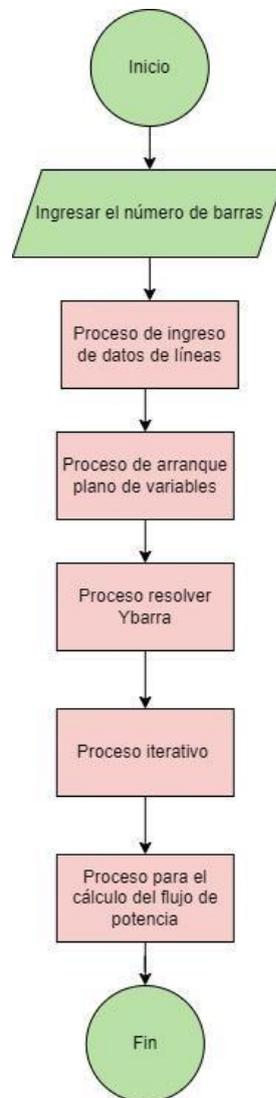


Figura 23: Proceso para el cálculo del flujo de potencia.

```
def ajus_potencia(num_barras):
    P,Q
    Ivector=0
    Svector = np.empty((num_barras), dtype=complex)
    for k in range(num_barras):
        if c[k] == 1:
            for j in range(num_barras):
                if k == j:
                    Svector[j] = 0
                else:
                    Ivector= y_matriz[k][j] * ((v[k] * A[k]) - (v[j] * A[j]))
                    Svector[j] = (v[k] * A[k])*Ivector.conjugate()
            #print("svector", Svector)
            Q[k] = -(np.imag(sum(Svector)))
            P[k] = -(np.real(sum(Svector)))
    return P,Q
```

Figura 24: Ajuste de potencia en barra Slack

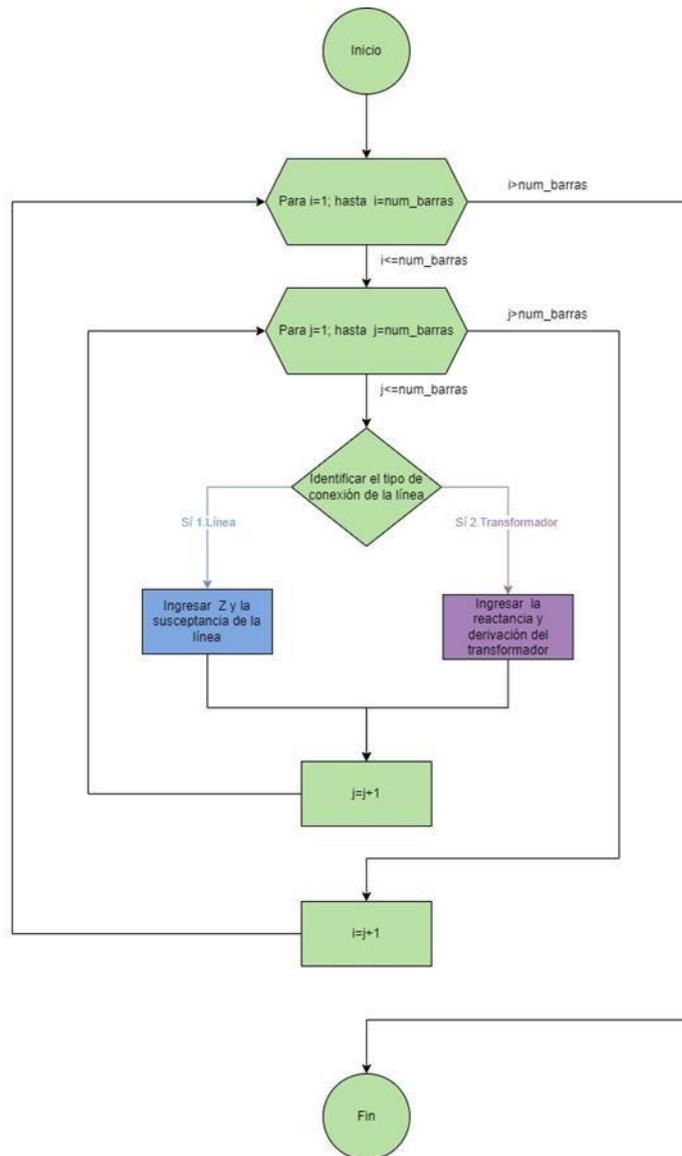
Todas las funciones indicadas anteriormente forman una herramienta básica para el cálculo del flujo de potencia. El diagrama de esta herramienta se muestra en la **Figura 24**, donde se indica cada uno de los procesos empleados, desde el ingreso de datos, hasta el proceso de ajuste del flujo de potencia en la barra Slack.



**Figura 25:** Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada.

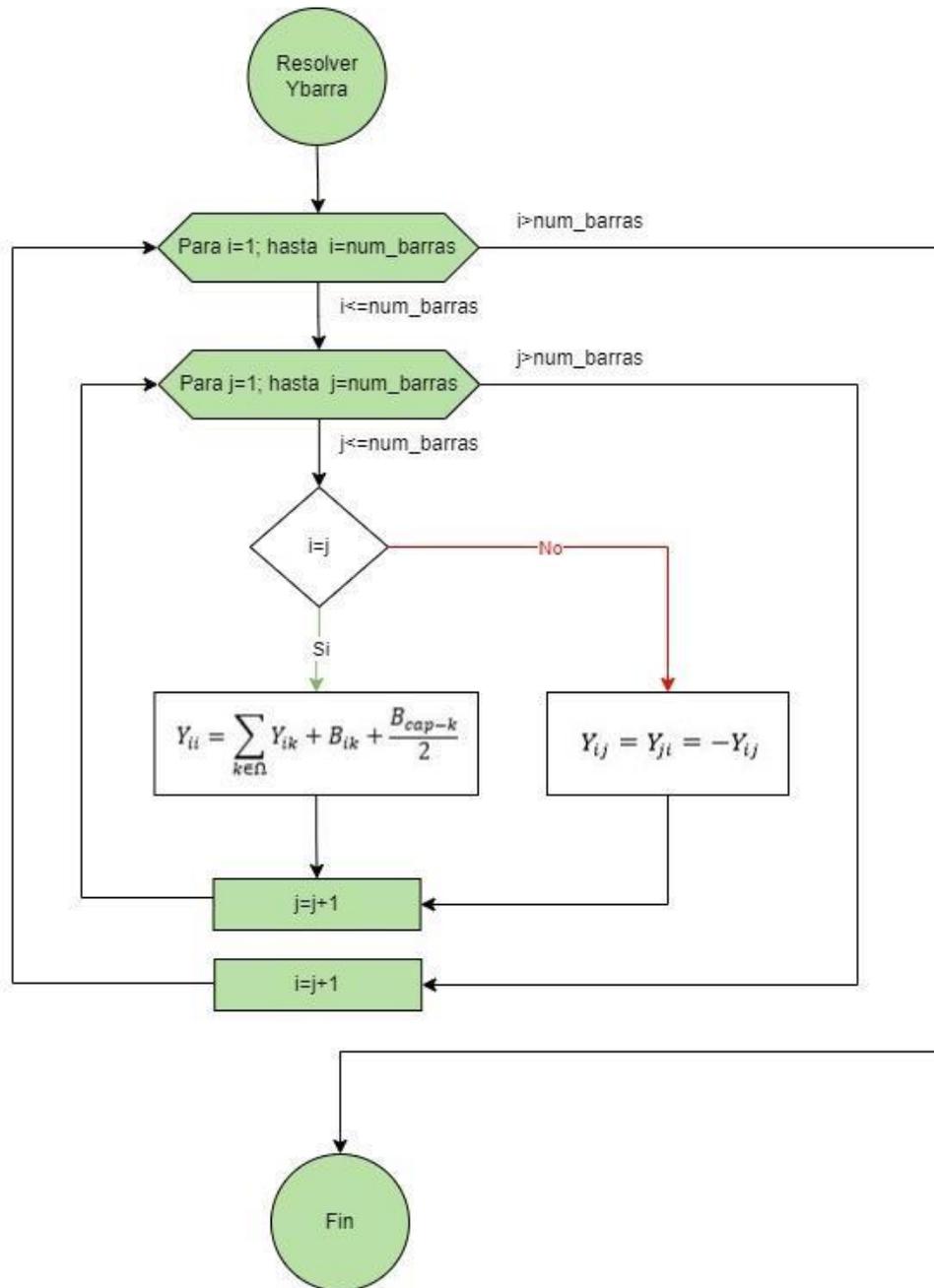
### 5.3.2 Segundo objetivo

Anteriormente, se describió el funcionamiento básico de una herramienta para el cálculo de flujos de potencia, con el fin de aumentar su utilidad en análisis de sistemas complejos, se han incorporado modificaciones, principalmente modelando elementos reguladores de tensión, como los bancos de capacitores, taps de transformadores y motores síncronos. En este caso, el ingreso de datos se describe en el diagrama de la **Figura 26**, donde se solicita la impedancia y susceptancia de la línea o la reactancia y derivación del transformador.



**Figura 26:** Proceso de ingreso de datos de líneas y transformadores

Primero, con respecto al banco de capacitores o capacitor, este influye directamente en la  $Y_{barra}$ , por lo que es necesario realizar el proceso de modificar, previo al cálculo de dicha matriz. Para ello, es necesario especificar la barra  $i$  en donde se encuentra el capacitor, junto con su carga reactiva en p.u. Posterior, este elemento modificará la resolución de la  $Y_{barra}$  en el sumatorio correspondiente al elemento  $Y_{ii}$ . En el cálculo se considerarán las susceptancias de las líneas aledañas, en caso de que se indique en el problema, y la mitad de la susceptancia del capacitor, como se indica en diagrama de la **Figura 27**.



**Figura 27:** Proceso del cálculo de la Ybarra considerando capacitores.

A continuación, en la **Figura 28** se indica la función que permite almacenar la reactancia del capacitor, y en la **Figura 29** se muestra la función encargada de modificar la sumatoria correspondiente para el cálculo de la matriz Ybarra considerando el ingreso de capacitores.

```

def add_cap():
    opcion=0
    while opcion<1:
        barra_cap=0
        barra_cap = int(input("En que barra se encuentra el banco de capacitores (indique 0 para terminar): "))
        if barra_cap!=0:
            banco_capacitor=input("Ingrese la reactancia del banco de capacitores en p.u. ")
            banco_cap[barra_cap-1]=complex(banco_capacitor)
        else:
            opcion=1
    return banco_cap

```

**Figura 28:** Ingreso de datos de los capacitores.

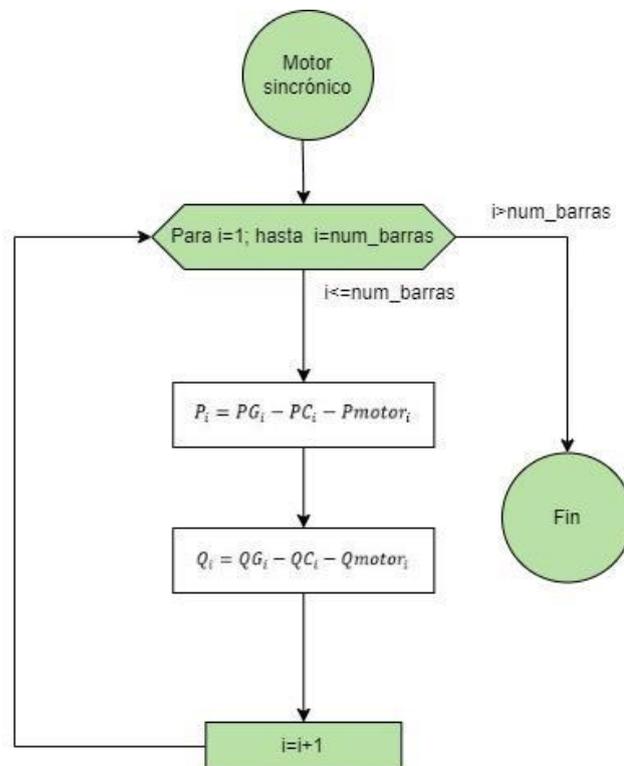
```

def mod_capacitor(num_barras):
    for i in range(num_barras):
        for j in range(num_barras):
            if matrix_de_conexion[i][j] != 0:
                matriz_susceptancia[i][j] = matriz_susceptancia[i][j] + ((banco_cap[i]) / 2)
            else:
                matriz_susceptancia[i][j] = 0
    return matriz_susceptancia

```

**Figura 29:** Modificación del capacitor.

Por otro lado, al considerar un motor síncronico, este afecta los valores de generación de las barras e influye directamente en su consumo. El modelado del motor síncrono considera únicamente la carga reactiva  $Q$ . En consecuencia, la potencia activa y reactiva utilizada en el cálculo será la potencia de generación de la barra menos la carga de la misma barra y la carga del motor síncrono, tal como se indica en el diagrama de la **Figura 30**.



