



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SIMULACION DE FLUJOS DE POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA  
MEDIANTE EL MÉTODO DE GAUSS SEIDEL**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO**

**PRESENTA:**

**JULIO CESAR SÁNCHEZ CID**

**ASESOR:**

**M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA**

**PUEBLA, PUE.**

**JUNIO DE 2021**



Contenido

Índice de Figuras.....4

Índice de Tablas .....5

1 Protocolo De Tesis.....6

1.1 Introducción.....6

1.2 Planteamiento del Problema .....7

1.3 Justificación .....8

1.4 Objetivo General.....9

1.5 Objetivos particulares .....9

1.6 Hipótesis .....9

1.7 Limitaciones y alcances.....9

2 Introducción a los estudios de Flujos de Potencia .....10

2.1 Introducción.....10

2.2 El problema de flujos de potencia .....11

2.3 Métodos de solución de ecuaciones algebraicas no lineales.....15

- Sistemas de ecuación.....16
- Método de Gauss-Seidel.....17

2.4 Lenguajes de programación .....19

- Lenguaje de programación FORTRAN.....21
- Lenguaje de programación C.....22

2.5 Introducción a Matlab .....23

- Elementos y funciones básicas de Matlab.....24
- Funciones en M-Archivos.....26
- Programación con sentencias en Matlab.....27

3 Metodología para la implementación numérica .....29

3.1 Introducción.....29

3.2 Ecuaciones del sistema de potencia.....30

- Ecuaciones de la red.....30
- Ecuaciones para la carga en las barras.....31
- Ecuaciones de flujo en las líneas .....31

3.3 Técnicas de Solución.....32

- Método de Gauss Iterativo basado en Y barra .....32
- Aceleración de la convergencia.....34
- Buses de Voltaje Controlado .....35
- Representación de transformadores .....36



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

3.4	Descripción del programa desarrollado .....	40
•	Descripción general.....	40
•	Diagrama de flujo .....	48
4	Resultados.....	62
4.1	Introducción.....	62
4.2	Descripción y simulaciones de los sistemas de prueba .....	62
•	Caso 1 Sistema de prueba de 4 Barras con Transformador .....	64
•	Caso 2 Sistema de prueba de 4 Barras sin Transformador.....	66
•	Caso 3 Sistema de prueba de 5 Barras.....	68
•	Caso 4 Sistema de prueba de 5 Barras con cambio del bus de compensación.....	69
•	Caso 5 Sistema de prueba de 9 Barras.....	71
•	Caso 6 Sistema de prueba de 14 Barras.....	73
•	Caso 7 Sistema de prueba de 30 Barras.....	77
4.3	Observaciones y análisis de resultados .....	80
5	Conclusiones .....	83
5.1	Conclusiones .....	83
5.2	Áreas de oportunidad para trabajos futuros .....	83
	Bibliografía.....	84
	Anexos A.....	85
	A1 Funciones básicas de operación en Matlab. ....	85
	A2 Funciones básicas de trigonometría para Matlab.....	86
	A3 Funciones básicas de formato para Matlab. ....	87
	A4 Funciones para expresar números complejos en Matlab. ....	88
	A5 Resolución de la Ecuación 3.36 .....	88
	Anexos B.....	90
	B1 Caso 1 Sistema de prueba de 4 Barras con Transformador .....	90
	B2 Formato de salida del caso 2.....	91
	B3 Formato de salida del caso 3.....	92
	B4 Formato de salida del caso 4.....	93
	B5 Formato de salida del caso 5.....	94
	B6 Formato de salida del caso 6.....	95
	B7 Formato de salida del caso 7.....	96
	B8 Tablas de solución del caso 5.....	98
	B9 Tablas de solución del caso 6.....	100
	B10 Tablas de solución del caso 7 .....	104



## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1 a) Representación del flujo de potencia real de la fuente a la una barra i. b) Representación del flujo de potencia reactiva de la fuente a la una barra i. (Stevenson, 1995)</b> .....	13
<b>Figura 2.2 Diagrama de clasificación de los métodos de solución para sistemas de ecuaciones</b> .....	15
<b>Figura 2.3 Clasificación de los lenguajes de programación</b> .....	20
<b>Figura 2.4 Elementos de Matlab 1,3 y 4</b> .....	25
<b>Figura 2.5 Elementos de Matlab 2 y 5</b> .....	25
<b>Figura 2.6 Formato general para el bloque for</b> .....	27
<b>Figura 2.7 Formato general para el bloque while</b> .....	27
<b>Figura 2.8 Formato general para el bloque if</b> .....	28
<b>Figura 2.9 Formato general para el bloque if con 2 condiciones</b> .....	28
<b>Figura 2.10 Formato general para el bloque if con varias condiciones</b> .....	28
<b>Figura 3.1 Circuito equivalente de un transformador (El-Abiad, 1968)</b> .....	36
<b>Figura 3.2 Circuito <math>\pi</math> equivalente. (El-Abiad, 1968)</b> .....	37
<b>Figura 3.3 Circuito <math>\pi</math> equivalente con su relación de transformación. (El-Abiad, 1968)</b> .....	39
<b>Figura 3.4 Estructura general del archivo PRINCIPAL.m del proyecto en Matlab</b> .....	45
<b>Figura 3.5 Formato de entrada del caso 2 (Stevenson, 1995)</b> .....	46
<b>Figura 3.6 Formato general de impreción de datos en Matlab</b> .....	47
<b>Figura 3.7 Diagrama de la rutina PRINCIPAL</b> .....	49
<b>Figura 3.8 Diagrama de flujo para la determinación de <math>Y_{bus}</math></b> .....	50
<b>Figura 3.9 Diagrama de flujo para la adecuación de <math>opdata</math>(Cambio a PU)</b> .....	51
<b>Figura 3.10 Diagrama de flujo para Inicializar los voltajes en las barras</b> .....	51
<b>Figura 3.11 Diagrama de flujo para calculas las constantes <math>l_p</math> y <math>Kl_p</math></b> .....	52
<b>Figura 3.12 Diagrama de flujo para calculas la constante <math>ylpq</math></b> .....	52
<b>Figura 3.13 Diagrama de flujo para determinar los voltajes por el método Gauss-Seidel</b> .....	54
<b>Figura 3.14 Diagrama de flujo para determinar los flujos en las líneas</b> .....	55
<b>Figura 3.15 Diagrama de flujo para calcular las potencias generadas del sistema</b> .....	57
<b>Figura 3.16 Diagrama de flujo para restablecer los cálculos del SEP si existen límites de potencia reactiva en el circuito</b> .....	58
<b>Figura 3.17 Diagrama de flujo para verificar los generadores que han excedido los límites de potencia reactiva</b> .....	60
<b>Figura 3.18 Arreglo de la subrutina para calcular las potencias reactivas generadas</b> .....	60
<b>Figura 3.19 Diagrama de flujo para recalculas los valores del SEP</b> .....	61
<b>Figura 4.1 Diagrama Unifilar del caso 1</b> .....	64
<b>Figura 4.2 Diagrama Unifilar del caso 2</b> .....	66
<b>Figura 4.3 Diagrama Unifilar del caso 3 y del caso 4</b> .....	68
<b>Figura 4.4 Diagrama Unifilar del caso 5</b> .....	71
<b>Figura 4.5 Diagrama Unifilar del caso 6</b> .....	74
<b>Figura 4.6 Diagrama Unifilar del caso 7</b> .....	78
<b>Figura 4.7 Grafica de iteraciones convergentes v factor de aceleración</b> .....	81
<b>Figura 4.8 Grafica de tiempo de convergencia v factor de aceleración</b> .....	82



## Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1 Variables conocidas o desconocidas para cada clase de barra en la red eléctrica.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.2 Sentencias de control para la programación FORTRAN .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2.3 Elementos básicos de Matlab.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3.1 Estructura del archivo PRINCIPAL.m .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3.2 Variables relacionadas al formato digital del análisis de los SEP .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4.1 Datos de las barras del caso 1 .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.2 Datos de las líneas del caso 1 .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.3 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 1 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.4 Pruebas de resultados del caso 1 con variación de tolerancias .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.5 Solución del SEP/caso 1 .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.6 Datos de las barras del caso 2.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.7 Datos de las líneas del caso 2.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.8 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 2 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.9 Pruebas de resultados del caso 2 con variación de tolerancias .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.10 Solución del SEP/caso 2 .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.11 Datos de las barras del caso 3.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.12 Datos de las líneas del caso 3 y 4 .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.13 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 3 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.14 Pruebas de resultados del caso 3 con variación de tolerancias .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.15 Solución del SEP/caso 3 .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.16 Datos de las barras del caso 4.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.17 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 4 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.18 Pruebas de resultados del caso 4 con variación de tolerancias .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.19 Solución del SEP/caso 4.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.20 Datos de las barras del caso 5.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.21 Datos de las líneas del caso 5.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.22 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 5 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.23 Pruebas de resultados del caso 5 con variación de tolerancias .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.24 Solución del SEP/caso 5.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4.25 Datos de las barras del caso 6.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4.26 Datos de las líneas del caso 6.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.27 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 6 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4.28 Pruebas de resultados del caso 6 con variación de tolerancias .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4.29 Solución del SEP/caso 6.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4.30 Datos de las barras del caso 7.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.31 Datos de las líneas del caso 7.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.32 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 7 (V9 v MATPOWER).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.33 Pruebas de resultados del caso 7 con variación de tolerancias .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.34 Solución del SEP/caso 7.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.35 Valores mínimos de iteración de convergencia de cada caso simulado .....</i>	<i>81</i>



# 1 Protocolo De Tesis

## 1.1 Introducción

Actualmente los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) crecen constantemente por el enorme aumento de la demanda, es por eso que se tiene la necesidad de planear apropiadamente el manejo de cada elemento, con el objetivo de diseñar nuevos SEP e incluso para tener mejor control ante el aumento de nuevos equipos; es así que se puede asegurar un alto rendimiento en la transmisión de la energía en un territorio específico.

Los programas que determinan el cálculo del flujo de potencia son una base primordial para el desarrollo del análisis en un sistema eléctrico, ya que esto puede facilitar su diseño y operación. Las compañías de electricidad tienen control de sus instalaciones pudiendo descubrir debilidades como voltajes bajos, cargas excesivas o sobrecargas en las líneas, pero eso lo logran gracias al monitoreo que hacen con el uso de grades y elaborados softwares. Por eso es importante elaborar un modelo digital que permita realizar los cálculos y así obtener la información clave que sea de utilidad a todos aquellos servidores que así lo requieran.

El presente trabajo está estructurado por cinco capítulos, en el primero se explica la metodología y las limitaciones que se emplearan para el desarrollo del proyecto, así como los principios propuestos para la correcta ejecución de este estudio. El capítulo 2 de esta tesis se dedica a realizar una recopilación generalizada sobre los principios que establecen los flujos de potencia como los métodos de solución de ecuaciones y los fundamentos básicos de un software para poder programar (Para este trabajo se usó Matlab, la cual es una plataforma de control numérico matricial que brinda un entorno de desarrollo completo con un lenguaje de programación apropiado para el objetivo del proyecto). Mientras que en el capítulo 3 se muestra el análisis y determinación de las ecuaciones del método por el cual el programa realizará dichos cálculos (Durante el desarrollo se utilizó el método Gauss Seidel, el cual será detallado en su respectivo orden). Por último, cabe destacar que en este documento se simularán siete casos para comprobar la eficiencia del programa, los cuales serán descritos en el capítulo 4.

Las bases serán asentadas bajo los principios que fueron establecidos por cuatro grandes autores Grainger, Stevenson, Abiad y Stagg quienes plasmaron grandes aportes a la rama de ingeniería eléctrica tales como: Las obras *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*<sup>1</sup> y *Computer Methods in Power System Analysis*<sup>2</sup>; los cuales serán de vital importancia para este trabajo.

---

<sup>1</sup> Stevenson, W. D. (1995). *Elements of power system analysis*. New York: McGraw-Hill.

<sup>2</sup> El-Abiad, W. S. (1968). *Computer Methods in Power Systems*. New York: McGraw-Hill.



## 1.2 Planteamiento del Problema

El análisis de información de los SEP es un tema de gran interés para un país, es por eso que México tiende a considerar las posibilidades de mejorar cada aspecto importante que se relacione con el tema, ya que grandes instituciones procuran constantemente hacer mejoras a los equipos y a los métodos que se usan para este estudio.

Si bien los programas que realizan los análisis de SEP utilizados por grandes empresas de energía mantienen altos grados de confiabilidad es necesario optimizar las posibilidades de obtener dichos programas con diferentes metodologías teóricas que se han establecido durante las últimas décadas, para que así se obtenga una forma de poder compulsar dichas soluciones aumentando la eficacia de los resultados.

Existen una gran variedad de métodos que son usados para poder llegar a obtener la información que representa a un sistema, uno de estos es el método de Gauss Seidel; el cual sigue un proceso iterativo asignando valores aproximados de los voltajes de barra que se desconocen y calculando nuevos resultados a partir de los estimados en su iteración anterior. Este proceso resulta ser un método muy tedioso si se considera realizarlo de manera manual, ya que el número de iteraciones puede variar considerablemente dependiendo de los datos especificados por el usuario.

Esto nos lleva a la pregunta ¿Es posible crear un programa que permita determinar los datos más relevantes de un SEP usando el método de Gauss Seidel?



## 1.3 Justificación

Llevar a cabo esta investigación es importante principalmente para los sectores energéticos e industriales de una sociedad. En primer lugar resulta un aspecto beneficioso porque si se desea extender un SEP para brindar el servicio a más poblaciones, es necesario controlar el aumento que representa esta tarea; pero al incrementar la capacidad que se tiene que cubrir también aumentan los elementos que se tienen que tomar en cuenta para realizar los cálculos de flujo de potencia, por lo tanto un formato digital que permita obtener los datos de flujo, otorgara un panorama aún más amplio de diseño o rediseño de un SEP según sea conveniente. Al tener los datos finales de un estudio de flujos las compañías podrán obtener la alternativa más viable para ejecutar un proyecto.

En segundo lugar, un estudio de flujo de potencia es relevante ya que con él se puede verificar el funcionamiento del SEP, el cual determina la magnitud y el ángulo del voltaje en cada barra, pero también se pueden obtener las potencias que fluyen en las líneas y la energía que tienen los distintos elementos presentes en el circuito. Por último, se calculan las pérdidas en todo el sistema.

En resumen, con los datos calculados se puede planear acciones para lograr y mantener las siguientes condiciones de operación óptimas:

1. La generación adecuada para cumplir con la demanda.
2. La obtención de las magnitudes de voltaje en las barras para asegurar sus valores dentro de los límites indicados de operación por el código de red vigente. (Energía, 2019)
3. La adecuada operación de los distintos elementos que contienen el SEP dentro de sus límites operativos seguros, con la finalidad de evitar sobrecargas y posibles daños al sistema.