**Figura 30:** Proceso para obtener la potencia considerando carga de motores síncronicos.

En la **Figura 31** se indica la función que almacena la potencia reactiva consumida (Q) por el motor, mientras que en la **Figura 32** se muestra la función encargada de calcular la potencia en la barra.

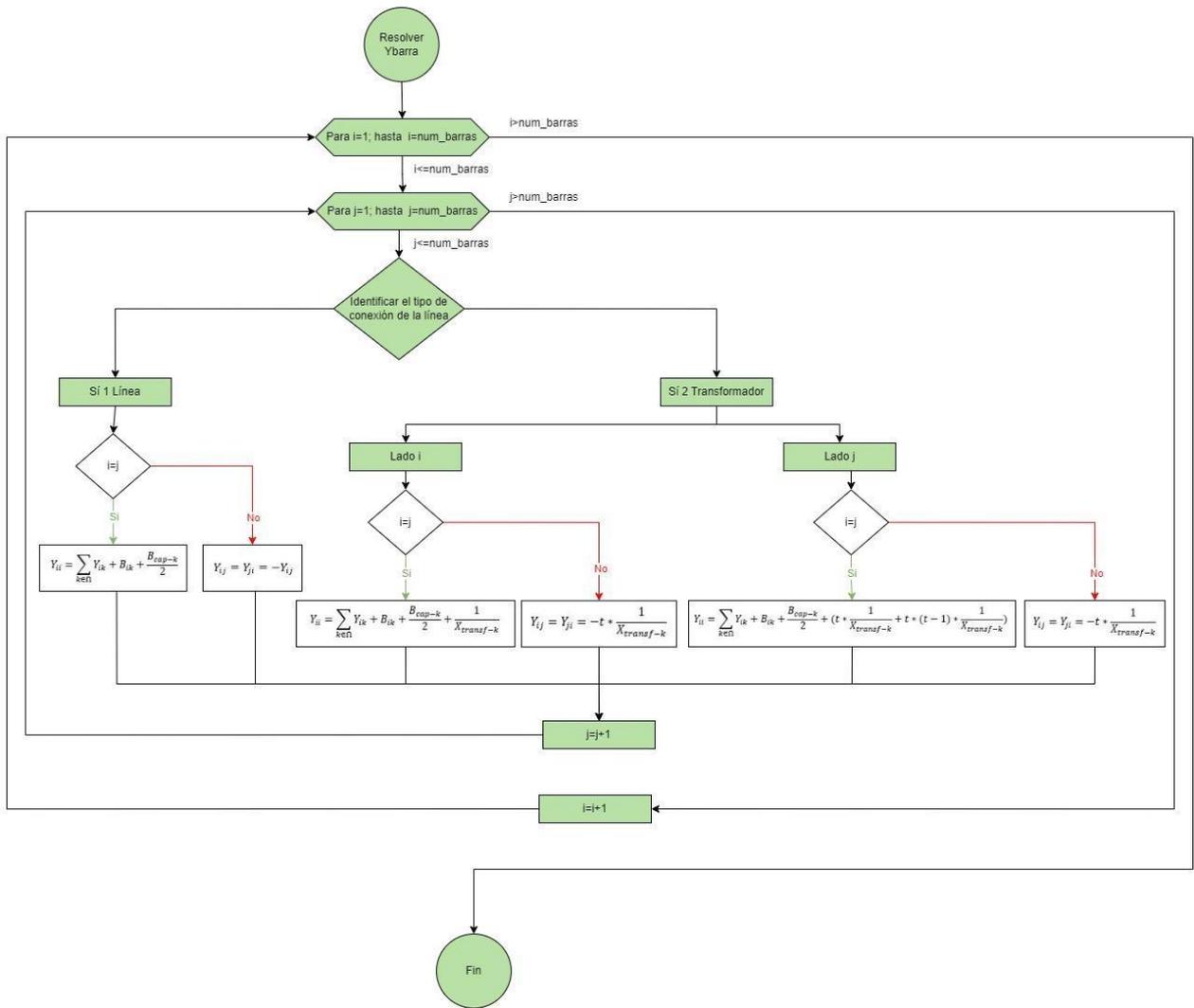
```
def add_motorsin():
    opcion_motor = 0
    while opcion_motor < 1:
        while opcion_motor < 1:
            barra_motor = int(input("En que barra se encuentra el motor sincrono (indique 0 para terminar): "))
            if barra_motor != 0:
                Q_motorsin[barra_motor - 1] = float(input("Ingrese la carga Q del motor sincrono: "))
                P_motorsin[barra_motor - 1] = 0
            else:
                opcion_motor = 1
    return P_motorsin, Q_motorsin
```

**Figura 31:** Ingresos de datos de motor síncrono.

```
def mod_motor(num_barras):
    for i in range(num_barras):
        if c[i]==2:
            P[i]=P_ini[i]+Pcarga[i]-P_motorsin[i]
            Q[i]=Q_ini[i]+Qcarga[i]-Q_motorsin[i]
        elif c[i]==3:
            P[i]=P_ini[i]+Pcarga[i]-P_motorsin[i]
        else:
            P[i]=P_ini[i]
    return P,Q
```

**Figura 32:** Modificaciones del motor síncrono.

Por otra parte, al modelar el transformador como parte de los elementos reguladores de voltaje, es importante diferenciar el tipo de conexión que existe entre las barras, si corresponde a una línea, un transformador, o si no existe conexión entre barras, ya que estos aspectos afectarán el cálculo de la matriz  $Y_{barra}$ . Para el cálculo es necesario indicar la reactancia del transformador y su derivación ( $t$ ). Además, se debe identificar el lado  $i$  y el lado  $j$  del transformador, ya que sumatoria del elemento  $Y_{ii}$  es diferente para cada lado. Este proceso se detalla en el diagrama de la **Figura 33**.

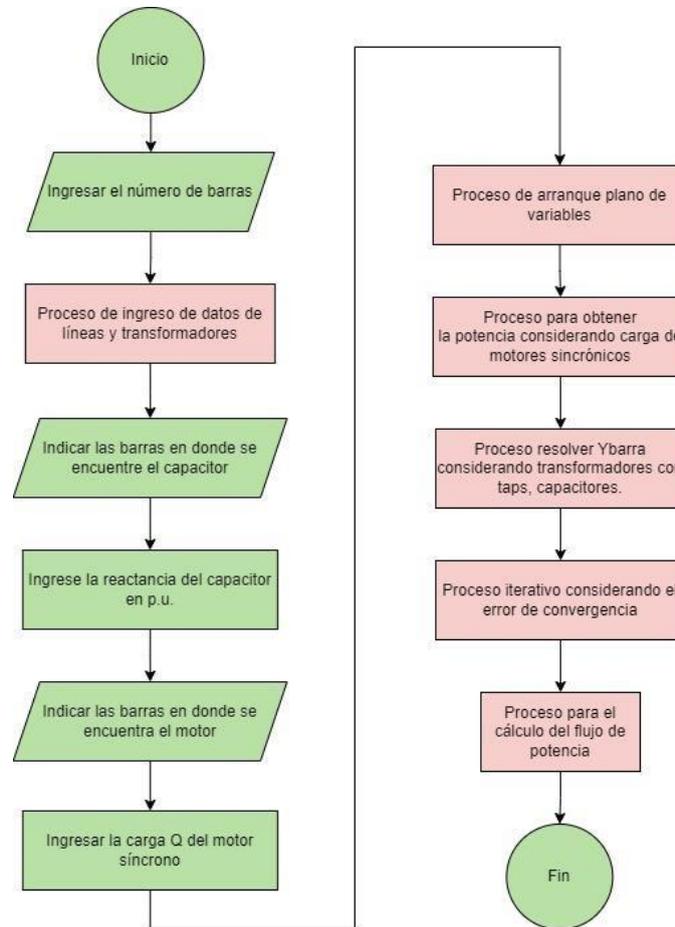


**Figura 33:** Proceso del cálculo de la Ybarra considerando transformadores con tap, capacitores.

Siguiendo el mismo proceso del apartado anterior, se completan los datos faltantes para la resolución de la matriz  $Y_{barra}$ . Si algunos de los valores necesarios no están expresados en valores por unidad (p.u.), se debe utilizar la potencia base para convertirlos. En caso de que no se especifique, se debe asumir una potencia base de 100 Mvar.

Posterior, se identifican los tipos de barras y se completan los datos requeridos. En caso de que algunos datos no sean conocidos, se asignan valores iniciales mediante un "inicio plano". Al tener todos los valores necesarios, se inicia el proceso iterativo para determinar el flujo de potencia. Durante este proceso, se busca la convergencia, asegurándose de que los voltajes se estabilicen dentro de un margen de error pequeño. Una vez que se alcanza la convergencia, se concluye el cálculo.

En el siguiente diagrama se indica la herramienta desarrollada donde se incluyen los elementos reguladores de voltajes, ver **Figura 34**. Antes de ingresar los datos para resolver la matriz  $Y_{barra}$ , es necesario identificar el tipo de conexión entre las barras, que puede ser una línea, un transformador, o no tener conexión entre las barras.



**Figura 34:** Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada con corrección de voltaje.

### 5.3.3 Tercer objetivo

Para almacenar los datos, se ha elegido utilizar un archivo de texto plano (txt) debido a que el proyecto no demanda una mayor complejidad, y resulta más práctico el almacenamiento en un archivo txt. Se utiliza la función "**with open**" para crear un archivo con un nombre específico y el parámetro "**w**", indicando que se realizarán operaciones de escritura. Después, mediante la función "**write**", se almacenan los datos necesarios, para ello se hacen uso de las funciones "**for**" e "**if**", de manera que se maneje eficientemente la escritura de los datos en el archivo. Por ejemplo, en la **Figura 35**, se presenta parte del código de la escritura de datos en archivos txt.

```

##Almacenar datos iniciales
save_data=input("Ingrese el nombre del archivo que desea crear (en formato txt): ")
with open(save_data, 'w') as f:
    f.write(f'Numero de barras: '
           f'{num_barras}\n')
    f.write('Datos de la líneas\n')
    f.write(f'{"Líneas": <12} {"ID": <10} {"Z de línea": <18} {"B de línea": <14} {"Ytransform t": <14} {"t": <10}\n')
    for i in range(num_barras):
        for j in range(num_barras):
            if j > i:
                f.write(f'Línea {i+1}-{j+1}:{" " * 2} {matrix_de_conexion[i, j]:<9} '
                       f'{z_de_linea[i, j].real:.4f}+{z_de_linea[i, j].imag:.4f}j '
                       f'{" " * 3}{matriz_susceptancia[i,j]:<14}'
                       f'{y_transformador[i,j]:<14}'
                       f'{derivacion[i,j]:<10}\n')

```

**Figura 35:** Almacenamiento de datos en un archivo txt.

En cambio, para la lectura y recuperación de datos, se utiliza “with open” y el parámetro “r” para abrir el archivo en modo lectura. Entonces, se recuperan los subíndices de las matrices y con ello se ubican los datos recuperados en las matrices y vectores, para manejarlos de mejor manera con el mismo código realizado. Por ejemplo, en la **Figura 36** se recuperan los datos que se almacenaron en la **Figura 35**

```

##Llenar matrices
with open(save_data, 'r') as f:
    for line in f:
        if 'Línea' in line:
            break
    for line in f:
        # Extraer el número de línea y los datos de conexión
        parts = line.split(':')
        linea_num_str = parts[0].replace(_old: 'Línea', _new: '').strip()
        if '-' in linea_num_str:
            i_str, j_str = linea_num_str.split('-')
            i, j = int(i_str), int(j_str)
            clean_data = parts[1].replace(_old: ',', _new: '').replace(_old: 'j', _new: 'j').strip()
            matrix_de_conexion[i - 1][j - 1] = float(clean_data.split()[0])
            z_de_linea[i - 1][j - 1] = complex(clean_data.split()[1].replace(_old: 'j', _new: 'j'))
            matriz_susceptancia[i - 1][j - 1] = complex(clean_data.split()[2].replace(_old: 'j', _new: 'j'))
            y_transformador[i - 1][j - 1] = complex(clean_data.split()[3].replace(_old: 'j', _new: 'j'))
            derivacion[i - 1][j - 1] = float(clean_data.split()[4])

```

**Figura 36:** Lectura y recuperación de datos de un archivo.

En el proceso de modificación de datos, se ha realizado la modelación para ajustar los valores de las líneas, transformadores, bancos de capacitores y la carga de motores síncronos.