## 1.4 Objetivo General

Elaborar un programa digital para la solución del problema de flujos de potencia en Corriente Alterna.

## 1.5 Objetivos particulares

- Utilizar MATLAB R2019, para el desarrollo del programa digital, el cual está basado en el lenguaje de programación FORTRAN.
- Utilizar el Método de Gauss-Seidel para la solución de un sistema de ecuaciones algebraico no lineal.
- Implementar el uso del tap en el transformador.
- Implementar el límite de potencia reactiva en los generadores.
- Generar archivos de entrada/salida de datos por archivo en el formato estándar de IEEE.

## 1.6 Hipótesis

Si se representa adecuadamente la formulación de Flujos de Potencia de un sistema eléctrico de manera que se obtenga un conjunto de ecuaciones algebraico no lineal, el sistema podrá ser resuelto y analizado por medio de un programa digital, lo cual permitirá realizar un análisis del SEP.

## 1.7 Limitaciones y alcances

- Se programará únicamente el método de Gauss Seidel.
- No se utilizarán esquemas de manejo para matrices dispersas.
- Se utilizará la matriz Y barra para realizar la descripción matemática de la conexión eléctrica.
- Se utilizarán los sistemas de prueba de IEEE para validar el funcionamiento del programa desarrollado.



## 2 Introducción a los estudios de Flujos de Potencia

### 2.1 Introducción

Para adentrarse al estudio de flujos de potencia se deben abordar cuatro apartados que ayudaran a la ejecución y desarrollo del proyecto. La primera parte de este capítulo permitirá conocer el entorno y la problemática del trabajo, de igual modo se abordarán los arreglos matemáticos necesarios para calcular un SEP. Por otra parte, en el segundo subcapítulo se revisarán los métodos más usados para obtener la solución de grandes sistemas de ecuaciones, pero solo se analizará detalladamente el método al que se enfocara esta obra, es decir Gauss-Seidel. También es importante comprender el medio digital para diseñar un programa, por lo tanto, en el subcapítulo tres se conocerán los tipos de lenguaje de programación más utilizados en la ingeniería y se mostrarán los aspectos más relevantes de estos lenguajes con la finalidad de mantener una fácil comunicación con el software. Por último, en el cuarto subcapítulo se presentará una introducción general del programa Matlab, el cual es una aplicación que permitirá compilar y ejecutar los algoritmos necesarios para cada aspecto importante del cálculo.



## 2.2 El problema de flujos de potencia

El problema que rodea a los SEP es un tema complejo y para entenderlo se tienen que analizar tres puntos en particular. Antes que todo es necesario fijar la información de entrada que solicita el programa para realizar los cálculos. Después se requieren conocer las fórmulas base que caracterizan al diagrama unifilar del circuito y por último hará falta comprender las variables asociadas que se relacionan al sistema de ecuaciones, así como las funciones que cumplen en el cálculo de potencia, debido a que las expresiones varían dependiendo del tipo de bus que se esté tratando.

Los métodos de solución existentes usan matrices de admitancias (propias y mutuas) o de impedancias (de operación y de transferencia) para visualizar un sistema, estas son representadas por:  $Y_{barra}$  y  $Z_{barra}$  (Ec. 2.1, Ec. 2.2). Dadas las limitaciones, para este estudio se utilizarán los valores de las admitancias de cada elemento del SEP para formar la  $Y_{barra}$  y serán representadas por la Ec. 2.3.

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2j} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & Y_{i3} & \cdots & Y_{ij} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$Z_{barra} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots & Z_{1j} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots & Z_{2j} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \cdots & Z_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & Z_{i3} & \cdots & Z_{ij} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} \quad \text{Ec. 2.3}$$

También es importante considerar las capacitancias de los condensadores en derivación puesto que estas herramientas generan parte de la potencia reactiva del sistema. De igual forma se tienen que tomar en cuenta la información de los transformadores que se encuentren en la red, ya que son de vital importancia para mantener el control del circuito.



Otro punto fundamental es conocer los valores iniciales de voltaje de cada barra y algunos valores de potencia real y reactiva (generada y demandada), pero estos valores se tendrán que proporcionar según el tipo de barra. (Grainger & Stevenson, 1996).

Para comprender las ecuaciones que se relacionan al sistema se tiene que asimilar que un estudio de flujos de potencia permite saber cuál es la cantidad de energía que corre en la red. Por lo que los voltajes y las corrientes estimadas antes de realizar los cálculos son valores que permiten al programa definir el estado inicial del sistema eléctrico. Se sabe que el voltaje en la barra  $i$  en coordenadas polares se representa por la Ec. 2.4.

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad \text{Ec. 2.4}$$

De igual forma la corriente en un elemento  $i$  se identifica por la Ec.2.5.

$$I_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde  $N$  es el número de buses totales del sistema. Por tanto, la potencia total que está presente en la barra se puede obtener de la siguiente manera.

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad \text{Ec. 2.7}$$

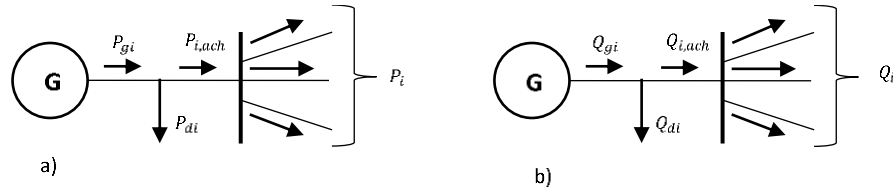
Estas expresiones se conocen por *las ecuaciones de flujo de potencia* y representan los valores calculados de la potencia real y reactiva que son representadas por  $P_{calc}$  y  $Q_{calc}$

Por otro parte, al analizar la cantidad de energía que puede correr en un bus y tomando el ejemplo de la figura 2.1 se observa que la potencia total es afectada por otra que podría ser generada de una fuente, pero de igual forma existe una potencia que está demandando energía. Este concepto se expresa algebraicamente por la ecuación Ec.2.8 y Ec. 2.9.



$$P_{prog} = P_g - P_d \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$Q_{prog} = Q_g - Q_d \quad \text{Ec. 2.9}$$



**Figura 2.1 a) Representación del flujo de potencia real de la fuente a la una barra i. b) Representación del flujo de potencia reactiva de la fuente a la una barra i. (Stevenson, 1995)**

Teniendo el conocimiento de estos dos conceptos se podría deducir que, si la potencia programada no es igual a la potencia que se calcula, se presenta un margen de error y se podría encontrar por medio de una diferencia (Ec. 2.10 y Ec. 2.11), es decir:

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Pero si los valores coinciden y el margen de error es cero, se dice que el sistema se mantiene en balance (Ec. 2.12 y Ec. 2.13).

$$P_i - P_{i,prog} = P_i - (P_g - P_d) = 0 \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$Q_i - Q_{i,prog} = Q_i - (Q_g - Q_d) = 0 \quad \text{Ec. 2.13}$$

Por último, es indispensable saber que existen cuatro variables que identifican a los buses: La potencia real, la potencia reactiva, la magnitud y el ángulo del voltaje. Pero también hay dos



ecuaciones para cada barra, las cuales se han observado con anterioridad (Ec. 2.6 y Ec. 2.7). Para tener el mismo número de variables desconocidas y el mismo número de ecuaciones es indispensable clasificar a los tipos de buses. De manera práctica se tienen que identificar tres clases: Barras de carga, barras de voltaje controlado y las barras de compensación.

1. Las barras de carga son aquellas que se encargan de sustraer la potencia del sistema para que los servidores puedan hacer uso de la energía. Por lo que no hay potencia que se pueda generar y los datos de potencia activa demandados son obtenidos de los registros del historial. Respecto a la cantidad de potencia reactiva demanda hay que considerar un valor superior a 0.85.
2. Las barras de voltaje controlado generalmente son aquella que se relacionan con un generador, lo que les permite controlar la cantidad de MW en el circuito y por lo tanto se puede mantener el voltaje constante.
3. Las barras de compensación no intervienen en la red y sirven para resarcir el sistema de ecuaciones. Se caracterizan por tener la magnitud y ángulo de voltaje constantes, lo que facilita el cálculo en el bus.

En la tabla 2.1 se resumen las variables conocidas y desconocidas de cada barra.

**Tabla 2.1 Variables conocidas o desconocidas para cada clase de barra en la red eléctrica.**

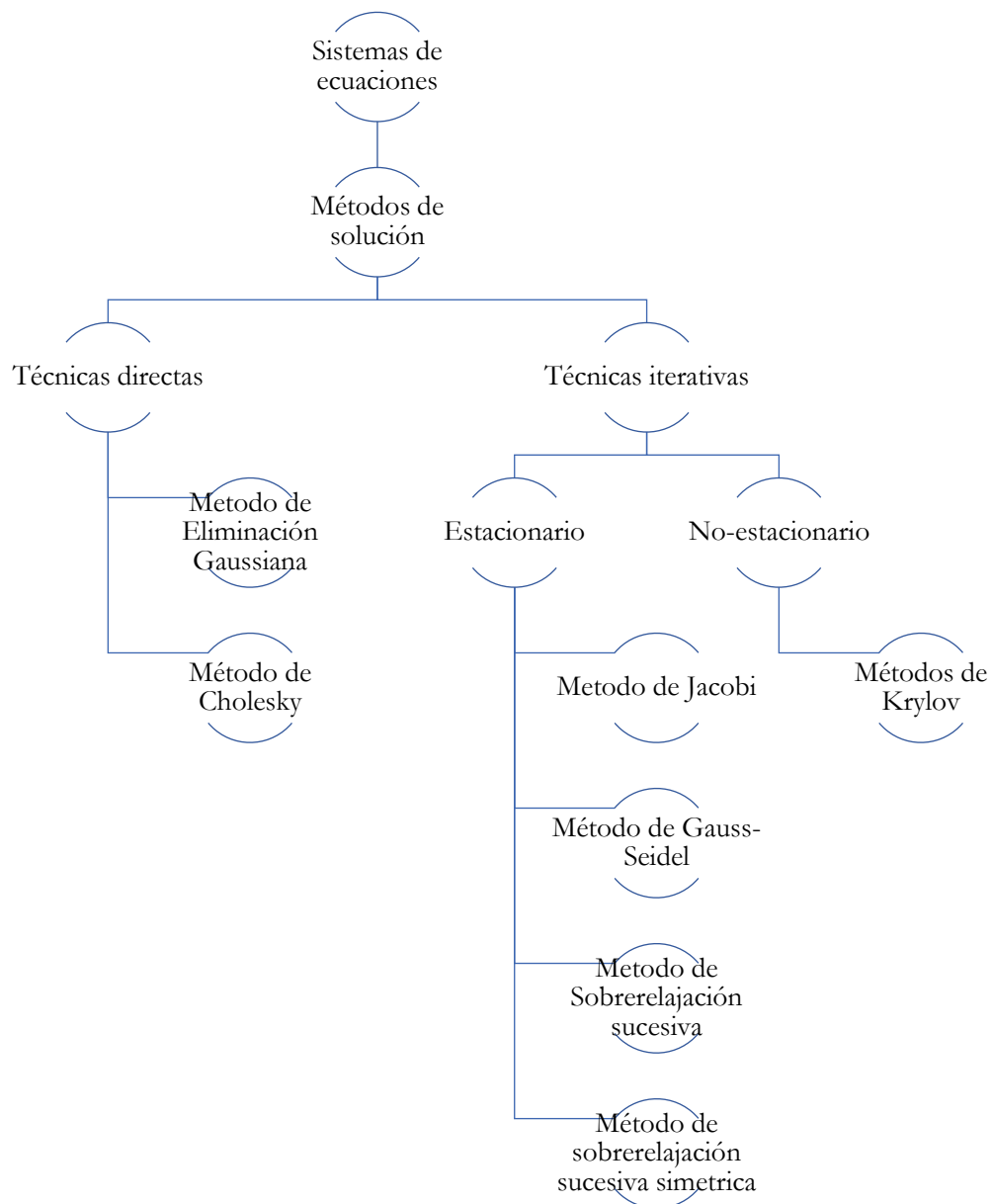
VARIABLES PARA EL CÁLCULO DE FLUJOS	Barra de Carga P-Q	Barra de Voltaje controlado P-V	Barra de compensación
$P_g$	0	Conocida	Desconocida
$Q_g$	0	Desconocida	Desconocida
$P_d$	Conocida	-	-
$Q_d$	Conocida	-	-
$V$	Desconocida	Conocida	Conocida
Angulo de voltaje	Desconocida	Desconocida	Conocida

El problema de este estudio consiste en resolver *las ecuaciones de flujo de potencia* que nos dan valores calculados para voltajes desconocidos de cada barra. De manera que con esos resultados exista un balance en el sistema manteniendo el margen de error nulo.



### 2.3 Métodos de solución de ecuaciones algebraicas no lineales

Los sistemas de ecuaciones mantienen un alto grado de importancia en varios ámbitos de estudio de la ingeniería pues establecer estos principios algebraicos permite construir tecnologías mucho más eficientes, pero al momento de aplicar conocimientos algebraicos a las diversas situaciones en la industria se pueden llegar a presentar problemas que no pueden ser resueltos analíticamente o de manera exacta y cuya solución debe ser abordada con ayuda de algún procedimiento numérico. Por lo que es importante conocer de forma general las técnicas que se usan para dar solución a los sistemas de ecuaciones.



*Figura 2.2 Diagrama de clasificación de los métodos de solución para sistemas de ecuaciones*



- **Sistemas de ecuación.**

Los sistemas de ecuaciones son arreglos numéricos que tienen la propiedad de ser tratados matricialmente para dar una solución concisa y confiable. Existe una gran variedad de métodos que solucionan dichos sistemas; estos se pueden clasificar de diferentes formas, una de estas se muestra en el diagrama descrito en la figura 2.2.

En dicha figura podemos observar que hay técnicas directas y técnicas iterativas, cada una se caracteriza por la forma en las que se usan y esto depende de las condiciones iniciales que rodean al problema.

Los métodos directos se definen como las técnicas numéricas que generan la solución de un sistema de ecuaciones en un número finito de operaciones aritméticas. (Solís, 2006). El más conocido de los métodos directos es la Eliminación Gaussiana. Este método es equivalente a realizar la descomposición de una matriz, en el producto de la matriz triangular inferior con valores (1) sobre la diagonal y la matriz triangular superior. La solución se obtiene resolviendo dos sistemas triangulares. Pero este método puede llegar a falla si en el proceso de eliminación se obtiene un elemento en la diagonal que no está definido, debido a que se realizaría una división entre cero.

Por otro lado, los métodos iterativos son aquellos que por diversas circunstancias son imposibles que lleguen a una respuesta si no es con el uso de una aproximación, es decir que un método iterativo construye una sucesión de vectores  $\{X^k\}$ ,  $k = 0, 1, 2 \dots$  la cual se espera que converja a la solución  $X^\circ$  del sistema  $Ax = b$ , dado una aproximación inicial  $X_0$ . El método se dice que convergente si se cumple la siguiente condición (Ec. 2.14).

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X^k = X^\circ \quad \text{Ec. 2.14}$$

Dado que un estudio de flujo de potencia crece dependiendo de la cantidad de barras en la red eléctrica el método de solución debe considerar la posibilidad de tener una amplia cobertura con un alto grado de aproximación, es por eso que las técnicas que estudian los SEP usan por lo general métodos iterativos o soluciones de sistemas no lineales.



- **Método de Gauss-Seidel**

Este método iterativo es un proceso de aproximación sucesiva en la solución de un sistema de ecuaciones y consiste básicamente en obtener una matriz resultante y proponer un vector que soluciona inicialmente al sistema. Para acelerar la convergencia, este método sustituye los nuevos valores de la aproximación siguiente conforme se vayan obteniendo sin esperar a tener un vector completo. Después, se debe realizar el mismo proceso (Iteraciones) hasta que la diferencia entre dos vectores que representen las condiciones iniciales cumpla con una tolerancia predefinida. El proceso continuará hasta que esta diferencia se encuentre dentro de un margen de error que es establecido al comenzar el método. (Cortés Rosas , González Cárdenas , Pinilla Morán , Salazar Moreno , & Tovar Pérez , 2019).

Debido a que las ecuaciones de red en un SEP con el uso de la matriz de admitancia generan como resultados grupos de ecuaciones algebraicas lineales se deduce que se han considerado valores de corrientes. Entonces cuando se especifican las corrientes, el conjunto de ecuaciones lineales se puede resolver para los voltajes. Sin embargo, en un sistema de energía, las potencias se conocen más que las corrientes. Por tanto, las ecuaciones resultantes en términos de potencia se vuelven no lineales y deben resolverse mediante técnicas iterativas, por este motivo para este trabajo se utilizará el método de Gauss Seidel.

Si se proponen las condiciones iniciales que rodean a este estudio el método de Gauss-Seidel asigna valores aproximados del voltaje de los buses del sistema y calcula nuevos voltajes a partir de los estimados en su iteración anterior. El proceso iterativo se repite hasta que los cambios en cada barra son menores a un valor mínimo que tiene que ser especificado al comenzar el método, es decir que se establece bajo un margen de error. Entonces sean  $P_i$  y  $Q_i$  las potencias reales y reactivas totales que se inyectan a la red a través de la barra  $i$  se puede establecer la Ec. 2.15.

$$P_i + Q_i = V_i I_i^* \tag{Ec. 2.15}$$

Para la solución numérica es preferible hacer lo que se muestran en las ecuaciones Ec. 2.16 y Ec. 2.17.

$$(P_i + Q_i)^* = (V_i I_i^*)^* \tag{Ec. 2.16}$$



$$(P_i - Q_i) = V^* I_i \quad \text{Ec. 2.17}$$

Si se conocen los voltajes bajo la Ec. 2.4 para una barra  $i$  y deduciendo que la corriente se establece bajo la Ec. 2.5 podemos expandir la expresión anterior de manera que obtenemos (Ec. 2.18)

$$P_i - jQ_i = V^*_i \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad \text{Ec. 2.18}$$

Suponiendo que se desea aproximar el margen de error de la diferencia de la potencia programada y la potencia calculada podemos obtener una ecuación general para determinar el voltaje calculado en cualquier barra  $i$  de un sistema de  $N$  barras la cual se muestra en la Ec. 2.19.

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_{i,prog} - jQ_{i,prog}}{V^{(k-1)*}_i} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V^{(k)}_j - \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} V^{(k-1)}_j \right] \quad \text{Ec. 2.19}$$

El índice (k) indica el número de la iteración en la que se está calculando el voltaje y (k-1) indica la iteración que le antecede. Esta ecuación solo se aplica a las barras de carga donde se especifican la potencia real y reactiva. Para las barras de compensación se usarán las magnitudes y ángulos de voltaje como constantes durante todo el proceso y solo se tendría que encontrar los valores de potencia generada.

En estudios realizados anteriormente por diversos autores se muestra un factor de aceleración que permite a los voltajes de las barras aproximarse con mayor rapidez disminuyendo el número de iteraciones. Esto se lleva a cabo por la expresión (Ec. 2.20).

$$V_{i,ac}^{(k)} = V_{i,ac}^{(k-1)} + \alpha(V_{i,ac}^{(k)} - V_{i,ac}^{(k-1)}) \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde  $\alpha$  es el símbolo que representa el factor de aceleración. Si este factor obtiene un valor igual 1, el voltaje quedara representado como el valor obtenido en el cálculo realizado en la



actual iteración, pero si se valora entre 1 y 2 entonces el valor se almacena como una cantidad extrapolada. En cuanto a las barras de voltaje controlado es de vital importancia calcular la potencia reactiva con la Ec. 2.21, ya que solo se especifican las magnitudes del voltaje en lugar de las potencias reactivas.

$$Q_i = -Im \left\{ V_i^* \sum_{j=i}^N Y_{ij} V_j \right\} \quad \text{Ec. 2.21}$$

La cual se puede expresar de forma algorítmica como:

$$Q_i^k = -Im \left\{ V_i^{(k-1)*} \left[ \sum_{j=1}^{i-1} V_j^{(k)} + \sum_{j=i}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \right\} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde  $I_m$  quiere decir “la parte imaginaria de” y los índices  $k$  representan las iteraciones correspondientes. Posteriormente para encontrar el valor del voltaje en este tipo de barra se hará uso de  $Q_i^k$  en la ecuación Ec. 2.19. Para este tipo de barras se obtiene un voltaje especificado, el cual se puede corregir con la magnitud del voltaje en esa iteración de la forma (Ec. 2.23).

$$V_{i,corr}^{(k)} = |V_i| \frac{V_i^{(k)}}{|V_i^{(k)}|} \quad \text{Ec. 2.23}$$

## 2.4 Lenguajes de programación

En las últimas décadas se ha resaltado la importancia de mantener una buena comunicación entre las personas físicas y los ordenadores con el objetivo de realizar tareas que son complejas para los usuarios y útiles para el desarrollo de una sociedad. Dado que las técnicas para crear programas han mejorado con el paso del tiempo es necesario estudiar este tema para poder expresar correctamente los algoritmos necesarios y así diseñar un programa que determine el cálculo de flujo de potencia en forma digital.

Primero se debe establecer que el aprendizaje de la programación radica en la necesidad de realizar dos actividades de forma simultánea, las cuales son:

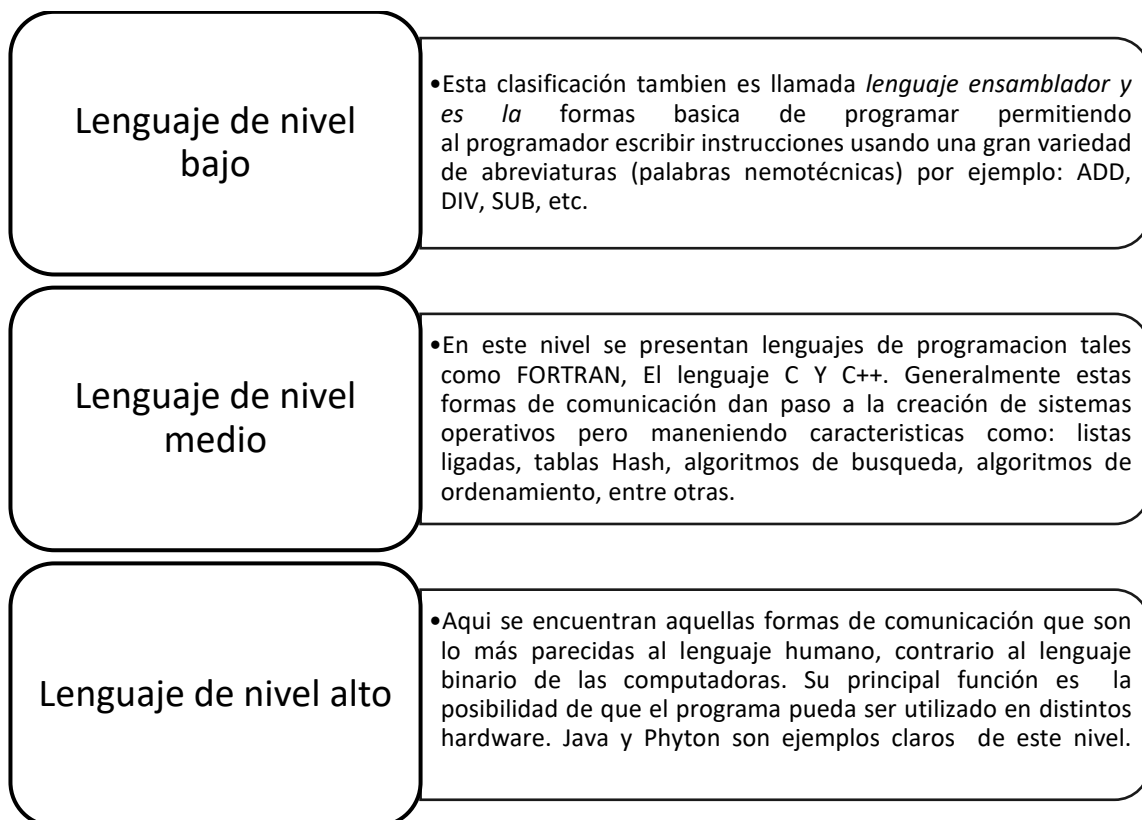


## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

1. Establecer un lenguaje para transmitir las órdenes necesarias y ejecutar un procedimiento en un hardware.
2. Realizar una lista definida y con un orden particular, que deberá tener un número finito de operaciones.

Por lo que una forma eficiente de transmitir una lista de ordenes es con el uso de un lenguaje de programación. Según Mathieu (2014) define a un lenguaje de programación como: “...un caso particular del lenguaje informático; este... permite hacer programas, pero también describir datos, configuraciones físicas y protocolos de comunicación entre equipos y programas.”

Cuando el lenguaje de programación es comprensible para las personas, este algoritmo tiende a recibir el nombre de código fuente, y a su vez este puede ser un archivo ejecutable; siempre y cuando se utilice un compilador o un intérprete. También es importante establecer que existen tres niveles de lenguaje para poder programar, estos se definen en la figura 2.3.



*Figura 2.3 Clasificación de los lenguajes de programación.*



Con esta información se puede expresar que Matlab es un sistema de alto nivel que maneja un lenguaje de programación único perteneciente a un nivel medio, ya que este software mantiene características de FORTRAN y del lenguaje en C.

- **Lenguaje de programación FORTRAN.**

“El nombre FORTRAN proviene de “formula translator” (traductor de fórmulas), y fue desarrollado originalmente por IBM en 1954, con el objetivo de poder escribir programas de cómputo científico ... en vez de tener que recurrir a lenguaje de maquina o ensamblador.” (Alcubierre, 2005).

FORTRAN es el lenguaje de programación más utilizado en el ámbito de la ingeniería, pero al igual que la comunicación humana un lenguaje de programación se va mejorando con el tiempo para satisfacer las necesidades que se vayan presentando en el momento, es por esto que cada cierto período de tiempo un comité internacional establece la sintaxis y la gramática del lenguaje logrando estandarizar una metodología que asegure el hecho de que los programas funcionen en cualquier hardware que tenga un compilador de este tipo. Un programa en FORTRAN tiene los siguientes elementos básicos:

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| a) Identificación del programa. | Este elemento es útil para localizar un programa ejecutable cuando existen varios archivos o script solo si se manejan rutinas o subrutinas. |
| b) Declaraciones de variables   | FORTRAN permite realizar sus operaciones con variables presentes en el cuerpo del script.  |
| c) Cuerpo del programa          | El cuerpo del programa es el lugar donde se pueden colocar cada código del algoritmo.  |
| d) Subprogramas.                | Esta es una herramienta que generalmente se usa para ordenar archivos de programación.   |



Por otra parte, los tipos de datos que pueden ser contenidos en el programa están enfocados a valores enteros (int), reales (real o double precision), complejos (complex), literales (character) y lógicos (logical) pero algunas versiones permiten el ingreso de otras variantes de estos datos. En cuanto a su formato en sus comienzos FORTRAN trabajaba bajo formatos fijos lo que ocasionaba un trabajo poco flexible, pero desde la actualización de Fortran90 se implementó una forma más dócil de elaborar programas. También es conveniente saber que esta clase de lenguaje trabaja con sentencias de control, en la tabla 2.2 se puede observar las clases de sentencias que tiene FORTRAN.

**Tabla 2.2 Sentencias de control para la programación FORTRAN**

Sentencias de control
Sentencia CONTINUE
Sentencia STOP
Sentencia GOTO incondicional
Sentencia IF
Sentencia de control redundantes
Sentencia de control obsoleta

- **Lenguaje de programación C.**

C nació realmente en 1978, con la publicación de “*The C Programming Language*”, por Brian Kernighan y Dennis Ritchie (W. Kernighan & M. Ritchie, 1978). Pero de igual forma que FORTRAN este medio ha pasado por actualizaciones que han mejorado notablemente su utilidad.

La técnica de comunicación en C es un modelo que programa instrucciones generales lo que le permite tener un alto grado de flexibilidad, es decir que se puede trabajar como un lenguaje de alto nivel, pero también funciona como un lenguaje de nivel ensamblador, escribiéndose únicamente usando caracteres que pertenecen al código ASCII. La implementación y popularidad de este lenguaje en la industria surge por una característica en especial; en pocas palabras la independencia ante algún software o hardware en particular.

Un programa en lenguaje C se compone de dos grupos de archivos; aquellos que se almacenan con una extensión (\*.c) o (\*.h). Los archivos con la extensión .h contienen declaraciones de variables y funciones globales y los archivos .c contienen la declaración y las definiciones de las funciones. También cabe destacar que un archivo en C (\*.c o \*.h) contiene los siguientes elementos básicos:



- a) Directivas de procesador      Este elemento permite una mejor compilación o modificación de programas en presencia de diversos entornos de ejecución
  
- b) Comentarios      Esta herramienta permite agregar notas que son de utilidad para identificar, recordar, recopilar o mostrar acciones que son usadas en el desarrollo del programa.
  
- c) Declaración de variables      De manera similar a FORTRAN; el lenguaje en C permite al programador realizar sus operaciones con variables que se encuentran en cuerpo del programa con la diferencia que mantiene un grado de libertad al distinguir clases de argumentos de otros.
  
- d) Bloques de definiciones de las funciones      Este es un lenguaje gráfico que permite ejecutar los algoritmos con uso de bloques para mejorar la forma de programación.