Para ajustar los valores, en caso de ser una línea, primero se solicita la ubicación de la línea i-j, luego, se recuperan los valores i y j necesarios para actualizar los valores de la impedancia y susceptancia en las matrices correspondientes, estableciendo los valores restantes en cero. En caso de ser un transformador, se sigue el mismo procedimiento anterior, en cambio, se actualizan los valores de reactancia y la derivación correspondientes; de la misma manera, se establecen los demás valores en cero. En la **Figura 37** se muestra el código enfocado en la

modificación de las líneas, mientras que la **Figura 38** indica el código para ajustar los datos del transformador.

```
if mod_menu == 1:
    i = 0
    j = 0
    while opcion_linea < 1:
        mod_linea = (input("Ingrese el numero de la linea {i-j}, ingrese 0 si desea terminar: "))
        if mod_linea == '0':
            opcion_linea = 1
        else:
            numeros = mod_linea.strip('').split('-')
            i = int(numeros[0])
            j = int(numeros[1])
            matrix_de_conexion[i - 1][j - 1] = 1
            matrix_de_conexion[j - 1][i - 1] = 1
            z_linea = input("Ingrese el valor z de la linea ({},{}): ".format(*args: i, j))
            z_de_linea[i-1][j-1] = complex(z_linea)
            z_de_linea[j-1][i-1] = complex(z_linea)
            matriz_suscep = input(
                "Ingrese el valor de la susceptancia en paralelo en p.u. de la linea ({},{}): ".format(
                    *args: i, j))
            matriz_susceptancia[i-1][j-1] = complex(matriz_suscep)
            matriz_susceptancia[j-1][i-1] = complex(matriz_suscep)
            matrix_de_conexion[j-1][i-1] = matrix_de_conexion[i-1][j-1]
            y_transformador[i-1][j-1] = complex(0 + 0j)
            y_transformador[j-1][i-1] = complex(0 + 0j)
            derivacion[i-1][j-1] = 0
            derivacion[j-1][i-1] = 0
```

**Figura 37:** Código para modificar los datos de líneas.

```
if mod_menu==2:
    i = 0
    j = 0
    while opcion_transf<1:
        mod_transf = (input("Ingrese el numero del transformador {i-j}, ingrese 0 si desea terminar: "))
        if mod_transf == '0':
            opcion_transf = 1
        else:
            numeros = mod_transf.strip('').split('-')
            i = int(numeros[0])
            j = int(numeros[1])
            matrix_de_conexion[i-1][j-1]=2
            z_de_linea[i-1][j-1] = complex(0 + 0j)
            z_de_linea[j-1][i-1] = complex(0 + 0j)
            matriz_susceptancia[i-1][j-1] = complex(0 + 0j)
            matriz_susceptancia[j-1][i-1] = complex(0 + 0j)
            # reactancia del transformador
            y_transf = input("Ingrese la reactancia del transformador {}-{} en p.u.: ".format(*args: i, j))
            y_transformador[i-1][j-1] = complex(y_transf)
            y_transformador[j-1][i-1] = complex(y_transf)
            # Seleccion de derivacion
            derivacion[i-1][j-1] = input(
                "Seleccione la derivacion del transformador {}-{}: ".format(*args: i, j))
            derivacion[j-1][i-1] = derivacion[i-1][j-1]
            matrix_de_conexion[j-1][i-1] = 3
```

**Figura 38:** Código para modificar los datos del transformador

De igual manera, en el caso de banco de capacitores o motores síncronos, se sigue un proceso similar. Primero, se identifica la posición de la barra correspondiente, y luego se ingresan los datos necesarios, introduciendo la reactancia en caso de ser capacitor, y la carga del motor en caso de ser un motor síncrono. En la **Figura 39** se indica el código utilizado para modificar los valores del capacitor, mientras que la **Figura 40** presenta el código utilizado para actualizar los datos del motor síncrono.

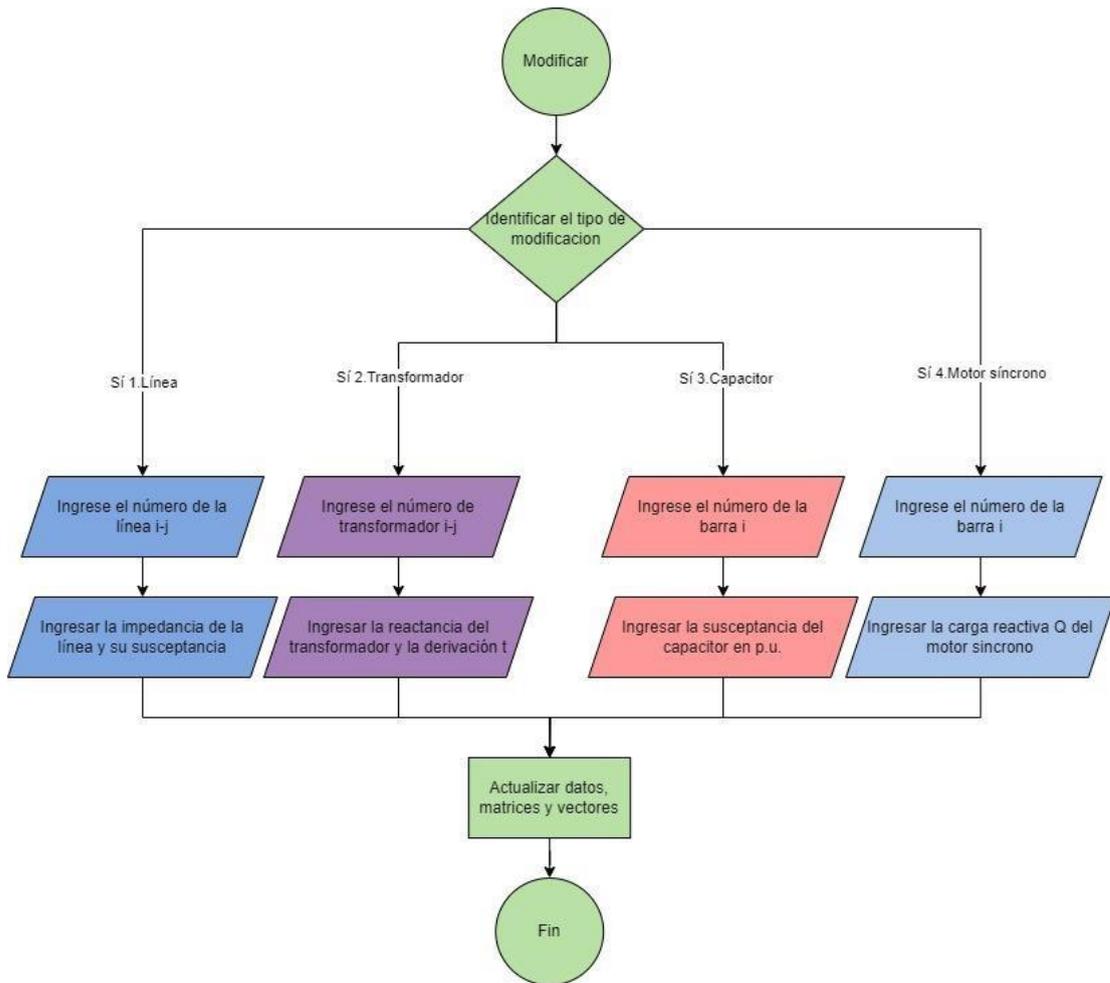
```
if mod_menu==3:
    #Agregar o modificar capacitor
    opcion = 0
    while opcion < 1:
        barra_cap = 0
        barra_cap = int(input("En que barra se encuentra el banco de capacitores (indique 0 para terminar): "))
        if barra_cap != 0:
            banco_capacitor = input("Ingrese la reactancia del banco de capacitores en p.u. ")
            banco_cap[barra_cap - 1] = complex(banco_capacitor)
        else:
            opcion = 1
```

**Figura 39:** Código para modificar los datos del capacitor.

```
if mod_menu==4:
    # Agregar o modificar cargas de motores sincronos
    opcion_motor = 0
    while opcion_motor < 1:
        barra_motor = int(input("En que barra se encuentra el motor sincrono (indique 0 para terminar): "))
        if barra_motor != 0:
            Q_motorsin[barra_motor-1] = float(input("Ingrese la carga Q del motor sincrono en p.u.: "))
            P_motorsin[barra_motor - 1] = 0
        else:
            opcion_motor = 1
```

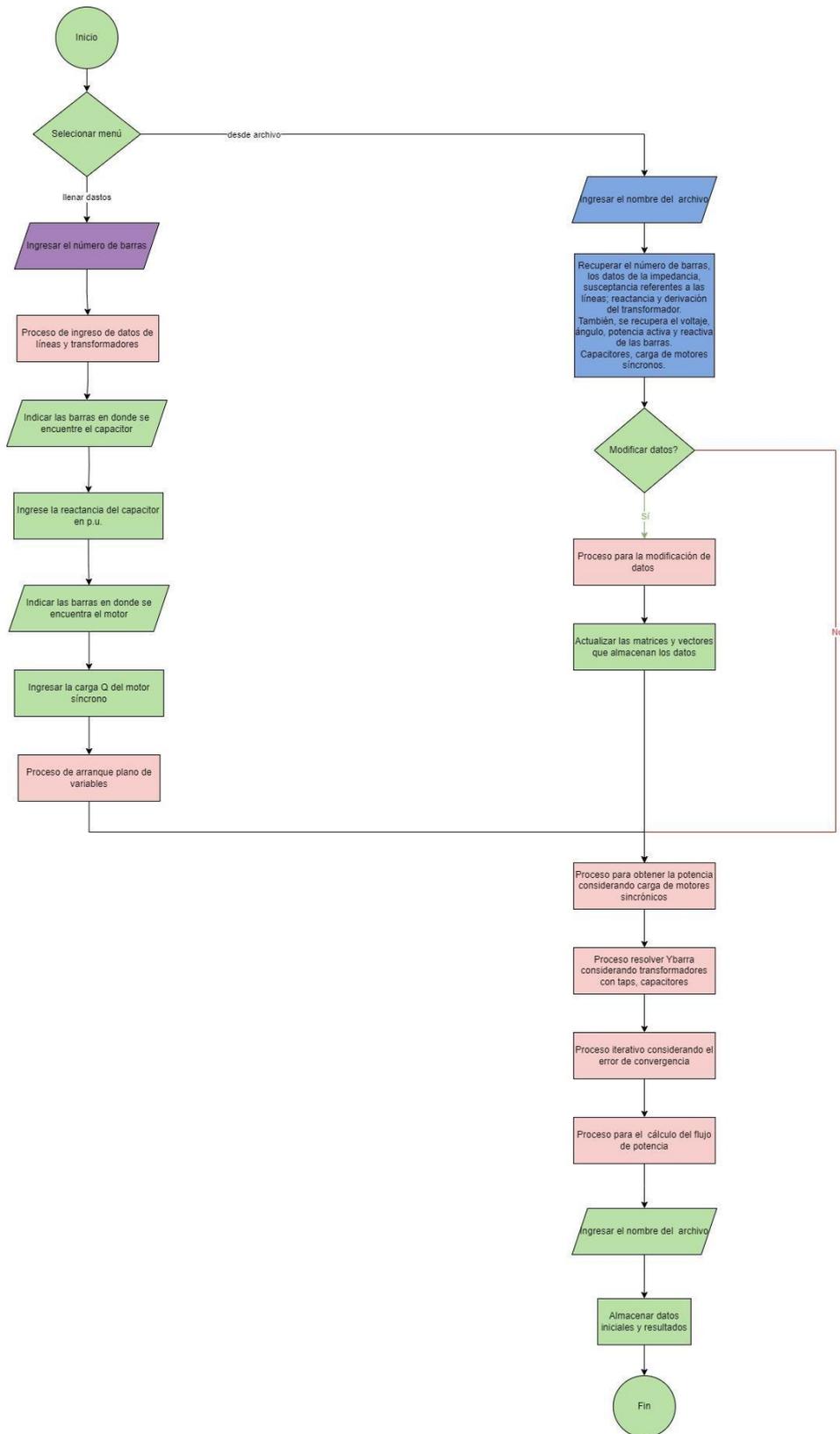
**Figura 40:** Código para modificar los datos de motor síncrono

Las partes anteriormente mostradas, forman parte del proceso modificar, proceso que se indica en la **Figura 41**.



**Figura 41:** Proceso para la modificación de los datos

Por último, en la **Figura 42** se presenta el diagrama de flujo de la herramienta diseñada, en la cual se ha modelado el almacenamiento, recuperación y modificación de datos.