Los tipos de datos se pueden escribir de dos formas distintas: estándar y definidas de una biblioteca externa. Entre las variables estándar se encuentran las de tipo entero (int, long, short), las de tipo flotante (float y double) y la del código ASCII (char).

### 2.5 Introducción a Matlab

Los programas que ejecutan los procesos de cálculos numéricos han mostrado grandes resultados ante el avance tecnológico de la ingeniería. Pero cada uno de este software tiene fortalezas que permiten una mayor eficiencia al presentar una solución. Los programas más usados son: Matlab, Maple, MathCad y Mathematica. Haciendo referencia a la importancia de estas plataformas se podría citar la siguiente frase: “El área principal de interferencia entre Matlab y los programas de alto nivel es el procesamiento de números, programas que requieren cálculos repetitivos o el procesamiento de grandes cantidades de datos.” (Moore, 2007). Pero Matlab tiene un beneficio en particular, motivo por el cual se ha estudiado este software y utilizado para la ejecución del proyecto.



Este software proviene de la abreviatura de Matrix Laboratory que significa laboratorio de matrices y en efecto, esto quiere decir que la principal fortaleza es que las operaciones matriciales son más fáciles de manejar en este entorno virtual. Actualmente esta plataforma mantiene un lenguaje complejo, puesto que Matlab se escribió originalmente en FORTRAN y después se reescribió agregando propiedades del lenguaje C (precursor de C++). Por lo que fue importante entender las bases asentadas de estas dos formas de programación, en especial FORTRAN.

Este programa no solo trabaja con matrices, sino que también se pueden manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales e incluso trabajar con gráficas. Por otro lado, cabe destacar que al construir herramientas personalizadas se crean funciones o programas que tienen un propósito específico, estos son conocidos en Matlab como M-archivos, las cuales son agrupadas en librerías para usos específicos.

- **Elementos y funciones básicas de Matlab.**

Conocer las características de la plataforma brinda a los programadores un mejor ambiente para expresar sus ideas o escribir los algoritmos establecidos. Los elementos básicos que contiene la plataforma se describen en la tabla 2.3 y se pueden ver representados por su correspondiente numeración en la figura 2.4 y 2.5.

*Tabla 2.3 Elementos básicos de Matlab.*

No.	Elemento Window	Significado	Descripción
1	Command	Ventana de Comandos	Es el elemento principal de Matlab donde se pueden ejecutar operaciones o programas.
2	Editor	Ventana del Editor	Se usa para crear una lista de operaciones (Algoritmos).
3	Workspace	Espacio de trabajo	Muestra el conjunto de variables.
4	Current Directory	Directorio de trabajo	Muestra los archivos que hay en el directorio de trabajo actual.
5	Launch Pad	Ventana de plataforma	Este es el lugar donde se muestran las herramientas y funciones del programa.



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

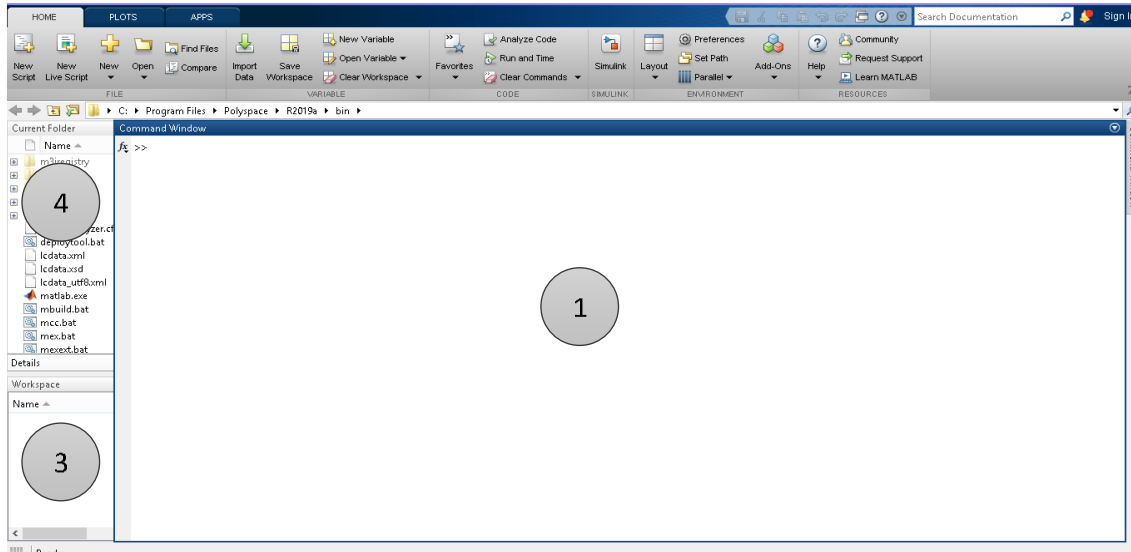


Figura 2.4 Elementos de Matlab 1,3 y 4.

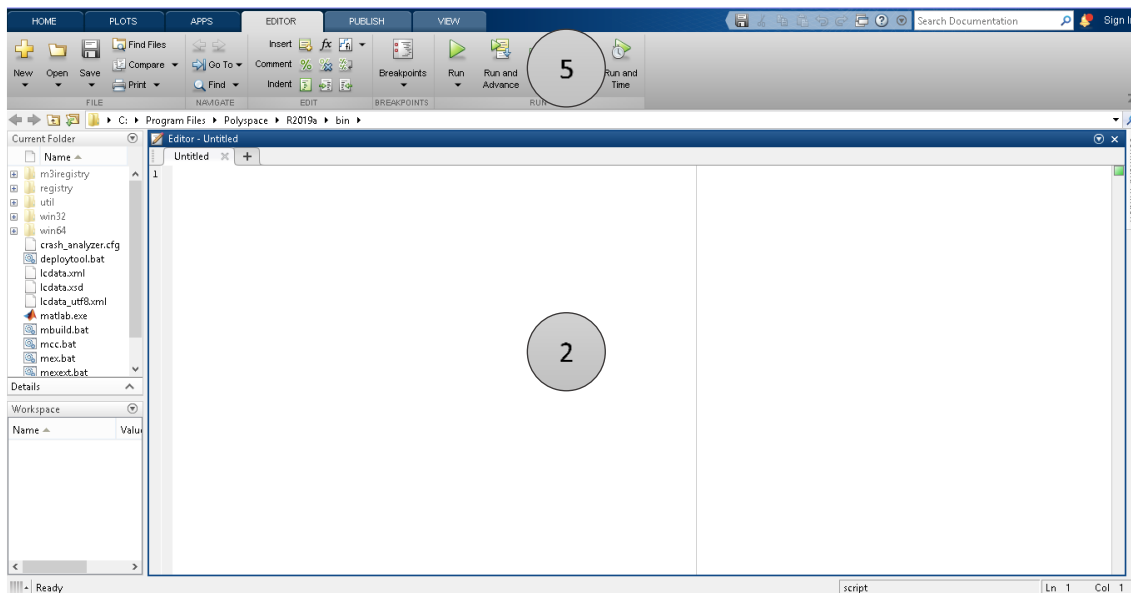


Figura 2.5 Elementos de Matlab 2 y 5.

Matlab proporciona un número considerable de funciones que permiten a los programadores trabajar de una manera óptima y eficiente. En forma básica estas se podrían agrupar en:

1. Funciones de operación básica. - Generalmente estas funciones son ejecutables en la ventana de comandos de Windows o dentro de una ventana del editor y hacen referencia a arreglos fáciles que mejoran la capacidad de iniciar códigos del algebra lineal. En el apéndice A-A1 se describen las funciones básicas de operación.
2. Funciones básicas de trigonometría. - Muchos de los problemas que pueden ser planteados en el entorno de Matlab utilizan cálculos trigonométricos por lo que el uso



de estas propiedades permite expresar fácilmente las líneas algorítmicas de operación. En el apéndice A-A2 se pueden ver las formas básicas y esenciales de este tipo de funciones.

3. Funciones básicas de formato. - En algunas ocasiones es muy necesario poder expresar números o variables con una cierta cantidad de cifras significativas, es por esto que Matlab permite controlar este aspecto con las funciones expresadas en el apéndice A-A3.
4. Funciones de números complejos. - Estas funciones permiten expresar de distintas maneras números complejos ofreciendo una mayor flexibilidad para crear algoritmos y lograr una buena optimización del programa. (Ver apéndice A-A4)

- **Funciones en M-Archivos.**

Existen dos maneras para representar un M-archivo (\*.m.): Con los ficheros de comandos (Archivos creados desde el editor de Windows) y con las funciones. Los ficheros de comandos contienen un código fuente que se procesa de manera sucesiva cuando se ejecuta el nombre del fichero en la ventana de comandos de Matlab. Mientras que las funciones permiten definir scripts análogos a las de Matlab, los elementos con los que se crean son: nombre, argumentos y valores de salida. La estructura para ejecutar este código se representa en la ecuación 2.24.

$$\textit{function} [a, b, c, \dots] = \textit{nombre\_función}(x, y, z, \dots) \quad \text{Ec. 2.24}$$

Donde la función es declarada con la palabra "*function*" seguido de los argumentos de salida contenidos en corchetes [], posteriormente se coloca el nombre del script el cual será guardado con la extensión \*.m en el directorio de trabajo. Por último, se establecerán los datos que ingresarán a la función, estas estarán contenidas en unos paréntesis.



- Programación con sentencias en Matlab.

a) Sentencia *for*

Un bloque *for* asigna a una variable la posición de la columna *i*-ésima de la expresión y ejecuta las órdenes incrementando el valor hasta que llegue al argumento final de la expresión. En la figura 2.6 se puede observar una estructura general de este bloque.

```
for variable =  
expresión  
    <orden>  
    <orden>  
    ...  
    <orden>  
end
```

*Figura 2.6 Formato general para el bloque for.*

b) Sentencia *while*

Un bloque *while* ejecuta las órdenes mientras todos los elementos de la expresión sean verdaderos (Figura 2.7).

```
while  
<expresión>  
    <orden>  
    <orden>  
    ...  
    <orden>  
end
```

*Figura 2.7 Formato general para el bloque while.*

c) Sentencia *if*

Un bloque *if* evalúa una expresión lógica. Si es cierta ejecuta las órdenes que se encuentren antes del end, la cual se utiliza para concluir este bloque (Figura 2.8).



```
if <expresión>  
    <órdenes evaluadas si la expresión es verdadera>  
end
```

*Figura 2.8 Formato general para el bloque if.*

Puede que se presente el caso de no ejecutar dicha orden para ejecutar otra distinta. Esto se indicará usando la expresión *else* dentro del bloque como se puede ver en la figura 2.9.

```
if <expresión>  
    <órdenes evaluadas si la expresión es  
                                verdadera>  
else  
    <órdenes evaluadas si la expresión es falsa>  
end
```

*Figura 2.9 Formato general para el bloque if con 2 condiciones.*

Por último, si se desea tener una estructura mucho más completa dentro de este bloque, se usará una evaluación con las órdenes asociadas de cada expresión agregando condiciones con el termino *elseif*. La forma general agregando este punto esta expresada en la figura 2.10.

```
if <expresión1>  
    <órdenes evaluadas si la expresión1 es verdadera>  
elseif <expresión2>  
    <órdenes evaluadas si la expresión2 es verdadera>  
elseif <expresión3>  
    <órdenes evaluadas si la expresión3 es verdadera>  
elseif  
else  
    <órdenes evaluadas si ninguna otra expresión es  
verdadera>  
end
```

*Figura 2.10 Formato general para el bloque if con varias condiciones.*



## 3 Metodología para la implementación numérica

### 3.1 Introducción

Como se ha estudiado hasta ahora un estudio de flujo de potencia permite obtener la cantidad de energía que se presenta en un sistema eléctrico, pero esto depende de la capacidad de los elementos que se encuentren conectado a la red como los generadores, los condensadores y los transformadores. Para poder crear un formato digital que calcule los flujos y los voltajes es necesario conocer los valores representativos de cada componente que conforman al circuito; incluyendo los elementos antes mencionados, de esta manera será posible mantener el control evaluando continuamente el desempeño en tiempo real e incluso se podrían planificar proyectos de expansión para ofrecer el servicio a más personas. Por lo tanto, en este capítulo se pretende asentar la metodología que se utilizara para programar el cálculo de flujos y para lograrlo se tienen que presentar las bases y los algoritmos necesarios para su ejecución.

De forma particular, el segundo subcapítulo tiene como objetivo presentar las ecuaciones primordiales que rodean al cálculo de flujos de potencia contemplando tres puntos en especial: Las ecuaciones de red, las ecuaciones para los buses de carga y las ecuaciones del flujo en las líneas. Por otra parte en el subcapítulo tres se mostrarán las fórmulas que serán utilizadas para la creación del código fuente; tales arreglos estarán asentados bajo las metodologías de los Profesores Abiad, Stagg y Saadat. Por último en el cuarto subcapítulo se detallarán los aspectos más importantes del programa desarrollado en el presente trabajo.

El profesor Abiad y Stagg (1968, pág. 257) resumen los conocimientos de forma general vistos hasta el momento como:

“The load flow consists of the calculation of power flows and voltages of network for specified terminal or bus condition...Associated with each bus are four quantities: The real and reactive power, the voltage magnitude and the phase angle. Three types of buses are represented in the load flow calculation and at a bus two of the four quantities are specified. It is necessary to select one bus, called the slack bus, to provide the additional real and reactive power to supply the transmission losses, since these are unknown until the final solution is obtained. At this bus the voltage magnitude and the phase angle are specified. The remaining buses of the system are designated either as voltage controlled buses or load buses. The real power and voltage magnitude are specified at a voltage controlled bus. The real and reactive powers are specified at a load bus.”

Para poder facilitar el proceso de programación se utilizarán identificadores numéricos, mismos que son usados en la práctica para distinguir las terminales de las líneas, la cantidad de componentes y el número de buses en el sistema; e incluso permitirá al usuario ubicar cada elemento analizado. Otro punto a considerar es que para desarrollar un algoritmo es



fundamental tener una formulación organizada con la finalidad de que el compilador pueda ejecutar los pasos del listado con mayor rapidez y así ingresarlos al código fuente de manera que la metodología sea comprensible y eficaz, para este punto se diseñarán diagramas de flujo que describirán el funcionamiento del programa.

### 3.2 Ecuaciones del sistema de potencia

- Ecuaciones de la red

Existen dos formas para representar una matriz que determine los valores de entrada al sistema y estas se conocen según el tipo de referencia, es decir, las que usan un marco de referencia de bus y las que usan un marco de referencia de bucle (El-Abiad, 1968). La expresión que describe el rendimiento de un SEP y la cual utiliza un marco de referencia de bus (B) utilizando las admitancias es:

$$I_B = Y_B E_B \quad \text{Ec. 3.1}$$

En ciertos casos se puede incluir el bus de tierra, cuando esto sucede se selecciona como un nodo de referencia y los voltajes del bus en la ecuación 3.1 se mide con respecto al suelo. Por otro lado, si el bus de tierra no está incluido en la red la matriz de admitancia no deberá tener los efectos de los elementos de derivación y se escoge otro bus como referencia.

Si se utiliza un marco de referencia de bucle (L), la ecuación de rendimiento para el sistema usando las admitancias será (Ec. 3.2):

$$I_L = Y_L E_L \quad \text{Ec. 3.2}$$

Cuando la matriz de admitancia de bucle se forma sin incluir elementos de derivación, la dimensión de las matrices se puede obtener de la siguiente forma  $L \times L$ , donde  $L$  es el número de enlaces o bucles básicos calculados a partir de:

$$L = e - n + 1 \quad \text{Ec. 3.3}$$

En esta expresión  $e$  es el número de elementos, excluyendo las conexiones de derivación y  $n$  es el número de nodos. En este caso, los efectos de los elementos de derivación se tratan como fuentes de corriente en los buses de la red.



Si los elementos de derivación  $e_z$  están incluidos en la formación de las matrices de bucle, el número de elementos es  $e + e_z$  y el número de nodos aumenta a  $n + 1$ . En consecuencia, el número del bucle y la dimensión de las matrices del bucle aumentan en  $e_z - 1$ .

- **Ecuaciones para la carga en las barras**

Las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 muestran la relación entre las potencias reales y reactivas para un bus definido ( $i$ ) y con esas expresiones podemos determinar la corriente en el bus (Ec. 3.4) como:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde  $I_i$  es positivo cuando fluye hacia el sistema. Esta fórmula se utilizará cuando los elementos de derivación a tierra son incluidos en la matriz de parámetros. Pero si los elementos de derivación no están contemplados en la matriz, la corriente en el bus especificado será representada como en la ecuación 3.5.

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} - y_i E_i \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde  $y_i$  es la admitancia de derivación total en el bus y  $y_i E_i$  es la corriente de derivación que fluye desde el bus  $i$  a tierra.

- **Ecuaciones de flujo en las líneas**

Este cálculo está comprendido una vez que se calculan los valores de los voltajes usando un método de solución no lineales o con un método iterativo. Una vez que se obtienen los voltajes del bus, se pueden calcular los flujos de línea. La corriente en el bus  $i$  en la línea que une al bus  $i$  con el bus  $j$  se calcula usando la ecuación 3.6:

$$i_{ij} = (E_i - E_j)y_{ij} + E_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde  $y_{ij}$  es la admitancia de línea,  $y'_{ij}$  es la admisión de carga total de la línea y  $E_i \frac{y'_{ij}}{2}$  es la contribución actual en el bus  $i$  debido a la carga de la línea. El flujo de potencia real y reactivo de la interacción de dos líneas es (Ec. 3.7):



$$P_{ij} - jQ_{ij} = E_i^* i_{ij} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Pero al sustituir  $i_{ij}$  en la ecuación 3.8 se consigue la siguiente expresión:

$$P_{ij} - jQ_{ij} = E_i^* (E_i - E_j) y_{ij} + E_i^* E_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad \text{Ec. 3.8}$$

En esta ecuación se puede obtener la potencia real ( $P_{ij}$ ) y la potencia reactiva ( $Q_{ij}$ ) desde el bus  $i$  al bus  $j$  y para calcular la potencia dirigida del bus  $i$  al bus  $j$  se utiliza la siguiente expresión (Ec. 3.9):

$$P_{ji} - jQ_{ji} = E_j^* (E_j - E_i) y_{ji} + E_j^* E_j \frac{y'_{ji}}{2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Las pérdidas totales de potencia en la línea  $i$  y en la línea  $j$  es la suma algebraica de los flujos de potencia determinados a partir de las ecuaciones 3.8 y 3.9.

### 3.3 Técnicas de Solución

- **Método de Gauss Iterativo basado en Y barra**

La solución del problema del flujo de carga se inicia asumiendo voltajes para todos los buses excepto el bus de compensación, donde el voltaje se especifica y permanece fijo. Luego, las corrientes se calculan para todos los buses excepto el bus de compensación ( $s$ ) a partir de la ecuación de carga del bus.

Este método comenzará calculando valores de voltaje con los valores iniciales de la tensión, con la excepción del bus de compensación, ya que este bus mantiene un voltaje fijo. Posteriormente se determinarán las corrientes para cada bus con excepción del bus de compensación ( $s$ ) para calcularlo se usará la siguiente expresión (Ec. 3.10).

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E_i^*} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{matrix} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde  $n$  es el número de buses en la red. Con la ecuación 3.1 se puede obtener el rendimiento de la red. Si se elige tierra como el bus de referencia del sistema, se puede escribir un conjunto de  $n - 1$  ecuaciones simultáneas de la forma (Ec.3.11)



$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left( I_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \right) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{array} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Se realizará la primera iteración calculando las corrientes a partir de la ecuación 3.10 y con la ecuación 3.11 se estimarán los voltajes excluyendo las barras de compensación; de esta manera se tendrán nuevos valores voltajes. Para la segunda iteración se necesitarán los nuevos valores para determinar una vez más nuevas corrientes para una solución posterior de la ecuación 3.11. Este proceso tiene que continuar hasta que la diferencia entre los voltajes en los buses sea casi nula. Los voltajes finales obtenidos del método iterativo serán usados para determinar las potencias generadas en el bus de compensación y los flujos de cada línea.

Las ecuaciones 3.11 puede ser sustituida en la ecuación 3.10, para generar una sola expresión para calcular los voltajes obteniendo (Ec. 3.12):

$$E_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{E^*_i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} E_j \right) \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{array} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Esta expresión coincide con la ecuación 2.19, la cual se utiliza para calcular de forma general los voltajes, pero con la diferencia que la fórmula 3.12 facilita la lectura y la ejecución en los compiladores. Si se emplea la ecuación 3.12 para calcular los voltajes se mantiene el conjunto de ecuaciones no lineales y puede ser resuelta al realizar aproximaciones iterativas como se mencionó en este apartado.

El proceso puede optimizarse si se almacenan las operaciones aritméticas que no van a cambiar durante el cálculo, en este trabajo se representaran por las letras  $L_i, KL_i$  y  $YL_{ij}$ . En las ecuaciones 3.13, 3.15 y 3.16 se pueden observar detenidamente estos términos donde  $p$  es el bus que se está analizando.

$$\frac{1}{Y_{ii}} = L_i \quad \text{Ec. 3.13}$$

Esta ecuación muestra la primera optimización que se puede hacer para el cálculo de voltajes y al sustituir la ecuación 3.13 en la ecuación en la ecuación 3.12, esta se reescribe como:



$$E_i = \frac{(P_i - jQ_i)L_i}{E^*_i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}L_i E_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{matrix} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Cuando esta constante es calculada se puede utilizar para determinar el termino  $KL_i$  de la siguiente manera:

$$(P_i - jQ_i)L_i = KL_i \quad \text{Ec. 3.15}$$

Con esto se puede implementar la segunda optimización de la ecuación 3.12 almacenando las variables  $Y_{ij}L_i$  como se muestra a continuación:

$$Y_{ij}L_i = YL_{ij} \quad \text{Ec. 3.16}$$

De esta forma obtenemos:

$$E_i = \frac{KL_i}{E^*_i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n YL_{ij} E_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ j \neq s \end{matrix} \quad \text{Ec. 3.17}$$

- **Aceleración de la convergencia**

Las técnicas existentes que aceleran los voltajes calculados optimizan el proceso de programación, disminuyendo la cantidad de iteraciones que el programa realizara para cumplir la tolerancia definida. Este método se ha establecido durante el capítulo 2.3 y por la fácil estructura y orden de operación de la fórmula 2.20, esta será empleada para generar una mejor eficiencia en la rutina.

Al extrapolar los voltajes estos reemplazan inmediatamente los valores anteriores en la solución de la ecuación posterior. El proceso continúa hasta que los cambios en los voltajes entre iteraciones sucesivas estén dentro de una precisión especificada, es decir (Ec 3.18)



$$|E_i^{k+1} - E_i^k| \leq \varepsilon \quad \text{Ec. 3.18}$$

Para que el desajuste de potencia sea mínimo, se debe especificar una tolerancia muy estricta en ambos componentes del voltaje. Una precisión aceptable podría variar entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-9}$ .

- **Buses de Voltaje Controlado**

Se sabe que los buses de voltaje controlado no tienen el mismo procedimiento algebraico que los buses de carga, puesto que las variables conocidas son distintas entre estos dos tipos de barra. Entonces, al controlar la cantidad de MW que produce un generador en este bus, es fácil mantener el voltaje constante.

El proceso para calcular el voltaje en esta clase de buses lo expresa Saadat (1999) de la siguiente manera: “For the voltage-controlled buses where  $P^{sch}_i$  and  $|V_i|$  are specified, first is solved for  $Q_i^{(k+1)}$ , and then is used in (6.33) to solved for  $V_i^{(K+1)}$ ”,<sup>3</sup>

Este hecho debe de ser considerado durante la programación., ya que para poder expresar esta ecuación en una sola orden se puede calcular la cantidad de potencia reactiva separando la parte real e imaginaria de la ecuación de potencia (Ec. 2.18) como se muestra a continuación (Ec. 3.19).

$$Q_i^k = -I \left\{ V_i^{(k-1)*} \left[ \sum_{j=1}^{i-1} V_j^{(k)} + \sum_{j=i}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \right\} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Esta ecuación será utilizada para formular el código del cálculo por Gauss-Seidel y posteriormente se determinará la variable de almacenamiento  $KL_i$  con la ecuación 3.15, por último, se utilizará la formula Ec. 3.17 para calcular el voltaje en el bus que se está analizando.

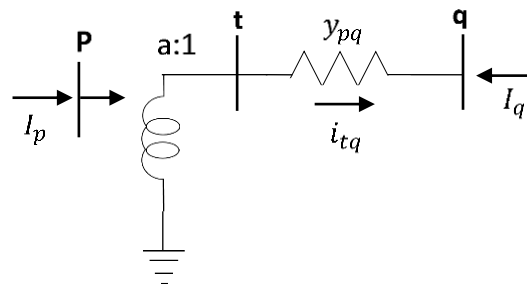
---

<sup>3</sup> Es necesario aclarar que la ecuación 6.33 que se expresa en la cita, coincide perfectamente con la ecuación 3.12 de este trabajo bajo representaciones de variables distintas.

- **Representación de transformadores**

Los transformadores son una parte importante para un SEP, puesto que permiten mantener un alto grado control en los flujos de potencia real y reactiva en una red eléctrica y para poder incluirlos en un cálculo de flujos de potencia se necesitan conocer los componentes algebraicos que involucran a su representación.

Los transformadores se pueden representar de dos formas: Por su circuito equivalente y por su equivalente del circuito  $\pi$  (Saadat, 1999). En la figura 3.1 Se muestra el circuito de un transformador construido por su impedancia o admitancia conectado en serie con un autotransformador ideal.



*Figura 3.1 Circuito equivalente de un transformador (El-Abiad, 1968)*

De este circuito se puede determinar la corriente en el bus  $p$  con la ecuación 3.20 y el voltaje con la ecuación 3.21

$$I_p = \frac{i_{tq}}{a} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$E_t = \frac{E_p}{a} \quad \text{Ec. 3.21}$$

donde  $a$  es la relación del número vueltas del transformador y  $i_{tq}$  es la corriente que fluye de  $t$  a la barra  $q$ . Por otro lado, la corriente  $i_{tq}$  será (Ec. 3.22):

$$i_{tq} = (E_t - E_q)y_{pq} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Y si sustituimos la ecuación 3.22 en la 3.20 obtenemos:



$$I_p = (E_t - E_q) \frac{y_{pq}}{a} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Posteriormente se podría sustituir la ecuación 3.21 en la ecuación 2.23 y resolviendo generamos la expresión 3.24

$$I_p = (E_p - aE_q) \frac{y_{pq}}{a^2} \quad \text{Ec. 3.24}$$

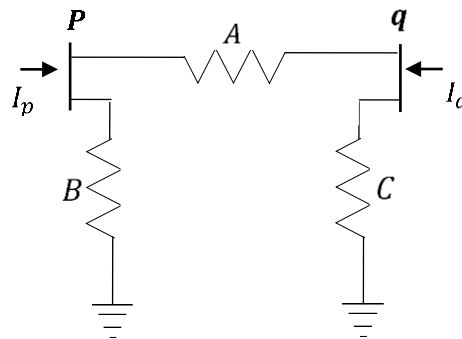
De manera similar se obtiene la corriente terminal  $I_q$  (Ec. 3.25)

$$I_q = (E_q - E_t) y_{pq} \quad \text{Ec. 3.25}$$

Al sustituir  $E_t$  a la ecuación 3.25 se obtiene:

$$I_q = (aE_q - E_p) \frac{y_{pq}}{a} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Pero si se analiza el circuito  $\pi$  mostrado en la figura 3.2 los elementos equivalentes se pueden interpretar de la misma manera que los elementos de línea.



*Figura 3.2 Circuito  $\pi$  equivalente. (El-Abiad, 1968)*

Entonces según el diagrama las corrientes en las terminales del circuito  $\pi$  equivalente son:

$$I_p = (E_p - E_q)A + E_p B \quad \text{Ec. 3.27}$$

y...

$$I_q = (E_q - E_p)A + E_q C \quad \text{Ec. 3.28}$$



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

Para poder determinar los valores de las admitancias de un transformador regulante se tiene que igualar las expresiones de las corrientes en las terminales para el transformador y su circuito  $\pi$  y resolver  $A$ ,  $B$  y  $C$ .

Si  $E_p = 0$  y  $E_p = 1$ , la ecuación 3.24 y 3.27 se reescriben como:

$$I_p = -\frac{y_{pq}}{a} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$I_p = -A \quad \text{Ec. 3.30}$$

Entonces al igualar las dos expresiones anteriores se puede obtener el valor de  $A$  (Ec. 3.31).

$$A = \frac{y_{pq}}{a} \quad \text{Ec. 3.31}$$

Para determinar a  $C$ , de manera similar se sustituye  $E_p = 0$  y  $E_p = 1$  en la ecuación 3.26 y la ecuación 3.28 obteniendo (Ec. 3.32 y Ec. 3.33)

$$I_q = y_{pq} \quad \text{Ec. 3.32}$$

y...

$$I_q = A + C \quad \text{Ec. 3.33}$$

Al igualar las expresiones se tiene la ecuación (3.34)

$$y_{pq} = A + C \quad \text{Ec. 3.34}$$

Si se despeja  $C$  y sustituyendo la Ec. 3.31 en 3.34 se obtiene:

$$C = y_{pq} - \frac{y_{pq}}{a} = \left(1 - \frac{1}{a}\right) y_{pq} \quad \text{Ec. 3.35}$$

Por último, para determinar  $B$  se tiene que igualar la Ec. 3.24 y 3.27 y el valor de  $A$  sustituirlo de la ecuación 3.31.



$$(E_p - aE_q) \frac{y_{pq}}{a^2} = (E_p - E_q) \frac{y_{pq}}{a} + E_p B \quad \text{Ec. 3.36}$$

Despejando B y resolviendo<sup>4</sup>...

$$B = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{a} - 1 \right) y_{pq} \quad \text{Ec. 3.37}$$

El circuito  $\pi$  equivalente con sus parámetros expresados en términos de la relación de vueltas  $a$  y la admitancia del transformador se muestran en la figura 3.3.