**Figura 42:** Diagrama de flujo de la herramienta desarrollada con almacenamiento de datos

#### 5.4 Procesamiento y análisis de datos

Para verificar la funcionalidad de la herramienta diseñada, se resuelven problemas modelos obtenidos de libros de referencia. Se comparan los resultados obtenidos por la

herramienta diseñada con los obtenidos mediante el programa PowerWorld, programa utilizado para los análisis de flujos de potencia y optimización de estos, entre otras aplicaciones.

También, se realiza una comparación entre el resultado obtenido en las primeras iteraciones del programa y los resultados obtenidos con la ayuda de una herramienta de cálculo. Esta comparación permite encontrar posibles errores en el código, debido a errores en la programación. Con resultados más fiables, se evalúan los resultados, comparando el error de voltaje entre ambos resultados. Para ello se utiliza la fórmula de error que se indica en la ecuación (26).

$$Ep = \left| \frac{Vv - Va}{Vv} \right| * 100\% \quad (26)$$

Donde:

*Ep*: Error porcentual

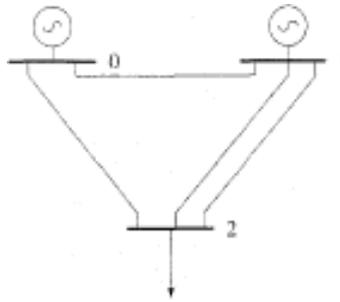
*Vv*: Valor verdadero

*Va*: Valor aproximado

## 6. Resultados

### 6.1 Objetivo 1

Entonces, para comprobar el funcionamiento del algoritmo, se plantea la solución de un problema modelo tomado del libro publicado por Gomez et al. (2003), titulado “Sistemas Eléctricos de Potencia”. En el cual se pide resolver el problema 1: Para la red de 3 nudos de la **Figura 43** se consideran los valores de impedancia indicados en la **Tabla 3**. Además, de las tensiones, ángulos, potencias activas y reactivas de la **Tabla 4**, considerando una potencia base de  $S_B = 100 \text{ MVA}$ . Por último, se resumen en la **Tabla 5** las variables conocidas, como las tensiones y potencias, y las incógnitas de las barras (nudos) de la red.



**Figura 43:** Esquema unifilar de la red del Problema 1.

**Fuente:** Gomez et al. (2003).

**Tabla 3:** Datos de las líneas de la red del problema 1.

Líneas	Impedancias en p.u.
0 – 1	$0,02 + 0,04j$
0 – 2	$0,02 + 0,06j$
1 – 2	$0,02 + 0,04j$ cada una

**Tabla 4:** Datos de los nudos para la red del problema 1.

Nudos	Tensiones en p.u	Potencias
0	1,02	–
1	1,02	$P_G = 50 \text{ MW}$
2	–	$P_C = 100 \text{ MW}, Q_C = 60 \text{ Mvar}$

**Tabla 5:** Variables conocidas e incógnitas del problema 1.

Nudos	Tipo	Datos conocidos	Incógnitas
0	Slack	$V_0 = 1,02$ $\theta_0 = 0,0$	$P_0$ $\theta_0$
1	PV	$V_1 = 1,02$ $P_1 = 0,5$	$\theta_1$ $Q_1$
2	PQ	$P_2 = -1,0$ $Q_2 = -0,6$	$\theta_2$ $V_2$

La matriz Ybarra obtenida en el programa, ver **Figura 44**, se ha obtenido considerando a la línea 1-2 como una sola línea, entonces, la impedancia que se toma es de  $0,01+0,002j$ . Si se compara con la matriz presentada en el libro, ver **Figura 45**, no existe ninguna diferencia con el resultado. Lo cual indica un funcionamiento correcto para la solución de la matriz Ybarra.

```
Matriz Ybarra:
[[ 15.-35.j -10.+20.j -5.+15.j]
 [-10.+20.j 30.-60.j -20.+40.j]
 [-5.+15.j -20.+40.j 25.-55.j]]
```

**Figura 44:** Ybarra obtenida del programa.

$$Y = \begin{bmatrix} 15 - 35j & -10 + 20j & -5 + 15j \\ -10 + 20j & 30 - 60j & -20 + 40j \\ -5 + 15j & -20 + 40j & 25 - 55j \end{bmatrix}$$

**Figura 45:** Ybarra del sistema.

También, se presentan los resultados de voltaje, ángulos, potencias y potencias reactivas que se indican en el libro, resumidos en la **Tabla 6**. Aunque estos resultados proporcionan una base, no son precisos debido a que el voltaje de la barra 1 se ha calculado erróneamente como 1,016 p.u. Pero, la barra corresponde a una barra PV, en la cual se ha indicado que el voltaje corresponde a un valor de 1,02 p.u. y si el resultado es otro debe ser corregido.

**Tabla 6:** Resultados del problema 1.

Nudos	V	$\theta$	P	Q
0	1,02	0	0,51	0,222
1	1,016	$-6,455 * 10^{-3}$	0,5	0,401
2	1,001	-0,0016	-1	-0,6

Del programa diseñado, se han obtenido los resultados del problema modelo 1, que se muestran en la **Figura 46**.

```

Valores finales
Voltaje calculado:
[1.02      1.02      1.00434283]
Ángulo calculado en grados:
[ 0.      -0.47104644 -0.9612161 ]
Potencia calculada:
[ 0.50977239  0.5      -1.      ]
Potencia reactiva:
[ 0.07095958  0.5512368 -0.6      ]

```

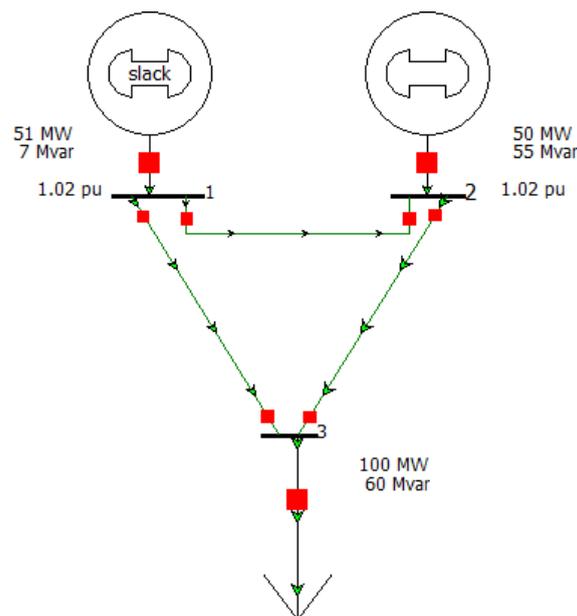
**Figura 46:** Resultados obtenidos del programa.

Para mejorar la visibilidad de los resultados, estos se indican en la **Tabla 7**. Y se detallan en el **Anexo 1**.

**Tabla 7 :** Resumen de datos obtenidos del programa.

Nudos	V	$\theta$	P	Q
0	1,02	0	0,509	0,071
1	1,02	-0,471	0,5	0,551
2	1,00434	-0,961	-1	-0,6

También, se ha simulado el problema utilizando el programa PowerWorld Simulator Education Edition como se indica en la **Figura 47**; los resultados de voltaje, ángulo ( $\theta$ ), potencia y potencia reactiva se presentan en la **Figura 48**.



**Figura 47:** Esquema del problema en PowerWorld.

	Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	1	1	1.000	1.02000	1.020	0.00			50.89	7.14
2	2	2	1	1.000	1.02000	1.020	-0.47			50.00	55.08
3	3	3	1	1.000	1.00434	1.004	-0.96	100.00	60.00		

**Figura 48:** Resultados obtenidos del PowerWorld.

Como se observa, la diferencia entre los resultados obtenidos mediante el programa PowerWorld y el código diseñado es muy pequeña, el voltaje en la barra 2 es de 1,00434 en el programa y en las respuestas del código es de 1,0043421, los voltajes en la barra 0 y 1 no cambian por ser una barra Slack y una barra PV, respectivamente. La **Tabla 8** se indica el error entre los voltajes del programa diseñado y el programa PowerWorld.

**Tabla 8 :** Comparación de voltajes Problema 1.

Nudos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
0	1,02	1,02	-
1	1,02	1,02	-
2	1,0043428	1,00434	$2,08 * 10^{-4}\%$

Además, los ángulos calculados y los obtenidos del programa son muy similares, la pequeña variación se debe a que el programa muestra los ángulos con dos decimales, mientras que el programa diseñado los presenta con ocho decimales, en la **Tabla 9** se muestra el cálculo del error entre los resultados.

**Tabla 9 :** Comparación de ángulos Problema 1.

Nudos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
0	0	0	-
1	-0,47104644	-0,47	$2,23 * 10^{-3}\%$
2	-0,9612161	-0,96	$1,27 * 10^{-3}\%$

En cuanto a las potencias, la potencia P calculada en la barra 0 es de 50,97 MW y la potencia Q es 7,10 Mvar: mientras que, en el programa, P es 50,89 MW y Q es 7,14 Mvar. Para la barra 1, la potencia Q calculada es de 55,12 Mvar y la potencia Q obtenida del programa de simulación es a 55,08 Mvar, y se mantiene el valor de la potencia P. Por último, la potencia P y Q en la barra 2 permanecen constantes. La diferencia de resultados es mínima, rondando

un valor de error no superior a  $6.17 \cdot 10^{-3}\%$ , tal como se indica en la **Tabla 10** y en la **Tabla 11**.

**Tabla 10:** Comparación de potencia (P) Problema 1.

Nudos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
0	0,50977239	0,5089	$1,71 \cdot 10^{-3}\%$
1	-0,5	-0,5	-
2	-1	-1	-

**Tabla 11 :** Comparación de potencia reactiva (Q) Problema 1.

Nudos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
0	0,07095958	0,0714	$6,17 \cdot 10^{-3}\%$
1	0,5512368	0,5508	$7,93 \cdot 10^{-4}\%$
2	-0,6	-0,6	-

Adicionalmente, en el problema 1 se indica lo siguiente: En el nudo 1 los límites inferiores y superiores de potencia reactiva son de -10 Mvar y 40 Mvar respectivamente. Entonces, se procede a la resolución del problema y en la **Figura 49** se muestran los resultados del problema 1 con las modificaciones mencionadas, mientras que los detalles de los resultados se encuentran el **Anexo 2**.

```

Valores finales
Voltaje calculado:
[1.02      1.02      1.00429149]
Ángulo calculado en grados:
[ 0.      -0.36083991 -0.87972569]
Potencia calculada:
[ 0.44788487  0.5      -1.      ]
Potencia reactiva:
[ 0.0984027  0.4      -0.6      ]
    
```

**Figura 49:** Resultados finales Problema 1.

De igual manera, se han simulado las modificaciones en el software PowerWorld y se han obtenido los resultados que se muestran en la **Figura 50**. La simulación genera un error debido a la producción de potencia reactiva, por lo que los valores obtenidos no cumplen con los límites establecidos.

	Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	1	1	1.000	1.02000	1.020	0.00			44.80	9.84
2	2	2	1	1.000	1.02000	1.020	-0.36			50.00	52.30
3	3	3	1	1.000	1.00429	1.004	-0.88	100.00	60.00		

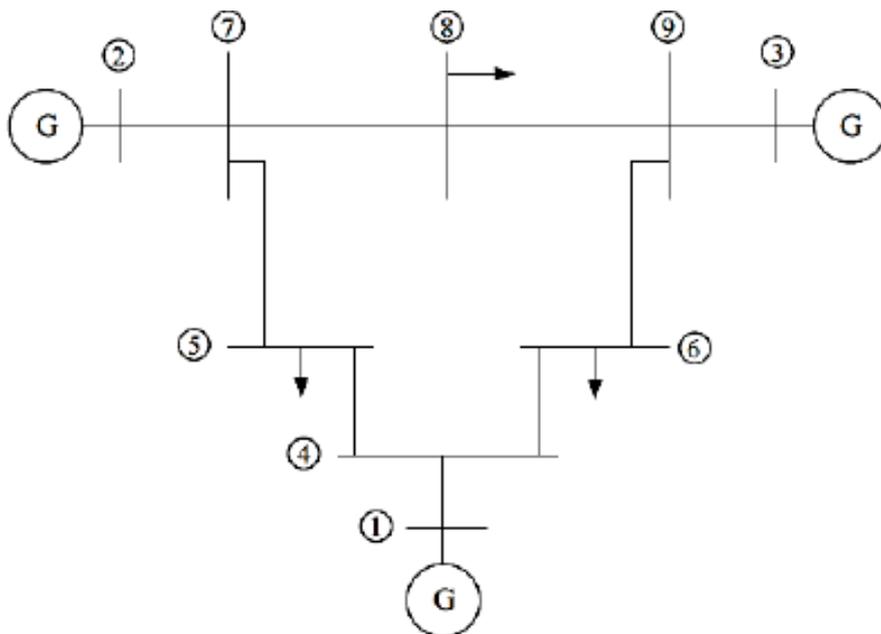
**Figura 50:** Simulación de límite en PowerWorld

Para cumplir con los valores límite, se ha modelado una función que controla la variable de generación de la potencia reactiva (Q), el cual se aplica únicamente para las barras PV. Es importante señalar que puede haber casos en los que no se especifiquen límites. En esos casos, se debe asignar un valor de 0 en ambos límites en el programa. En la **Figura 51** se indica el proceso empleado para controlar los límites de potencia reactiva (Q).

```
#Límites Q
if Q_limite_inf[i] == 0 and Q_limite_sup[i] == 0:
    Q[i] = Q[i]
else:
    if Q[i] > Q_limite_sup[i]:
        Q[i] = Q_limite_sup[i]
    elif Q[i] < Q_limite_inf[i]:
        Q[i] = Q_limite_inf[i]
```

**Figura 51:** Desarrollo de la función de límites en barras PV.

El funcionamiento del programa desarrollado cumple con las expectativas planteadas, pero es necesario validar su funcionamiento en problemas con un mayor número de barras. Por lo tanto, se ha planteado la solución de un sistema IEEE de nueve barras, el cual se indica en la **Figura 52**.