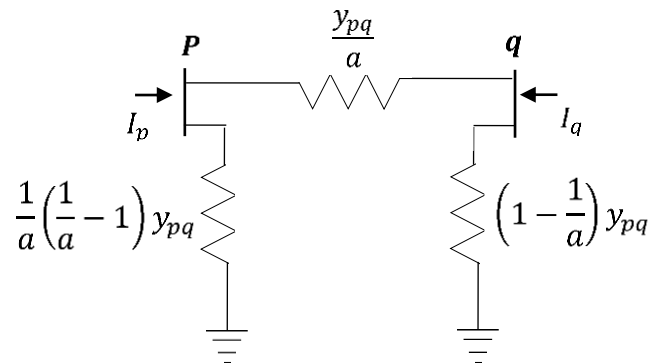


Figura 3.3 Circuito  $\pi$  equivalente con su relación de transformación. (El-Abiad, 1968)

Si se expresan las ecuaciones 3.24 y 3.26 en forma de matriz se obtiene la siguiente expresión (Ec. 3.38).

$$\begin{bmatrix} y_{pp} & y_{pq} \\ y_{qp} & y_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y/a^2 & -y/a^* \\ -y/a & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.38}$$

Si se almacena la relación de transformación en una variable  $t$ , es decir  $t = \frac{1}{a}$  la matriz 3.38 se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} y_{pp} & y_{pq} \\ y_{qp} & y_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^2 y & -t^* y \\ -t y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.39}$$

En resumen, la  $Y_{barra}$  se expande en una fila y una columna creando un bus auxiliar en la matriz de admitancias con el fin de considerar el regulador en las ecuaciones de flujo de potencia (Ec. 3.40)

<sup>4</sup> La solución algebraica para determinar la Ec. 3.37 Se muestra en el apéndice A-A5



$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1j} & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2j} & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} + t^2 y & \cdots & Y_{3j} & -ty \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & Y_{i3} & \cdots & Y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & -ty & \cdots & 0 & Y \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.40}$$

En el libro del Dr. Stevenson expresa lo siguiente: “Si una línea de transmisión en particular en un sistema está llevando potencia reactiva demasiado pequeña o demasiado grande, un transformador regulantes colocado en una de las terminales de la línea puede hacer que la línea transmita una potencia reactiva mayor o menor.” Por lo tanto, utilizar un transformador en un bus del sistema causa un cambio no solo en la matriz de admitancias de barra si no que la potencia reactiva suministrada incrementa debido a la potencia reactiva requerida por el regulador, este incremento aumenta las pérdidas y disminuye la potencia reactiva que se inyectan de las capacitancias.

### 3.4 Descripción del programa desarrollado

Con los conceptos establecidos hasta el momento se pueden presentar los aspectos más relevantes del formato digital para el cálculo de potencias. En este apartado se encontrará la estructura del programa con una breve explicación de cada elemento, de igual forma se mostrarán las variables que se relacionan con el proceso de ejecución y finalmente se explicaran algunos aspectos importantes para realizar un análisis de forma eficaz.

- **Descripción general**

El programa ha sido elaborado y modificado nueve veces, cada versión permite calcular el flujo de potencia, pero en este trabajo se presentará la última versión y se identificará por V9. Este programa permitirá realizar los cálculos considerando los límites de potencia reactiva de cada generador conectado a las barras de voltaje controlado.

El programa V9 está compuesto por una rutina llamada PRINCIPAL (Ver figura 3.4), este script será el primer archivo \*.m que se ejecutará cuando se solicite analizar un SEP. Por otra parte, la rutina estará formada de un grupo de instrucciones que almacenarán los datos de entrada con un formato establecido por IEEE (Ver figura 3.5) y nueve subrutinas detalladas en la tabla 3.1, las cuales se encargarán de procesar la información calculando los voltajes, las potencias finales generadas y flujos totales del sistema.



**Tabla 3.1 Estructura del archivo PRINCIPAL.m**

Subrutina	Descripción
<p><b>subrutina 1. Tabla de datos de entrada del sistema</b></p>	<p>La primera subrutina se identifica por “TDE” y sirve para imprimir los datos que se utilizan para calcular los voltajes y los flujos de potencia, permitiendo al usuario verificar la información que se ha ingresado al momento de leer los resultados finales.</p>
<p><b>Subrutina 2. Inicialización de voltajes.</b></p>	<p>La segunda subrutina se llama “inicio”. Si se considera que el programa permitirá analizar los excesos de potencia reactiva en los generadores, es importante reestablecer constantemente los valores originales de los voltajes y esta subrutina permite colocar en las variables del voltaje (<math>E_p</math>) los valores establecidos en los formatos (<math>OP_{data}</math>).</p>
<p><b>Subrutina 3. Cálculo de <math>KL_p</math></b></p>	<p>La subrutina tres identificada por “<math>KL_p</math>” se encargará de calcular las constantes <math>lp</math> y <math>klp</math> las cuales fueron establecidas en el apartado 3.3 bajo el subíndice <math>i</math>, siendo utilizadas para optimizar el proceso de cálculo del método de Gauss Seidel.</p>
<p><b>Subrutina 4. Cálculo de <math>YL_{pq}</math></b></p>	<p>Esta subrutina lleva por nombre “<math>YL_{pq}</math>” y permitirá calcular la constante <math>ylpq</math>, mantenido la misma finalidad de la subrutina tres.</p>
<p><b>Subrutina 5. <math>GSeidel</math></b></p>	<p>La subrutina “<math>Gseidel</math>”, es la base primordial del programa, ya que este script contendrá el algoritmo que calculará los voltajes convergentes del sistema.</p>
<p><b>Subrutina 6. Cálculo de las líneas de flujo</b></p>	



	<p>La sexta subrutina que se encuentra en la rutina PRINCIPAL se denomina “lineaflujo” y determina la cantidad de potencia que fluye en el circuito.</p>
<p><b>Subrutina 7. Cálculo de la potencia de generación y los flujos totales</b></p>	<p>Se nombrará esta subrutina como “PotgF” debido a que en este script se obtendrán las potencias reales y reactivas de cada barra y de igual manera se determinarán los valores de flujo totales que se presentan en la red.</p>
<p><b>Subrutina 8. Restablecimiento del proceso Gseidel.m por efecto de los límites de potencia.</b></p>	<p>Esta subrutina se llama “Rest” y permitirá reestablecer los valores para los sistemas que excedan los límites de potencia reactiva de cada barra de voltaje controlado mantenido una organización establecida por registros.</p> <p>Cada registro contendrá los procesos ejecutados al recalcular <math>n</math> veces el sistema, es importante considerar que para esta versión solo se podrán realizar un máximo de tres registros.</p>
<p><b>Subrutina 9. Tabla de datos de los resultados del sistema.</b></p>	<p>Para concluir el proceso de cálculo, se creó un script “TOP” para imprimir las variables de mayor importancia para el usuario.</p>



Durante el desarrollo del programa V9 se necesitó almacenar una considerable cantidad de datos, es por eso que para explicarlos se han clasificado en tres partes tomando en cuenta su funcionalidad, es decir que se ordenaran por: datos de entrada, datos de proceso y datos de resultado. (Ver tabla 3.2)

**Tabla 3.2 Variables relacionadas al formato digital del análisis de los SEP**

<b>Datos de entrada</b>	<b><i>iterm</i></b>	Establece el número máximo de iteraciones que realiza el programa
	<b><i>epsilon</i></b>	Variable que representa el grado de precisión
	<b><i>alfa</i></b>	Variable que contiene el factor de aceleración
	<b><i>PBASE</i></b>	Potencia base del sistema
	Formatos de entrada IEEE	
	<b><i>op</i></b>	Matriz que contiene los datos de los buses del sistema
	<b><i>z</i></b>	Matriz que contiene los datos de las líneas del sistema
<b>Datos de proceso.</b>	<b><i>nbus</i></b>	Variable que contiene el número máximo de barras
	<b><i>MaxDelEp</i></b>	Variable que representa el error máximo del voltaje
	<b><i>Y</i></b>	Matriz $Y_{barra}$
	<b><i>Op</i></b>	Matriz auxiliar de <i>op</i> con las potencias demandadas y generadas en PU.
	<b><i>Klp</i></b>	Constante creada para optimizar el proceso del cálculo de voltajes
	<b><i>Lp</i></b>	Constante creada para optimizar el proceso del cálculo de voltajes
	<b><i>Ylpq</i></b>	Constante creada para optimizar el proceso del cálculo de voltajes
	<b><i>Qest</i></b>	Vector que almacena el cálculo de las potencias reactivas para los buses de voltaje controlado
	<b><i>Iter</i></b>	Variable que contiene el número de iteraciones en la cual converge el cálculo de voltajes



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

	$nr$	Variable que almacena el número de bus con la finalidad de orientar el sistema
	$n1$	Variable que almacena el número de bus con la finalidad de orientar el sistema
	$nbr$	Variable que almacena la cantidad de líneas presentes en el sistema
	$Qt$	Variable que almacena el cálculo de la potencia reactiva total de cada línea para comparar los límites de potencia
	$IQmin$	Vector que confirma la existencia de límites inferiores de potencia reactivas en el sistema
	$IQmax$	Vector que confirma la existencia de límites superiores de potencia reactivas en el sistema
<b>Datos de resultado.</b>	$SC$	Vector que almacena los flujos de potencia del bus $p$ al bus $q$
	$SC1$	Vector que almacena los flujos de potencia del bus $q$ al bus $p$
	$pic$	Variable que contiene la suma de las potencias reactivas de la carga
	$prc$	Variable que contiene la suma de las potencias reales de la carga
	$pig$	Variable que contiene la suma de las potencias reactivas generadas
	$prg$	Variable que contiene la suma de las potencias reales generadas
	$sumflujo$	Variable que contiene la suma de los flujos de potencia en el sistema
	$opf$	Matriz que almacena el cálculo de las potencias finales de generación
	$Ep$	Vector que almacena los voltajes de convergencia del sistema
	$t$	Variable que contiene el tiempo de ejecución del programa



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

```
Editor - PRINCIPAL.m
PRINCIPAL.m x +
1 %Programa para determinar la solución de flujos de potencia usando el método de
2 %Gauss-Seidel.
3 %Computer Methods in Power System Analysis
4 %W. Stagg & H. El Abiad
5 %M.C. Ismael Albino Padilla & Julio Cesar Sánchez Cid fime 2021
6 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
7 %Versión 9.0
8 -----
9 % Consideraciones:
10 %
11 % 1.- Para activar el ciclo FOR y determinar los voltajes desde alfa=1.0 hasta alfa=2.0 se
12 % tienen que activar las líneas que se acompañen de: (A) y Desactive las
13 % (B), También es importante colocar alfa=k.
14 %
15 %-----
```

a)

```
Editor - PRINCIPAL.m
PRINCIPAL.m x +
21
22 %Opciones de solución
23 - iterm=1000;
24 - epsilon=1e-9;
25 - alfa=1.7;
26 - PBASE=100;
27
28 %SE CARGAN LOS DATOS DEL SISTEMA
29 %SE CARGAN LOS DATOS DE PUNTO DE OPERACION
30 - [op,z]=caso1;
31
32 %SE LLAMA LA FUNCION QUE CONSTRUYE LA YBUS
33 - [Y,nbus]=ybus(z);
34 %Se convierten los datos de entrada del opdata a la base correspondiente y
35 %establecida anteriormente.
36 - [Op]=Adeop(nbus,op,PBASE);
```

b)

```
Editor - PRINCIPAL.m
PRINCIPAL.m x +
38 %SE INICIALIZA EL TIMER DE EJECUCIÓN DEL PROGRAMA
39 t=clock;
40 %subrutina 1. Tabla de datos de entrada del sistema.
41 TDE(op,nbus,z,epsilon,alfa) % (B)
42 %Subrutina 2. Inicialización de voltajes.
43 [Ej]=inicio(nbus,Op);
44 %Subrutina 3. Cálculo de Klp
45 [lp,klp]=Klp(nbus,Op,Y);
46 %Subrutina 4. Cálculo de Ylpq
47 [ylpq]=Ylpq(nbus,Y,lp);
48 %Subrutina 5. GSeidel
49 [Ep,iter,Qest]=GSeidel(lp,Op,klp,ylpq,nbus,Y,iterm,epsilon,alfa);
50 %Subrutina 6. Cálculo de las líneas de flujo
51 [SC,SC1,nbr,ni,nr]=lineaflujo(z,Ep);
52 %Subrutina 7. Cálculo de la potencia de generación y los flujos totales
53 [opf,sumflujo,prg,pig,prc,pic]=PotGF(SC,SC1,nbr,op,nbus,PBASE,Qest); % (B)
54 %Subrutina 8. Restablecimiento del proceso Gseidel.m por efecto de los
55 %límites de potencia.
56 [lQmax,lQmin,Qc,Ep,iter,opf,prg,sumflujo]=Rest(Qest,Op,PBASE,nbus,pig,op,iterm,epsilon,alfa,Y,Ep,iter,opf,prg,nbr,z,sumflujo);
57
58 t=toe; %SE FINALIZA EL TIMER DE EJECUCIÓN DEL PROGRAMA
59 %Subrutina 9. Tabla de datos de los resultados del sistema.
60 TOP(SC,SC1,ni,nr,Ep,op,nbus,z,t,iter,opf,sumflujo,prg,pig,prc,pic,PBASE) % (B)
```

c)

**Figura 3.4 Estructura general del archivo PRINCIPAL.m del proyecto en Matlab.**  
a) Apartado donde se describe la función del programa, el método de solución, las referencias, las personas involucradas en el proyecto, la versión y las consideraciones. b) Elementos de entrada y las funciones para generar  $Y_{bus}$  y Adeop (Adecuación de los valores de opdata). c) Subrutinas de cálculo.



```

%Se resuelve el problema del libro de sistemas electricos de potencia del
%Prof stevenson sin transformador.
%Gauss-Seidel.
%M.C. Ismael Albino Padilla & Julio Cesar Sánchez Cid fime 2021
*****
function [op,z] = caso2

%Bus tipo Ein      PG      QG      PD      QD      Qmax  Qmin
op=[1  3  1.0      0        0        50      30.99  200   -100
    2  1  1.0      0        0        170     105.35  0      0
    3  1  1.0      0        0        200     123.94  0      0
    4  2  1.02     318      0        80       49.58  200   -100];

%Desde hacia      R      X      Ypq' a
z=[1  2  0.01008 0.0504 0.05125 0
    1  3  0.00744 0.0372 0.03875 0
    2  4  0.00744 0.0372 0.03875 0
    3  4  0.01272 0.0636 0.06375 0 ];
return
    
```

Figura 3.5 Formato de entrada del caso 2 (Stevenson, 1995)

Los formatos de entrada (Figura 3.5) son scripts que contienen dos matrices: la primera será asignada a la variable **op** y la segunda a la variable **z**. Estos archivos tienen la capacidad de describir en su totalidad un SEP debido a los elementos de cada matriz. Estos formatos se identificarán por *caso#* y se almacenan con una extensión (\*.m). Cada caso estará estructurado por una descripción la cual abordará su función, su procedencia, el método de solución correspondiente y nombre de las personas involucradas en el proyecto.