**Figura 52:** Sistema IEEE de 9 barras.

**Fuentes:** Tenelema (2019)

En la **Tabla 12** y **Tabla 13** se indican datos técnicos del sistema, los datos se encuentran en p.u. y su potencia base es 100 MVA.

**Tabla 12:** Datos de barra del sistema IEEE de 9 barras.

<b>Barra</b>	<b>V</b> [p.u.]	<b>Ángulo</b> [°]	<b>P generación</b>	<b>Q generación</b>	<b>P carga</b>	<b>Q carga</b>
<b>1</b>	1,04	0	-	-	-	-
<b>2</b>	1,025	0	1,63	-	-	-
<b>3</b>	1,025	0	0,85	-	-	-
<b>4</b>	1	0	-	-	0	0
<b>5</b>	1	0	-	-	1,25	0,5
<b>6</b>	1	0	-	-	0,9	0,3
<b>7</b>	1	0	-	-	0	0
<b>8</b>	1	0	-	-	1	0,35
<b>9</b>	1	0	-	-	0	0

**Tabla 13:** Datos de líneas del sistema IEEE de 9 barras.

<b>Líneas</b>	<b>R</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1 – 4</b>	0	0,0576	0
<b>2 – 7</b>	0	0,0625	0
<b>3 – 9</b>	0	0,0586	0
<b>4 – 5</b>	0,01	0,085	0,176
<b>4 – 6</b>	0,017	0,092	0,158
<b>5 – 7</b>	0,032	0,161	0,306
<b>6 – 9</b>	0,039	0,17	0,358
<b>7 – 8</b>	0,0085	0,072	0,149
<b>8 – 9</b>	0,0119	0,1008	0,209

En la **Figura 53** se indican los resultados obtenidos del programa, estos valores se resumen en la **Tabla 14**.

Resultados				
Barra	Voltaje	Angulo	P	Q
Barra 1	1.04	0.0	0.71641	0.27046
Barra 2	1.025	9.28	1.63	0.06654
Barra 3	1.025	4.66474	0.85	-0.1086
Barra 4	1.02579	-2.21678	0.0	0.0
Barra 5	0.99563	-3.98882	-1.25	-0.5
Barra 6	1.01265	-3.68736	-0.9	-0.3
Barra 7	1.02577	3.7197	0.0	0.0
Barra 8	1.01588	0.72753	-1.0	-0.35
Barra 9	1.03235	1.96671	0.0	0.0

**Figura 53:** Resultados obtenidos mediante el programa del sistema IEEE de 9 barras.

**Tabla 14:** Solución del flujo de potencia del sistema IEEE de 9 barras.

Nudos	V	$\theta$	P	Q
1	1,04	0	0,726	0,270
2	1,025	9,28	1,63	0,066
3	1,025	4,66	0,85	-0,109
4	1,02579	-2,21	0	0
5	0,99563	-3,99	-1,25	-0,5
6	1,01265	-3,69	-0,9	-0,3
7	1,02577	3,72	0	0
8	1,01588	0,73	-1	-0,35
9	1,03235	1,97	0	0

El resultado obtenido del programa se compara con la simulación del sistema IEEE de 9 barras utilizando el programa PowerWorld. El resultado obtenido del programa PowerWorld se muestra en la **Figura 54** y la comparación de resultado se indica en la

**Tabla 15.**

**Tabla 15:** Comparación de resultados del sistema IEEE de 9 barras.

	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	1	1.000	1.04000	1.040	0.00			72.10	26.99
2	2	1	1.000	1.02500	1.025	9.24			163.00	6.62
3	3	1	1.000	1.02500	1.025	4.62			85.00	-10.88
4	4	1	1.000	1.02583	1.026	-2.23				
5	5	1	1.000	0.99569	0.996	-4.01	125.00	50.00		
6	6	1	1.000	1.01270	1.013	-3.71	90.00	30.00		
7	7	1	1.000	1.02579	1.026	3.68				
8	8	1	1.000	1.01590	1.016	0.69	100.00	35.00		
9	9	1	1.000	1.03236	1.032	1.93				

**Figura 54:** Resultados de la simulación del sistema IEEE de 9 barras.

**Tabla 15:** Comparación de resultados del sistema IEEE de 9 barras.

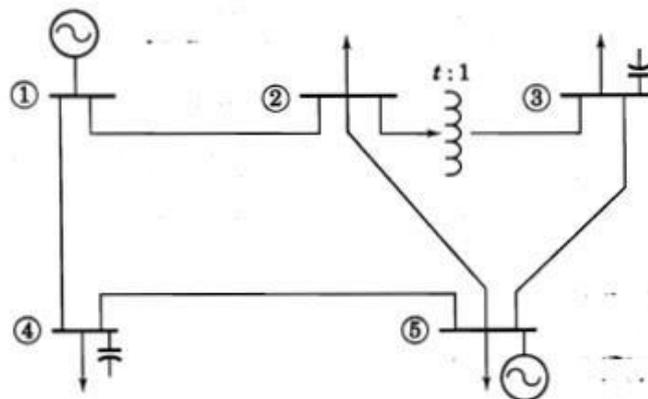
Nodos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
1	1,04	1,04	-
2	1,025	1,025	-
3	1,025	1,025	-
4	1,02579	1,02583	$3,9 * 10^{-3}\%$
5	0,99563	0,99569	$6,03 * 10^{-3}\%$
6	1,01265	1,01270	$4,94 * 10^{-3}\%$
7	1,02577	1,02579	$1,95 * 10^{-3}\%$
8	1,01588	1,01590	$1,97 * 10^{-3}\%$
9	1,03235	1,03236	$9,69 * 10^{-4}\%$

Como se observa en la **Tabla 15**, al comparar los voltajes resultantes, los errores obtenidos son mínimos, con un máximo de  $6,03 * 10^{-3}\%$ . Por lo tanto, se considera que el programa cumple adecuadamente su función de resolver flujos de potencia

## 6.2 Objetivo 2

Para demostrar la funcionalidad de la herramienta desarrollada, se plantea la resolución de un problema modelo. El problema modelo corresponde al problema 9.14 del libro de los autores Grainger y Stevenson (2001), denominado “Análisis de Sistemas de Potencia”.

Problema 2: En la **Figura 55** se muestra un sistema de potencia de cinco barras. Los datos de líneas, barras, transformadores y capacitores se dan en las tablas que se indican a continuación.



**Figura 55:** Problema modelo 2.

**Fuente:** Grainger y Stevenson (2001).

En la **Tabla 16** se muestran los datos correspondientes a las impedancias y las cargas de las líneas del sistema. Los datos referentes a la carga de las líneas se encuentran expresada en Mvar, y la potencia base del sistema no se especifica; para expresar la carga del capacitor en susceptancia con valor p.u., se ha establecido una potencia base de 100 Mvar, y se procede al cálculo de los valores en p.u. de las susceptancias de las líneas.

**Tabla 16:** Datos de líneas del sistema descrito.

Líneas	R	X	Mvar de carga
1 – 2	0,0108	0,0649	6,6
1 – 4	0,0235	0,0941	4,0
2 – 5	0,0118	0,0471	7,0
3 – 5	0,0147	0,0588	8,0
4 – 5	0,0118	0,0529	6,0

En la **Tabla 17** se presentan los datos correspondientes a la generación y consumo de potencias y el voltaje con su respectivo ángulo, además se indican la barra de compensación (Slack) y las barras PV.

**Tabla 17:** Datos de la barra para el sistema descrito.

Barra	P generación	Q generación	P carga	Q carga	V p.u.	Observaciones
1	-	-	-	-	1,01∠0°	Barra de compensación
2	-	-	60	35	1,0∠0°	
3	-	-	70	42	1,0∠0°	
4	-	-	80	50	1,0∠0°	
5	190	-	65	36	1,0∠0°	Barra PV

En cuanto al transformador, se indica en la **Tabla 18** donde se detallan los datos necesarios a considerar. Estos datos incluyen la reactancia del transformador y su derivación correspondiente

**Tabla 18:** Datos del transformador del sistema.

Línea del transformador	Reactancia p.u.	Selección de derivación
2 – 3	0,04	0,975

Por último, en la **Tabla 19** se indican los datos de los capacitores que se encuentran en el sistema. Al igual que con las cargas de las líneas, los datos del capacitor son necesarios para la construcción de la matriz Ybarra; por tanto, se considera la potencia base de 100 Mvar y se calcula la susceptancia del capacitor en p.u.

**Tabla 19:** Datos del capacitor del sistema.

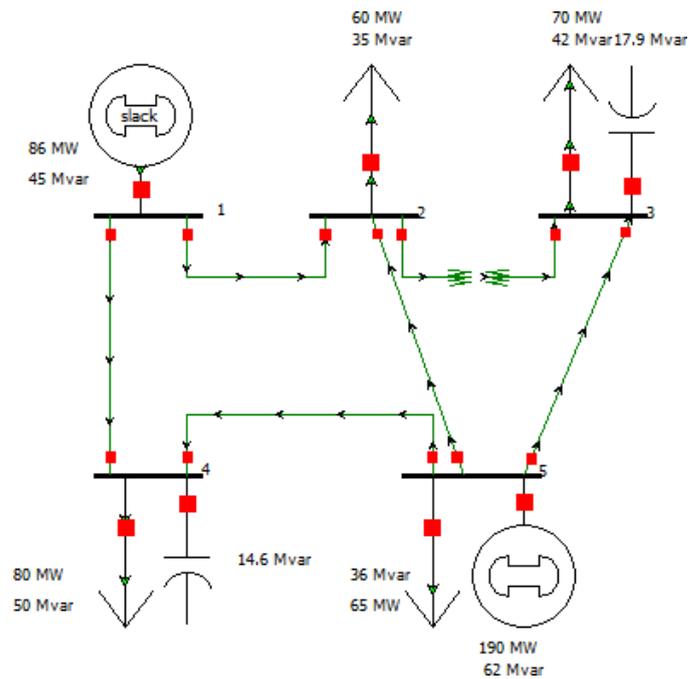
Barra	Capacidad en Mvar
3	18
4	15

Con los datos previamente descritos y teniendo en cuenta la potencia mencionada, se ha calculado la matriz Ybarra. Los resultados obtenidos por el programa se muestran en la **Figura 56**.

```
Matriz Ybarra:
[[ 4.99312797-24.9432525j  -2.49500422+14.99312719j
  0.          +0.j        -2.49812375+10.00312531j
  0.          +0.j        ]
 [-2.49500422+14.99312719j  7.49998799-59.90264718j
  0.          +24.375j     0.          +0.j
 -5.00498378+19.97751999j]
 [ 0.          +0.j        0.          +24.375j
  4.00160064-40.17702756j  0.          +0.j
 -4.00160064+16.00640256j]
 [-2.49812375+10.00312531j  0.          +0.j
  0.          +0.j        6.51493991-27.81071641j
 -4.01681616+18.0075911j ]
 [ 0.          +0.j        -5.00498378+19.97751999j
 -4.00160064+16.00640256j -4.01681616+18.0075911j
 13.02340058-53.88651365j]]
```

**Figura 56:** Resultados Ybarra del problema modelo 2.

Para comparar los resultados, se llevó a cabo una simulación del problema modelo utilizando el programa PowerWorld, como se indica en la **Figura 57**.



**Figura 57:** Simulación del problema modelo 2 en el programa PowerWorld

De la simulación se obtiene la Ybarra como se indica en la **Figura 58**. Al comparar estos resultados con los obtenidos con la herramienta desarrollada mostrados en la **Figura 56** no se observan diferencias significativas.

	Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5
1	1 1		4.99 - j24.94	-2.50 + j14.99	-0.00 + j24.38	-2.50 + j10.00	
2	2 2		-2.50 + j14.99	7.50 - j59.90	-0.00 + j24.38		-5.00 + j19.98
3	3 3			-0.00 + j24.38	4.00 - j39.55		-4.00 + j16.01
4	4 4		-2.50 + j10.00			6.51 - j27.81	-4.02 + j18.01
5	5 5			-5.00 + j19.98	-4.00 + j16.01	-4.02 + j18.01	13.02 - j53.89

**Figura 58:** Resultados Ybarra obtenido de programa Powerworld.

Para el correcto funcionamiento del programa, al ingresar las cargas de potencia referentes a las barras (generadores y cargas), y que se hallen expresados en MW o Mvar, se deben ingresarse en valores por unidad. Es importante señalar que todo el programa ha sido diseñado para trabajar en valores por unidad, y los resultados que se obtengan del programa también se presentarán en valores por unidad.

En **Figura 59** se presentan los resultados obtenidos del programa diseñado. Y en el **Anexo 3** se indican más a detalle los datos generados al simular el sistema.

```

Valores finales
Voltaje calculado:
[ 1.01      0.98352408 0.99728409 0.98630791 1.      ]
Ángulo calculado en grados:
[ 0.      -1.58601039 -2.21932841 -1.86665459 -0.68915889]
Potencia calculada:
[ 0.86557261 -0.6      -0.7      -0.8      1.25      ]
Potencia reactiva:
[ 0.50162672 -0.35      -0.42      -0.5      0.26099051]

```

**Figura 59:** Resultados obtenidos de la herramienta desarrollada.

El problema modelo con el que se trabajó incluye un transformador y dos capacitores (o bancos de capacitores), estos resultados sirven para validar el correcto funcionamiento del programa desarrollado. Los resultados obtenidos de la simulación en PowerWorld se presentan en la **Figura 60** y pueden compararse con los obtenidos anteriormente.

	Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar
1	1	1	1	1.000	1.01000	1.010	0.00			86.44	44.76	
2	2	2	1	1.000	0.98353	0.984	-1.58	60.00	35.00			
3	3	3	1	1.000	0.99729	0.997	-2.22	70.00	42.00			17.90
4	4	4	1	1.000	0.98631	0.986	-1.86	80.00	50.00			14.59
5	5	5	1	1.000	1.00000	1.000	-0.69	65.00	36.00	190.00	62.07	

**Figura 60:** Resultados obtenidos de la simulación de PowerWorld.

Al observar los voltajes y ángulos, no se percibe una variación significativa, ver **Tabla 20**; él cambia más notable se evidencia en la generación de la potencia reactiva en la barra 5. Esto se debe a que en el cálculo solo se considera la potencia activa, por lo que es necesario agregar la potencia reactiva de la carga 36 Mvar al resultado de 26,09 Mvar, lo que resulta en 62,09 Mvar, que es similar al resultado del programa PowerWorld. Con la resolución del problema modelo 2, se ha comprobado la funcionalidad del transformador y el capacitor en la herramienta desarrollada.

**Tabla 20:** Comparación de voltajes Problema 2.

Nudos	Herramienta diseñada	PowerWorld	% Error
1	1,01	1,01	-
2	0,98352408	0,98353	$6,02 * 10^{-4}\%$
3	0,99728409	0,99729	$5,93 * 10^{-4}\%$
4	0,98630791	0,98631	$2,11 * 10^{-4}\%$
5	1	1	-

Ahora, para comprobar el funcionamiento del modelado del motor síncrono en la herramienta desarrollada, se comprueba el efecto que tendrá un motor síncrono con una carga reactiva de 40 Mvar en la barra 3. Por lo que, en la **Figura 61** se muestran los efectos de modificar los datos del problema modelo 2. Además, en el **Anexo 4** se indica los datos generados al solucionar el sistema.

```

Valores finales
Voltaje calculado:
 [1.01      0.97822095 0.98383042 0.98630069 1.      ]
Ángulo calculado en grados:
 [ 0.      -1.53119064 -2.14282482 -1.89545665 -0.73433534]
Potencia calculada:
 [ 0.86753984 -0.6      -0.7      -0.8      1.25      ]
Potencia reactiva:
 [ 0.5832312 -0.35      -0.82      -0.5      0.60074087]

```

**Figura 61:** Modificaciones a los resultados obtenidos.

Como se puede observar, al incluir en el análisis la carga del motor síncrono descrito anteriormente, se han modificado los resultados y valores, principalmente en la barra 3, donde la carga ha experimentado un aumento de carga debido a la suma de la carga original y a la carga generada por el motor síncrono. Además, el voltaje en la barra 3 cambió de 0,9972 a 0,9838 por lo que el efecto que ha causado la carga del motor síncrono es disminuir el voltaje en la barra, afectando en menor medida a las barras conectadas a la barra 3, en la **Tabla 21** se muestran los nuevos resultados obtenidos al incorporar el motor síncrono con una carga reactiva de 40 Mvar.

**Tabla 21:** Comparación de datos incorporando un motor síncrono.

Barras	Original	Con Motor síncrono
1	1,01	1,01
2	0,98352408	0,97822095
3	0,99728409	0,98383042
4	0,98630791	0,98630069
5	1	1

Otro aspecto importante es que la barra 1, que corresponde a Slack, debe suministrar más potencia. Se observa un aumento de potencia activa de 0,8656 a 0,8675 y la potencia reactiva de 0,5016 a 0,5832. Además, la barra 5, al ser una barra PV, también deberá compensar el aumento de cargas, aumentando la carga reactiva de 0,261 a 0,601. Estos cambios en los

resultados del sistema reflejan el impacto directo de la incorporación de la carga del motor síncrono en el problema.

### 6.3 Objetivo 3

Como se indicó anteriormente, el almacenamiento es aplicado mediante el uso de un archivo de texto (txt), así tenemos que, en la primera línea del archivo se almacena el número de barras del sistema, véase la **Figura 62**. En cambio, con respecto a los datos de líneas y barras estas se almacenan después del número de barras, en la **Figura 63** se muestra el formato utilizado para guardar los datos de las líneas y en la **Figura 64** el empleado para almacenar los valores referentes a las barras.

```
Numero de barras: 5
```

**Figura 62:** Almacenamiento del número de barras

```
Datos de la líneas
Lineas      ID      Z de línea      B de línea      Ytransf t      t
Linea 1-2:  1.0    0.0108+0.0649j  0.033j          0j              0.0
Linea 1-3:  0.0    0.0000+0.0000j  0j              0j              0.0
Linea 1-4:  1.0    0.0235+0.0941j  0.02j          0j              0.0
Linea 1-5:  0.0    0.0000+0.0000j  0j              0j              0.0
Linea 2-3:  2.0    0.0000+0.0000j  0j              0.04j          0.975
Linea 2-4:  0.0    0.0000+0.0000j  0j              0j              0.0
Linea 2-5:  1.0    0.0118+0.0471j  0.035j         0j              0.0
Linea 3-4:  0.0    0.0000+0.0000j  0j              0j              0.0
Linea 3-5:  1.0    0.0147+0.0588j  0.13j          0j              0.0
Linea 4-5:  1.0    0.0118+0.0529j  0.105j         0j              0.0
```

**Figura 63:** Almacenamiento de los datos de líneas.

```
Datos de Barras
Barras      ID      Voltaje      Angulo      Pgen      Qgen      Pcanga      Qcanga      Capac      Pmotor      Qmotor      L. inf Q      L. sup Q
Barra 1:    1.0    1.01         0.0         0.0       0.0       0.0         0.0         0j         0.0         0.0         0.0         0.0
Barra 2:    2.0    1.0         0.0         0.0       0.0       -0.6        -0.35        0j         0.0         0.0         0.0         0.0
Barra 3:    2.0    1.0         0.0         0.0       0.0       -0.7        -0.42        0.18j      0.0         0.0         0.0         0.0
Barra 4:    2.0    1.0         0.0         0.0       0.0       -0.8        -0.5         0.15j      0.0         0.0         0.0         0.0
Barra 5:    3.0    1.0         0.0         1.9       0.0       -0.65       -0.36        0j         0.0         0.0         0.0         0.0
```

**Figura 64:** Almacenamiento de los datos de las barras.

Con respecto al almacenamiento, este proceso es semejante al indicado anteriormente, donde se almacenan los resultados de voltajes, ángulos, potencia activa (P) y potencia reactiva (Q). Este procedimiento se indica en la **Figura 65**, en la cual se muestra el formato utilizado para guardar el resultado de la simulación.

```
Resultados
Barra      Voltaje      Angulo      P      Q
Barra 1    1.01         0.0         0.86557  0.50163
Barra 2    0.98352     -1.58601   -0.6     -0.35
Barra 3    0.99728     -2.21933   -0.7     -0.42
Barra 4    0.98631     -1.86665   -0.8     -0.5
Barra 5    1.0         -0.68916   1.25     0.26099
```

**Figura 65:** Almacenamiento de los resultados.

Para indicar la funcionalidad del proceso modificar datos, se mostrará el procedimiento de cómo se pueden modificar los datos en la herramienta desarrollada. Entonces, por ejemplo, en el problema 2, se ha añadido un motor síncrono con una carga reactiva de 40 Mvar; no obstante, es requerido modificar este valor por un motor con una carga de 60 Mvar, para ello se deberá seguir el procedimiento indicado en **Figura 66**.

```

Leer datos y resolver(1). Escribir datos y resolver(2). Modificar datos y resolver(3)
Ingrese el numero: 3
Ingrese el nombre del archivo que desea modificar(en formato txt): modelo22.txt
Modificar: Líneas(1), Transformadores(2), Capacitores(3), Motores sincronos(4). Terminar(0)
Ingrese el numero: 4
En que barra se encuentra el motor sincrono (indique 0 para terminar): 3
Ingrese la carga Q del motor sincrono: 0.6
En que barra se encuentra el motor sincrono (indique 0 para terminar): 0
Modificar: Líneas(1), Transformadores(2), Capacitores(3), Motores sincronos(4). Terminar(0)
Ingrese el numero: 0
    
```

**Figura 66:** Procedimiento para cambiar los datos de motores síncronos.

En la **Figura 67** se muestran los resultados obtenidos de esta modificación y se resumen en la **Tabla 22**. Los datos referentes a las líneas, barras y el resultado del flujo de potencia se detallan en el **Anexo 5**.

<u>Resultados</u>				
Barra	<u>Voltaje</u>	<u>Angulo</u>	P	Q
Barra 1	1.01	0.0	0.86812	0.57941
Barra 2	0.97669	-1.51611	-0.6	-0.35
Barra 3	0.97994	-2.12162	-0.7	-1.02
Barra 4	0.98888	-1.93459	-0.8	-0.5
Barra 5	1.0	-0.74844	1.25	0.48551

**Figura 67:** Resultados al cambiar la carga del motor síncrono.

**Tabla 22:** Comparación del cambio de motor.

Barras	Original	Motor síncrono	
		40 Mvar	60 Mvar
1	1,01	1,01	1,01
2	0,98352408	0,97822095	0,97669
3	0,99728409	0,98383042	0,97994
4	0,98630791	0,98630069	0,98888
5	1	1	1

Por otro lado, si se desea variar la inductancia o la relación de derivación del transformador, se deberá seguir el proceso indicado en la **Figura 68**. En donde se cambia el valor de la de la derivación del problema 2 de 0,975 a 0,95.

```

Leer datos y resolver(1). Escribir datos y resolver(2). Modificar datos y resolver(3)
Ingrese el numero: 3
Ingrese el nombre del archivo que desea modificar(en formato txt): modelo23.txt
Modificar: Lineas(1), Transformadores(2), Capacitores(3), Motores sincronos(4). Terminar(0)
Ingrese el numero: 2
Ingrese el numero del transformador {i-j}, ingrese 0 si desea terminar: 2-3
Ingrese la reactancia del transformador (2,3): 0.04j
Seleccione la derivacion del transformador (2,3): 0.95
Ingrese el numero del transformador {i-j}, ingrese 0 si desea terminar: 0
Modificar: Lineas(1), Transformadores(2), Capacitores(3), Motores sincronos(4). Terminar(0)
Ingrese el numero: 0
    
```

**Figura 68:** Procedimiento para cambiar los datos del transformador.

En la **Figura 69** se muestran los resultados obtenidos de esta modificación y se resumen en la **Tabla 23**. Además, en el **Anexo 6** se indican a detalle los datos de las líneas y barras, y el resultado del flujo de potencia. Con respecto a los cambios más notables, se observa una disminución de voltaje en la barra 2 en donde se encuentra ubicado el transformador, mientras que en las barras aledañas se ha visto un aumento leve del voltaje.