Por último, es importante saber que el programa V9 tiene la capacidad de presentar los resultados de dos formas:

- a) Impresión de los resultados en el Command Window.
- b) Creación de un archivo con las funciones del programa Matlab.

La primera opción funciona ejecutando dos archivos (\*.m): TDE, Esta subrutina mantendrá los arreglos de impresión de datos de entrada. (Ver figura 3.6a) y TOP, este script se encargará de mostrar los datos finales del cálculo del SEP. (Ver figura 3.6b). Las funciones utilizadas para realizar las impresiones son establecidas bajo la ecuación Ec. 3.41

$$fprintf(\text{Operador del formato}, \text{Variable}) \tag{Ec. 3.41}$$



La sintaxis del operador del formato se puede estructurar como:

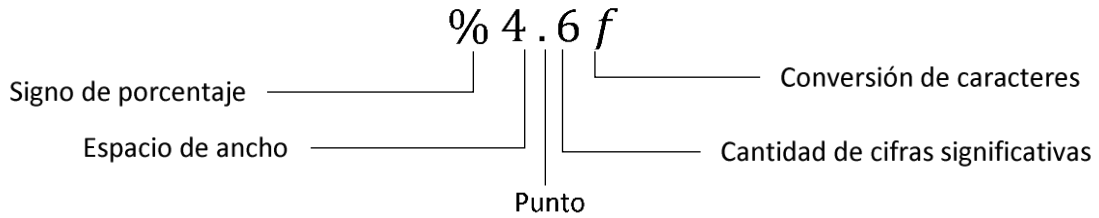


Tabla de datos de entrada del sistema						
Línea	Tipo de bus	Voltaje	Generación		Carga	
			MW	MVar	MW	MVar
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
Error (Épsilon): -			Variable de aceleración (alfa): -			
Desde	hacia	R	X	Y <sub>pq'</sub>		
-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-		

a)

Tabla de resultados del sistema							
Información de barras							
línea	Voltaje	Angulo	Generación		Carga		
			MW	Mvar	MW	Mvar	
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
Potencia total en las barras:			-	-	-	-	-
Líneas de flujo							
desde	hacia	PMW	QMVAR	desde	hacia	PMW	QMVAR
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
total de flujo en el sistema:			PMW: -	QMVAR: -			
Iteración de convergencia: -			Tiempo de ejecución del programa: -				
Datos del transformador							
Localización		Datos de Entrada					
Desde	Hasta	tap					
-	-	-					
-	-	-					
-	-	-					

b)

*Figura 3.6 Formato general de impresión de datos en Matlab*



La segunda opción se basa en crear un archivo con una extensión \*.m que contenga el siguiente arreglo:

```
filename ...  
= input('Archivo donde se guardaran los datos:\n')  
u = fopen ( filename, 'w');
```

- **Diagrama de flujo**

Para formular el código en el entorno de Matlab es necesario diseñar diagramas de flujo, por lo que en esta parte del trabajo se podrá observar paso a paso la forma en la que se llevará a cabo el proceso de cálculo. Debido a la importancia de la rutina PRINCIPAL podría considerarse como el cuerpo del programa y su funcionamiento se describe en la figura 3.7. Como se puede observar este archivo correrá cada subrutina en forma consecutiva creando las variables que necesitan otras subrutinas para poder ser ejecutadas. Su funcionamiento interno se explicará recorriendo cada paso del algoritmo.

Una vez el usuario inicia el programa tendrá que llamar al archivo PRINCIPAL desde el Command Window, entonces Matlab guardara las variables generales de *iterm*, *epsilon*, *alfa* y *PBASE* que han sido establecidas en un inicio. Posteriormente buscara en el Current Directory el *caso#* para poder obtener las matrices *opdata* y *zdata*. Con estos elementos Matlab podrá determinar la matriz de admitancias usando la metodología descrita en la figura 3.8

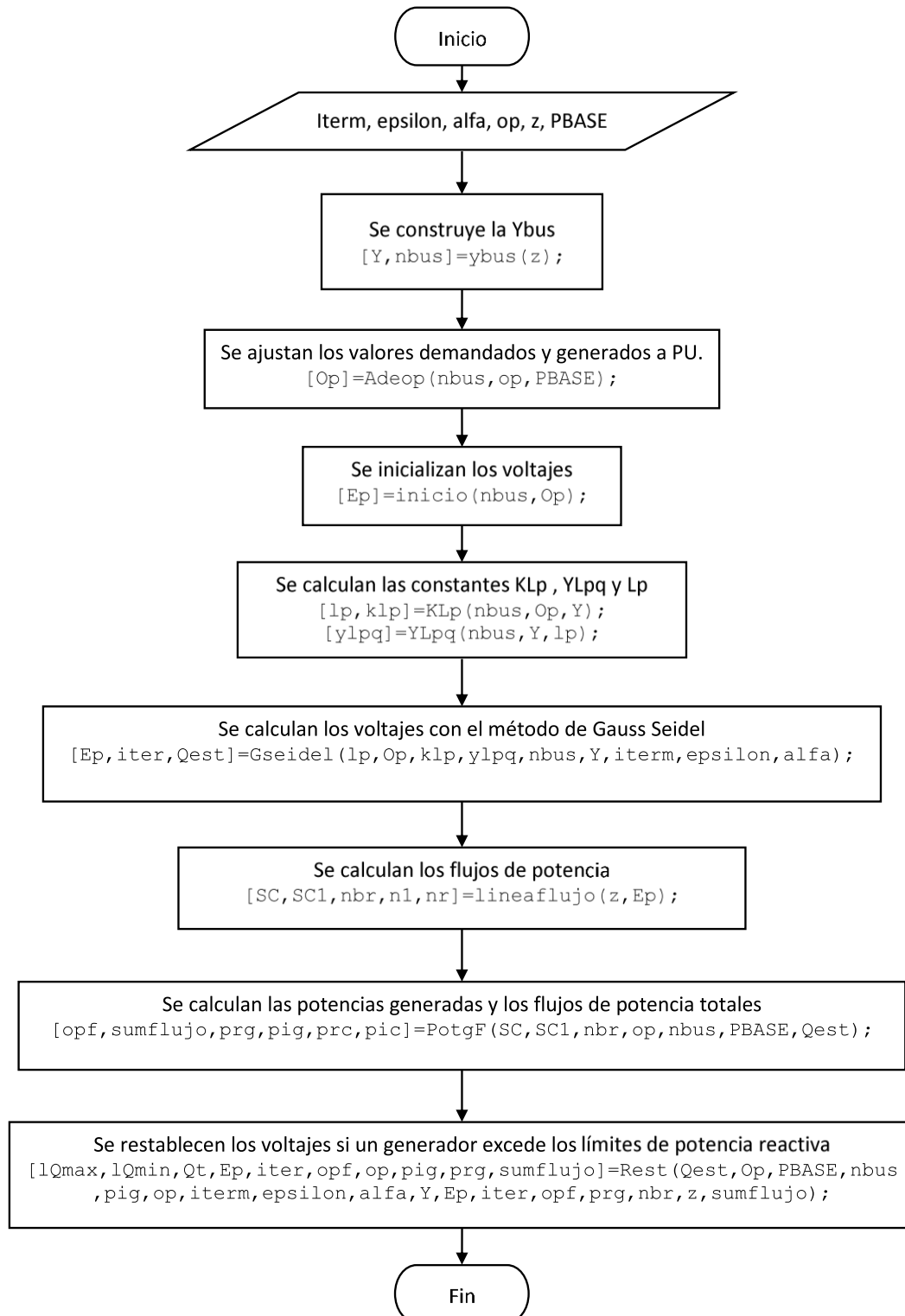


Figura 3.7 Diagrama de la rutina PRINCIPAL

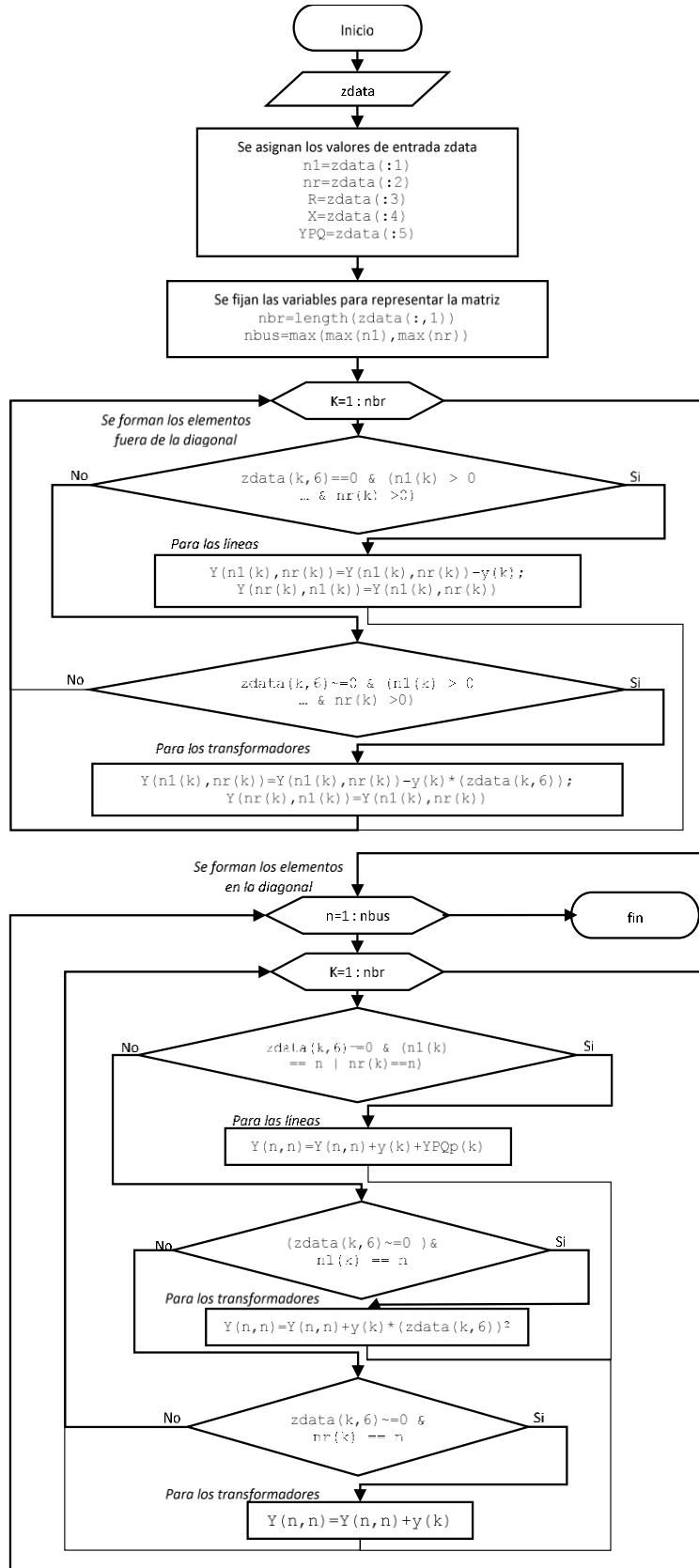


Figura 3.8 Diagrama de flujo para la determinación de  $Y_{bus}$



Una vez que se consiguen los datos de entrada, se realizara una adecuación a la matriz  $op$  y la asignara a una nueva matriz  $(Op)^5$  (Ver figura 3.9).

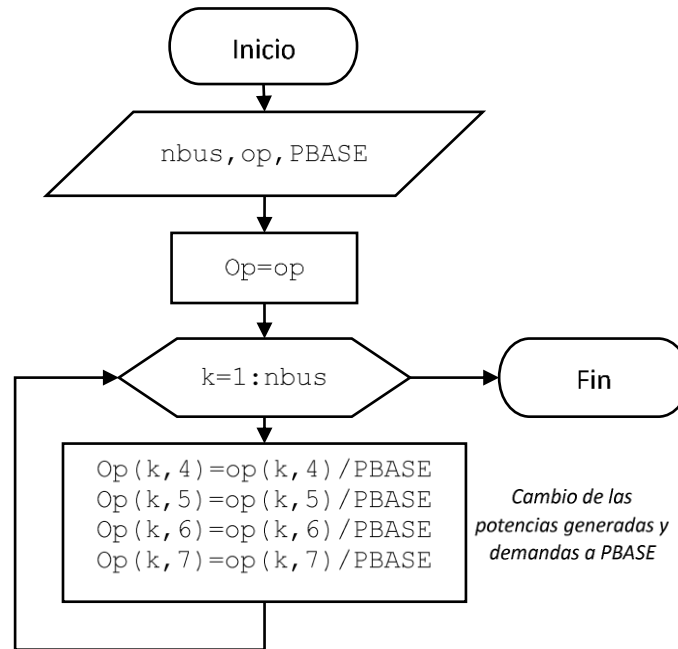


Figura 3.9 Diagrama de flujo para la adecuación de  $op_{data}$  (Cambio a PU)

Posteriormente se imprimirán los datos de entrada con la subrutina  $TDE$  y se asignaran los valores iniciales de los voltajes que se encuentran en el  $op_{data}$  a la variable  $E_p$ , como se muestra en la figura 3.10.