<u>Resultados</u>				
<u>Barra</u>	<u>Voltaje</u>	<u>Angulo</u>	<u>P</u>	<u>Q</u>
Barra 1	1.01	0.0	0.86795	0.5908
Barra 2	0.97776	-1.55589	-0.6	-0.35
Barra 3	1.00897	-2.26331	-0.7	-0.42
Barra 4	0.98631	-1.85577	-0.8	-0.5
Barra 5	1.0	-0.67218	1.25	0.18526

**Figura 69:** Resultados al cambiar la derivación del transformador.

**Tabla 23:** Comparación del cambio de la derivación del transformador.

<b>Barras</b>	<b>Derivación 0,975</b>	<b>Derivación 0,95</b>
<b>1</b>	1,01	1,01
<b>2</b>	0,98352408	0,97776
<b>3</b>	0,99728409	1,00897
<b>4</b>	0,98630791	0,98631
<b>5</b>	1	1

## 7. Discusión

En la presente investigación se ha desarrollado una herramienta para el análisis y solución de los flujos de potencia basado en el método de Gauss-Seidel, el análisis de flujos de potencia es importante, ya sea por motivos de investigación, recursos didácticos, o por planteamiento académico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Para el desarrollo de la herramienta computacional con el propósito del análisis de flujos de Potencia, se ha optado por el método de Gauss-Seidel. Sin embargo, la elección del método Gauss-Seidel no es recomendable frente a otros métodos más utilizados, como el método de Newton-Raphson o el método de desacoplado rápido, debido a sus problemas de convergencia. Tenelema (2019) indica en su investigación que el método Gauss-Seidel requiere un mayor número de iteraciones comparándolo con los métodos de: Newton-Raphson y el método de desacoplado rápido. También, señala que, la convergencia del método Gauss-Seidel es lenta y es directamente proporcional al factor de aceleración, esta convergencia se vuelve cada vez más lenta a medida que el tamaño del sistema se expande. Por otro lado, Stevenson (1986) señala que: “la experiencia con el método de Gauss-Seidel de resolución de los problemas de distribución de energía ha demostrado que se necesita un número excesivo de iteraciones antes de que la tensión corregida esté dentro de un índice aceptable de precisión” (p. 180). Pero a pesar de las limitaciones mencionadas, el método de Gauss-Seidel sigue siendo ampliamente utilizado porque es un método fácil de comprender y aplicar, especialmente en el análisis de sistemas eléctricos pequeños.

Entonces, para rectificar la cantidad de iteraciones es indispensable el uso del factor de aceleración. Como indica Grainger y Stevenson (2001) con respecto al método Gauss-Seidel, se ha mostrado que se puede reducir, considerablemente, el número de iteraciones, si el voltaje corregido de la barra se multiplica por una constante que incremente la cantidad de corrección, para que el voltaje sea más cercano al valor que se está aproximando. Por ejemplo, Telenema (2019) señala que, para reducir el número necesario de iteraciones, hay que multiplicar el voltaje corregido por el factor de aceleración ( $\alpha$ ) que, donde  $\alpha$  es 1,6 para redes radiales y 1,4 para redes de alta interconexión. Por otro lado, Kothari y Nagrath (2003) consideran que un valor general recomendado para el factor de aceleración ( $\alpha$ ) es 1,6. Con base en lo anteriormente mencionado, se ha evaluado el funcionamiento del algoritmo mediante una comparación con los resultados obtenidos utilizando el programa PowerWorld. Sin embargo, no se han observado una variación significativa entre los resultados; por lo tanto, el criterio adoptado ha generado una solución favorable.

Para el análisis de los flujos de potencia, la regulación de voltaje es importante para estabilizar y controlar el voltaje dentro de los límites normales de operación del sistema eléctrico, con la finalidad de mantener el sistema y los equipos conectados a la red sin problemas. Oleas (2019) indica algunos aspectos a considerar: los niveles de voltaje son controlados mediante la acción de dispositivo como la conmutación de capacitores e inductores, el movimiento de los cambiadores de taps de los transformadores, ajuste del campo de excitación de generadores, conexión y desconexión de líneas de transmisión, cortes de cargas. También, Kothari y Nagrath (2003) señalan otros elementos similares a considerar: equipos cuya actuación afectará principalmente a los valores de voltaje, como generadores síncronos, banco de condensadores y reactancias, transformadores con tomas variable de cargas. Considerando la literatura, se han modelado tres aspectos que se consideran los más relevantes: el modelamiento del transformador y la relación del tap, el comportamiento del capacitor, y el comportamiento del motor síncrono. Para comprobar su funcionamiento y la validez de la solución, se ha utilizado el programa PowerWorld; este programa se empleó para simular problemas y comparar los resultados obtenidos por la herramienta diseñada. Los valores obtenidos son coincidentes, por lo que se considera que el modelamiento de los elementos es preciso.

Con respecto al almacenamiento de resultados, existen diversas opciones como: MySQL, SQLite, Excel, archivos CSV, archivo de texto (txt), entre otros. Cada una de estas opciones ofrece distintas virtudes que se utilizan según las necesidades específicas para distintos programas. Por ejemplo, Morocho (2018) desarrolló un programa para el análisis de flujos de potencia basado en el método de Newton-Raphson utilizando como almacenamiento MySQL, debido a las potencialidades y ventajas que presenta sobre los otros sistemas. Como indica Marqués (2011), cada base de datos ha sido diseñada para satisfacer los requisitos de información específicos para cada proyecto. Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, se utilizó un archivo de texto como almacenamiento de los resultados obtenidos de la simulación, debido a que la complejidad del programa lo amerita, ya que al finalizar el cálculo se genera la solución inmediatamente. Y dado el requerimiento de una medida de almacenamiento sencilla y fácil de comprender, el formato de archivo de texto resulta adecuado para este propósito; además, el uso de este tipo de archivos permite una mejor manipulación de los datos en los procesos de almacenamiento y modificación.

## 8. Conclusiones

Del trabajo de investigación, se destacan las siguientes conclusiones:

- El método de Gauss-Seidel es una opción a considerar en el análisis de flujos de potencia, sus características lo hacen idóneo para el desarrollo de herramientas de cálculo, ya que es un método fácil de comprender y aplicar. Sin embargo, se requiere considerar algunas de sus limitaciones y soluciones para mejorar el desempeño del método. La limitación más significativa a considerar es el problema de convergencia, que incrementa notablemente el número de iteraciones para alcanzar la convergencia del resultado. Entonces, la solución de este problema, es aplicar un factor de aceleración de  $\alpha = 1,6$  recomendado para el análisis de potencia en sistemas pequeños. Para la validación de la herramienta, se utilizaron problemas modelos y se compararon los resultados obtenidos con los del programa PowerWorld, herramienta empleada en el análisis de flujos de potencia. Además, en el primer problema, de 3 barras, se obtuvo un error máximo de  $2,08 * 10^{-4}\%$ ; mientras que, el error encontrado en el análisis de un sistema IEEE de 9 barras fue de  $6,03 * 10^{-3}\%$ .
- En el análisis de flujos de potencia, un aspecto importante a considerar es la regulación de voltaje. Por lo que, en esta investigación, se han modelado tres elementos importantes para la regulación de voltaje: el tap de transformador, el capacitor o banco de capacitores y el motor síncrono. La incorporación de estos elementos en la herramienta permite simular de manera más precisa el sistema eléctrico de potencia. Entonces, para validar el funcionamiento de los elementos modelados, se procede a la comparación de resultados entre problemas modelo que incluyan elementos de regulación de voltaje. Para este análisis, se utilizan programas que tengan el modelado de estos elementos o mediante el uso de herramientas de cálculo. En esta investigación, se ha empleado el programa PowerWorld, que incluye en sus funciones la simulación de líneas de transmisión, tap de transformadores, shunt de capacitores, y distintos tipos de análisis manejados en el SEP. El error calculado entre los resultados es un valor pequeño, generalmente inferior a  $10^{-3}\%$ .
- Con respecto al almacenamiento de los datos generados por la herramienta computacional, se ha optado por emplear archivos de texto como almacenamiento. Se seleccionó este formato dado que su manejo es fácil y

simple. Además, este tipo de archivos son fáciles de manipular en su escritura y lectura, por lo que resulta más cómodo para manejarlos en la investigación. Otras alternativas para operar este tipo de datos, son archivos de Excel, ya que para este tipo de herramienta no es necesario un almacenamiento riguroso.

## 9. Recomendaciones

Para el desarrollo de futuros trabajos de investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda el diseño de una herramienta computacional para la solución de flujos de potencia, basado en el método de Newton-Raphson que incorpore el modelamiento de los elementos de regulación de voltaje. Posterior, analizar los resultados obtenidos de la herramienta con otras herramientas dedicadas al análisis de flujos de potencia, como la herramienta PowerWorld. Para finalizar, establecer una comparación de resultados entre las herramientas basadas en los métodos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson.
- Como se ha mencionado, los datos y resultados generados se almacenaron en un archivo de texto dado que su facilidad de uso y comodidad son virtudes favorables para este programa computacional. Sin embargo, esta elección es solo una consideración personal, y, por tanto, es recomendable utilizar distintos tipos de almacenamientos. Por ejemplo, el uso de Excel es una opción que ofrece una manipulación de datos más sencilla. En cambio, si se requiere un almacenamiento con robustez es importante utilizar bases de datos como MySQL, SQLite, entre otras.
- Por último, se recomienda el desarrollo de una interfaz gráfica, que permita identificar de una manera más clara las líneas, los transformadores, y las barras sin conexión. Esto facilitará también la incorporación de elementos de regulación de voltaje en el análisis del sistema. Además, de brindar información visual clara sobre el ingreso de datos, ofrecerán al usuario una experiencia más intuitiva y cómoda al utilizar la herramienta.

## 10. Bibliografía

- Anabel, G. (2015). Entorno de Desarrollo Integrado para el lenguaje ensamblador. *Bachelor's thesis, Universidad de las Ciencias Informáticas.*
- Arros, F. (2018). *Estudio y análisis del sistema eléctrico ecuatoriano mediante el modelo PLP.*
- Burrueco, D. (24 de enero de 2021). *La librería math.* Obtenido de InteractiveChaos: <https://interactivechaos.com/es/manual/tutorial-de-python/la-libreria-math>
- Cabello, M. (2010). *Introducción a las bases de datos relacionales.* Vision libros.
- Chazallet, S. (2016). *Python 3: los fundamentos del lenguaje.* Ediciones Eni.
- Chillán, J. (2021). Incorporación del transformador de tres devanados en la Solución de flujo de potencia por Newton-Raphson para conexión de equipos facts.
- Gómez, A., Abur, A., Alvarado, F., Álvarez, C., Cañizares, C., Cidrás, J., . . . Usaola, J. (2010). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica.*
- Gómez, A., Ramos, J. M., Macías, J. R., Ramos, E. R., & Santos, J. R. (2003). *Sistemas Eléctricos de Potencia.* Madrid: Son Educación S.A.
- González, S. (22 de marzo de 2023). *¿Qué es un archivo plano y cómo funciona?* Obtenido de AppMaster: <https://appmaster.io/es/blog/que-es-un-archivo-plano>
- González, M. (2007). *Matriz Admitancia de Barra.*
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (2001). *Análisis de sistemas de potencia.* McGraw-Hill.
- Gutiérrez, S. (2019). Análisis de corpus con Voyant Tools. *The Programming Historian en español.*
- Kothari, D., & Nagrath, I. (2003). *Sistemas eléctricos de potencia.* McGraw-Hill.
- Landa, J. (2010). *Redes Eléctricas 1.*
- Maldonado, A. (1987). Energización de Banco de Capacitores en una Subestación.
- Manfre, D., & Brea, E. (2015). Diseño de una metodología que permita mejorar los portafolios de proyectos de inversión en un sistema eléctrico de potencia. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V*, 124.
- Marqués, M. (2011). *Bases de datos.* Universitat Jaume.
- Martínez, M. (2015). Sistema para la extracción automática de información en archivos de texto plano generados por bases de datos. 14.
- Matulic, I. (2003). Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia. *Scielo.* Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892003000100005](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892003000100005)
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2019). *Plan Maestro de Electricidad.*

- Monjo, A. (s.f.). *Motor Síncrono*.
- Morocho, E. (2018). Desarrollo de una aplicación para almacenamiento de datos y solución de potencias incorporando dispositivos facts y transmisión HVDC.
- Moura, A. P., Moura, A. F., & Rocha, E. P. (2018). *Análise de fluxo de carga em sistemas de potência*. Artliber.
- Oleas, A. (2019). Control de voltaje en sistemas eléctricos de potencia usando transformadores con taps.
- Olivares, D. (2007). *Algoritmos de solución de Flujo de Potencia*.
- Oracle. (s.f.). *What is MySQL?* Obtenido de Oracle: <https://www.oracle.com/mysql/what-is-mysql/>
- Paniagua, K. (2018). *Análisis de pérdidas técnicas en el SEP(Sistema Eléctrico de Potencia) en estado estable o en mantenimiento con libranza*.
- Pérez, C. (2007). Líneas de transmisión. 279.
- PostgreSQL. (s.f.). *What is PostgreSQL?* Obtenido de PostgreSQL: <https://www.postgresql.org/about/>
- Python Software Foundation. (2020). *copy-Operaciones de copia superficial y profunda*. Obtenido de documentación de Python: <https://docs.python.org/es/3/library/copy.html>
- Ramírez, M. (2005). Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia.
- Raúl, G. (2011). *Python para todos*.
- Sánchez, A. (21 de Junio de 2013). *Usando un archivo de texto plano como base de datos: alternativa ligera a SQL*. Obtenido de Autonomía digital y tecnológica: <https://voragine.net/weblogs/usando-un-archivo-de-texto-plano-como-base-de-datos-alternativa-ligera-a-sql>
- Sánchez, A. (12 de mayo de 2022). *La librería Numpy*. Obtenido de Aprende con Alf: <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/numpy/>
- SQLite. (2022). *About SQLite*. Obtenido de SQLite: <https://www.sqlite.org/about.html>
- Stevenson, W. D. (1986). *Análisis de Sistemas Eléctrico de Potencia*. McGraw-Hill.
- Tenelema, E. (2019). Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados. 4-8.
- Toctaquiza, J. (s.f). Elementos constitutivos de un SEP.
- Trashorras, J. (2015). Subestaciones eléctricas.
- Turkel, W., & Crymble, A. (17 de julio de 2012). *Trabajar con archivos de texto en Python*. Obtenido de Programming Historian: <https://programminghistorian.org/es/lecciones/trabajar-con-archivos-de-texto>

Zamora, S. (1988). Flujo de Carga Newton-Raphson acoplado rápido con técnicas para orientar el análisis en casos de divergencia.

## 11. Anexos

### Anexo 1: Datos y resultados de problema modelo 1 sin límites.

```

Numero de barras: 3
Datos de la líneas
Líneas ID Z de línea B de línea Ytransf t t
Línea 1-2: 1.0 0.0200+0.0400j 0j 0j 0.0
Línea 1-3: 1.0 0.0200+0.0600j 0j 0j 0.0
Línea 2-3: 1.0 0.0100+0.0200j 0j 0j 0.0
Datos de Barras
Barras ID Voltaje Angulo Pgen Qgen Pcarga Qcarga Capac Pmotor Qmotor L. inf Q L. sup Q
Barra 1: 1.0 1.02 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 2: 3.0 1.02 0.0 0.5 0.0 -0.0 -0.0 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 3: 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 -1.0 -0.6 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Resultados
Barra Voltaje Angulo P Q
Barra 1 1.02 0.0 0.50977 0.07096
Barra 2 1.02 -0.47105 0.5 0.55124
Barra 3 1.00434 -0.96122 -1.0 -0.6
    
```

### Anexo 2: Datos y resultados de problema modelo 1 con límites.

```

Numero de barras: 3
Datos de la líneas
Líneas ID Z de línea B de línea Ytransf t t
Línea 1-2: 1.0 0.0200+0.0400j 0j 0j 0.0
Línea 1-3: 1.0 0.0200+0.0600j 0j 0j 0.0
Línea 2-3: 1.0 0.0100+0.0200j 0j 0j 0.0
Datos de Barras
Barras ID Voltaje Angulo Pgen Qgen Pcarga Qcarga Capac Pmotor Qmotor L. inf Q L. sup Q
Barra 1: 1.0 1.02 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 2: 3.0 1.02 0.0 0.5 0.0 -0.0 -0.0 0j 0.0 0.0 -0.1 0.4
Barra 3: 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 -1.0 -0.6 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Resultados
Barra Voltaje Angulo P Q
Barra 1 1.02 0.0 0.44788 0.0984
Barra 2 1.02 -0.36084 0.5 0.4
Barra 3 1.00429 -0.87973 -1.0 -0.6
    
```

### Anexo 3: Datos y resultado del problema modelo 2.

```

Numero de barras: 5
Datos de la líneas
Líneas ID Z de línea B de línea Ytransf t t
Línea 1-2: 1.0 0.0108+0.0649j 0.033j 0j 0.0
Línea 1-3: 0.0 0.0000+0.0000j 0j 0j 0.0
Línea 1-4: 1.0 0.0235+0.0941j 0.02j 0j 0.0
Línea 1-5: 0.0 0.0000+0.0000j 0j 0j 0.0
Línea 2-3: 2.0 0.0000+0.0000j 0j 0.04j 0.975
Línea 2-4: 0.0 0.0000+0.0000j 0j 0j 0.0
Línea 2-5: 1.0 0.0118+0.0471j 0.035j 0j 0.0
Línea 3-4: 0.0 0.0000+0.0000j 0j 0j 0.0
Línea 3-5: 1.0 0.0147+0.0588j 0.04j 0j 0.0
Línea 4-5: 1.0 0.0118+0.0529j 0.03j 0j 0.0
Datos de Barras
Barras ID Voltaje Angulo Pgen Qgen Pcarga Qcarga Capac Pmotor Qmotor L. inf Q L. sup Q
Barra 1: 1.0 1.01 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 2: 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 -0.6 -0.35 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 3: 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 -0.7 -0.42 0.18j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 4: 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 -0.8 -0.5 0.15j 0.0 0.0 0.0 0.0
Barra 5: 3.0 1.0 0.0 1.9 0.0 -0.65 -0.36 0j 0.0 0.0 0.0 0.0
Resultados
Barra Voltaje Angulo P Q
Barra 1 1.01 0.0 0.86557 0.50163
Barra 2 0.98352 -1.58601 -0.6 -0.35
Barra 3 0.99728 -2.21933 -0.7 -0.42
Barra 4 0.98631 -1.86665 -0.8 -0.5
Barra 5 1.0 -0.68916 1.25 0.26099
    
```

**Anexo 4:** Datos y resultado del problema modelo 2 añadiendo un motor síncrono con carga 40 Mvar en la barra 3.

Numero de barras: 5													
Datos de la líneas													
Líneas	ID	Z de línea	B de línea	Ytransf t	t								
Línea 1-2:	1.0	0.0108+0.0649j	0.033j	0j	0.0								
Línea 1-3:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 1-4:	1.0	0.0235+0.0941j	0.02j	0j	0.0								
Línea 1-5:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 2-3:	2.0	0.0000+0.0000j	0j	0.04j	0.975								
Línea 2-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 2-5:	1.0	0.0118+0.0471j	0.035j	0j	0.0								
Línea 3-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 3-5:	1.0	0.0147+0.0588j	0.13j	0j	0.0								
Línea 4-5:	1.0	0.0118+0.0529j	0.105j	0j	0.0								
Datos de Barras													
Barras	ID	Voltaje	Angulo	Pgen	Qgen	Pcarga	Qcarga	Capac	Pmotor	Qmotor	L. inf Q	L. sup Q	
Barra 1:	1.0	1.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 2:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	-0.35	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 3:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-0.42	0.18j	0.0	0.4	0.0	0.0	
Barra 4:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.8	-0.5	0.15j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 5:	3.0	1.0	0.0	1.9	0.0	-0.65	-0.36	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Resultados													
Barra	Voltaje	Angulo	P	Q									
Barra 1	1.01	0.0	0.86754	0.58323									
Barra 2	0.97822	-1.53119	-0.6	-0.35									
Barra 3	0.98383	-2.14282	-0.7	-0.82									
Barra 4	0.9863	-1.89546	-0.8	-0.5									
Barra 5	1.0	-0.73434	1.25	0.60074									

**Anexo 5:** Datos y resultado del problema modelo 2 añadiendo un motor síncrono con carga 60 Mvar en la barra 3.

Numero de barras: 5													
Datos de la líneas													
Líneas	ID	Z de línea	B de línea	Ytransf t	t								
Línea 1-2:	1.0	0.0108+0.0649j	0.033j	0j	0.0								
Línea 1-3:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 1-4:	1.0	0.0235+0.0941j	0.02j	0j	0.0								
Línea 1-5:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 2-3:	2.0	0.0000+0.0000j	0j	0.04j	0.975								
Línea 2-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 2-5:	1.0	0.0118+0.0471j	0.035j	0j	0.0								
Línea 3-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0								
Línea 3-5:	1.0	0.0147+0.0588j	0.22j	0j	0.0								
Línea 4-5:	1.0	0.0118+0.0529j	0.18j	0j	0.0								
Datos de Barras													
Barras	ID	Voltaje	Angulo	Pgen	Qgen	Pcarga	Qcarga	Capac	Pmotor	Qmotor	L. inf Q	L. sup Q	
Barra 1:	1.0	1.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 2:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	-0.35	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 3:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-0.42	0.18j	0.0	0.6	0.0	0.0	
Barra 4:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.8	-0.5	0.15j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Barra 5:	3.0	1.0	0.0	1.9	0.0	-0.65	-0.36	0j	0.0	0.0	0.0	0.0	
Resultados													
Barra	Voltaje	Angulo	P	Q									
Barra 1	1.01	0.0	0.86812	0.57941									
Barra 2	0.97669	-1.51611	-0.6	-0.35									
Barra 3	0.97994	-2.12162	-0.7	-1.02									
Barra 4	0.98888	-1.93459	-0.8	-0.5									
Barra 5	1.0	-0.74844	1.25	0.48551									

**Anexo 6:** Datos y resultado del problema modelo 2 cambiando la derivación del transformador a 0,95.

Numero de barras: 5												
Datos de la líneas												
Líneas	ID	Z de línea	B de línea	Ytransf t	t							
Línea 1-2:	1.0	0.0108+0.0649j	0.033j	0j	0.0							
Línea 1-3:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0							
Línea 1-4:	1.0	0.0235+0.0941j	0.02j	0j	0.0							
Línea 1-5:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0							
Línea 2-3:	2.0	0.0000+0.0000j	0j	0.04j	0.95							
Línea 2-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0							
Línea 2-5:	1.0	0.0118+0.0471j	0.035j	0j	0.0							
Línea 3-4:	0.0	0.0000+0.0000j	0j	0j	0.0							
Línea 3-5:	1.0	0.0147+0.0588j	0.13j	0j	0.0							
Línea 4-5:	1.0	0.0118+0.0529j	0.105j	0j	0.0							
Datos de Barras												
Barras	ID	Voltaje	Angulo	Pgen	Qgen	Pcarga	Qcarga	Capac	Pmotor	Qmotor	L. inf Q	L. sup Q
Barra 1:	1.0	1.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0j	0.0	0.0	0.0	0.0
Barra 2:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	-0.35	0j	0.0	0.0	0.0	0.0
Barra 3:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-0.42	0.18j	0.0	0.0	0.0	0.0
Barra 4:	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-0.8	-0.5	0.15j	0.0	0.0	0.0	0.0
Barra 5:	3.0	1.0	0.0	1.9	0.0	-0.65	-0.36	0j	0.0	0.0	0.0	0.0
Resultados												
Barra	Voltaje	Angulo	P	Q								
Barra 1	1.01	0.0	0.86795	0.5908								
Barra 2	0.97776	-1.55589	-0.6	-0.35								
Barra 3	1.00897	-2.26331	-0.7	-0.42								
Barra 4	0.98631	-1.85577	-0.8	-0.5								
Barra 5	1.0	-0.67218	1.25	0.18526								

## Anexo 7: Certificado de traducción del resumen

Loja, 21 de Diciembre, 2024

Yo, Mgtr. Marcela Angelita Ocampo Jaramillo, portadora de la cédula de identidad Nro. 1103125231, docente del Instituto de Idiomas de la Universidad Nacional de Loja, con título de Licenciada en Ciencias de la Educación, especialidad inglés, número de registro de SENESCYT 1031-07-755014; y Master en Gerencia y Liderazgo Educacional con número de registro SENESCYT 1031-14-86047597.

CERTIFICO:

Que la traducción al idioma inglés del resumen del Trabajo de Titulación, denominado **"Programa computacional en Python para resolver flujos de potencia del sistema eléctrico de potencia"**, perteneciente al egresado Gilson Eduardo Jaramillo Ordoñez con Nro. de cédula 1105176711, corresponde al texto original en español. Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente en lo que él creyera conveniente.



Mgtr. Marcela Ocampo Jaramillo

Docente de Inglés

C.I 1103125231