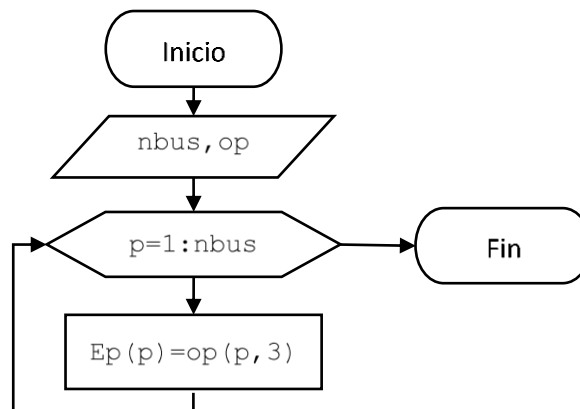


Figura 3.10 Diagrama de flujo para Inicializar los voltajes en las barras

<sup>5</sup> Matlab clasifica las letras mayúsculas y minúsculas como datos diferentes, lo que amplía su cobertura ante casos como los que se muestran en este párrafo.



La figura 3.11 y 3.12 representan las técnicas utilizadas para calcular las constantes de optimización. Es necesario recordar que los voltajes en las barras de compensación no varían en el cálculo iterativo, por lo que para los valores de  $kl_p$  se deben excluir verificando este bus con una sentencia *if*.

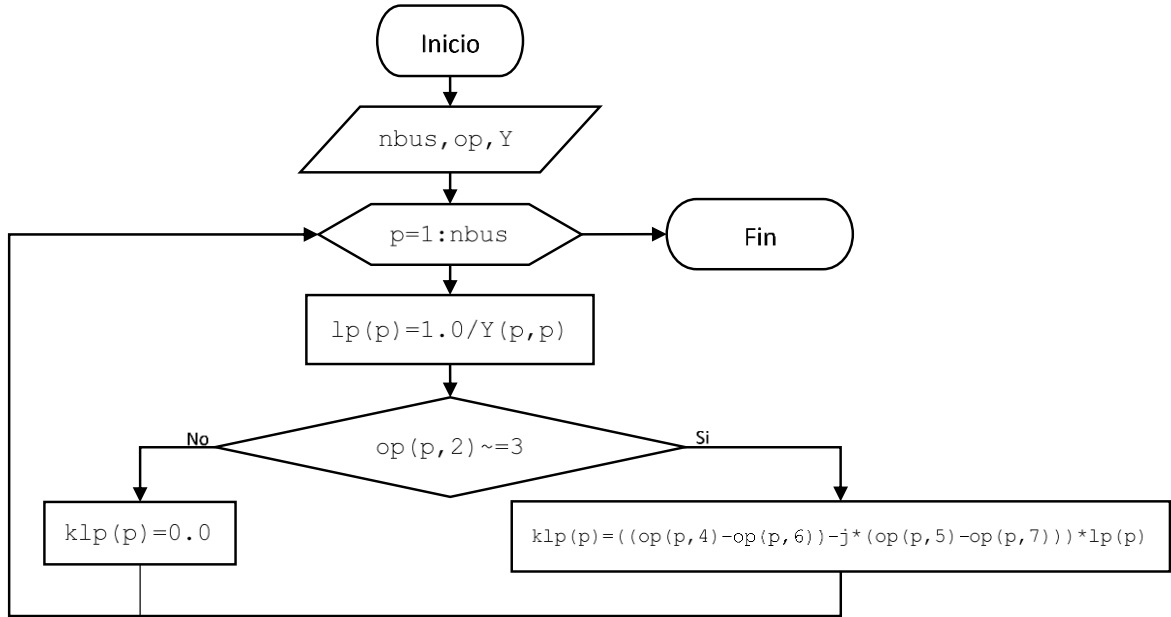


Figura 3.11 Diagrama de flujo para calcular las constantes  $l_p$  y  $Kl_p$

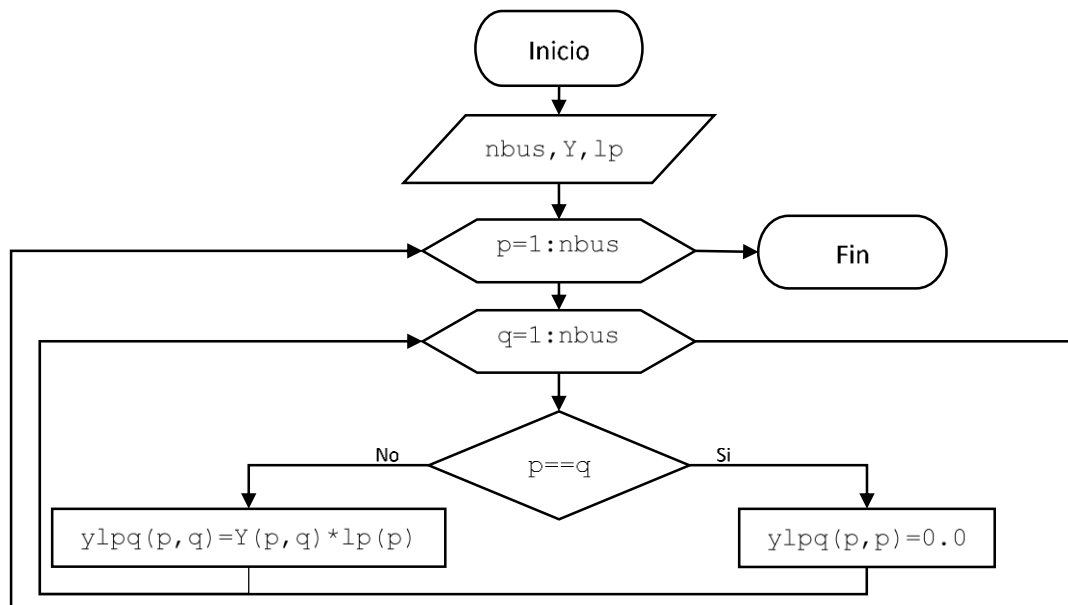


Figura 3.12 Diagrama de flujo para calcular la constante  $yl_{pq}$



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

Hasta este momento se tiene los datos más importantes para determinar los voltajes en las barras, por lo que Matlab continuara el proceso utilizando la subrutina Gseidel para desarrollar el proceso iterativo del cálculo. Esta subrutina mantiene las fórmulas establecidas en la sección 3.3 para calcular los voltajes en cada tipo de barras, pero para entender la técnica de su respectivo diagrama de flujo (figura 3.13) es necesario recordar y resaltar que el programa se ejecutará hasta que la variable *MaxDeEp* sea menor que el grado de precisión del error propuesto por el usuario (*epsilon*), de lo contrario se incrementara la variable *iter* y se calcularan nuevos valores con los obtenidos en la iteración anterior.

Por otro lado, la figura 3.14 muestra el método para obtener los flujos que recorren el circuito. Como se puede ver en el diagrama, los flujos serán calculados y almacenados dependiendo su dirección.

El proceso continuara con el desarrollo de la subrutina utilizada para calcular las potencias generadas en las barras de voltaje y en el bus de compensación (Ver figura 3.15 a y b). En algunos casos es preferible tomar en cuenta que la potencia reactiva del bus de compensación depende de las potencias reactivas generadas por los buses de voltaje controlado, entonces en el diagrama de flujo b) se muestra un arreglo que garantiza el cálculo utilizando el vector que contiene las potencias específicas calculadas  $Q_{est}$ .

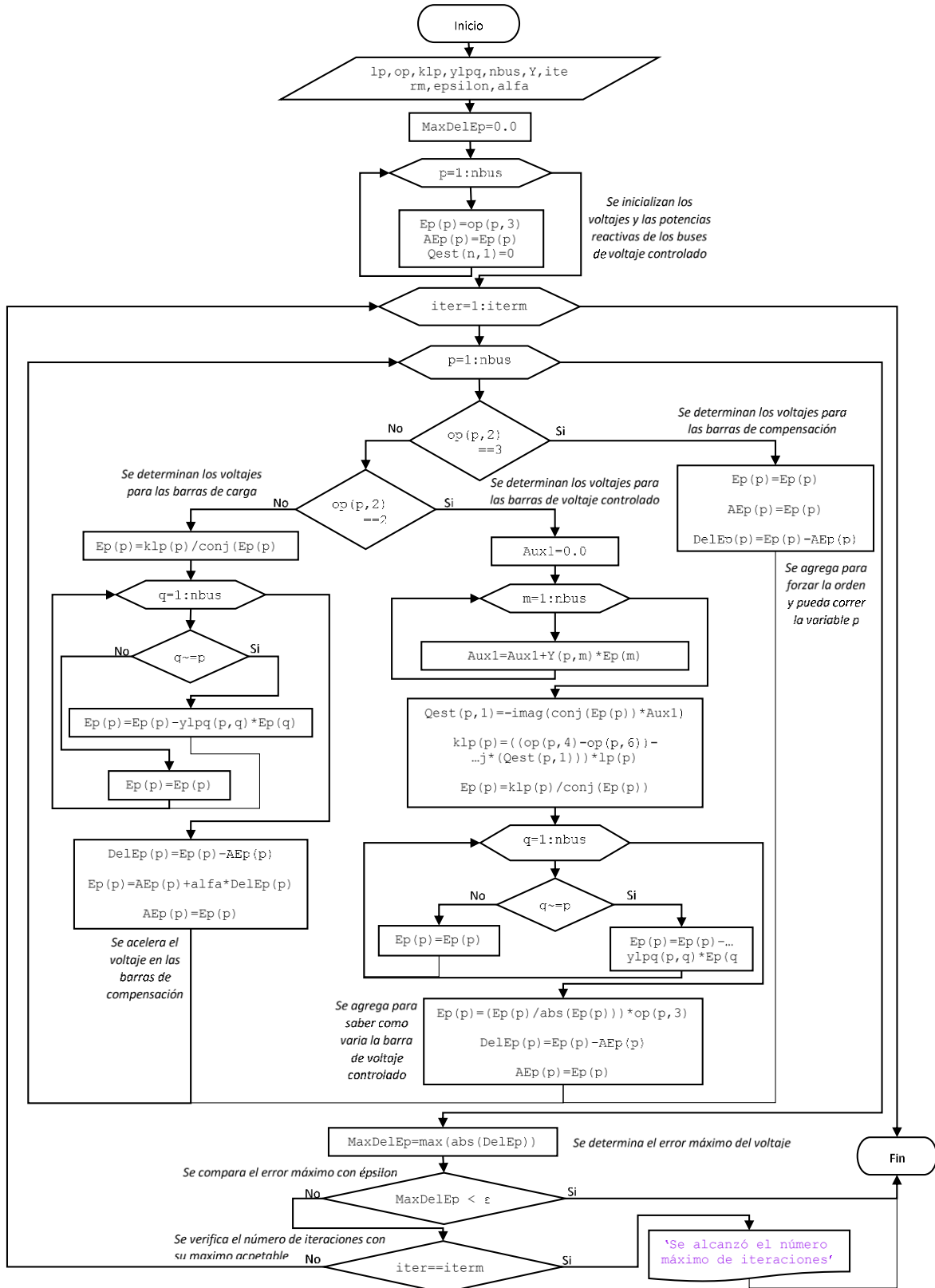


Figura 3.13 Diagrama de flujo para determinar los voltajes por el método Gauss-Seidel

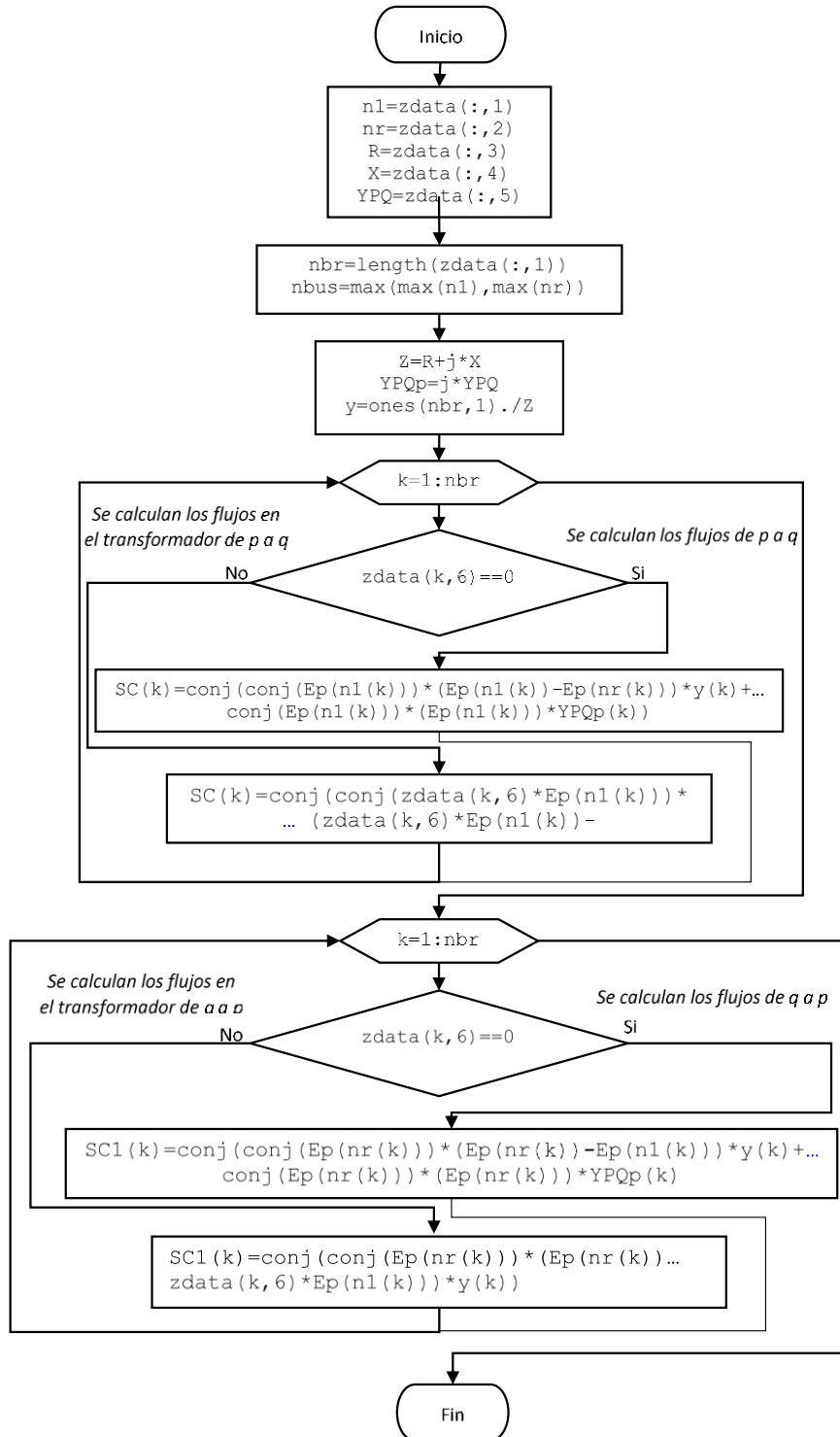
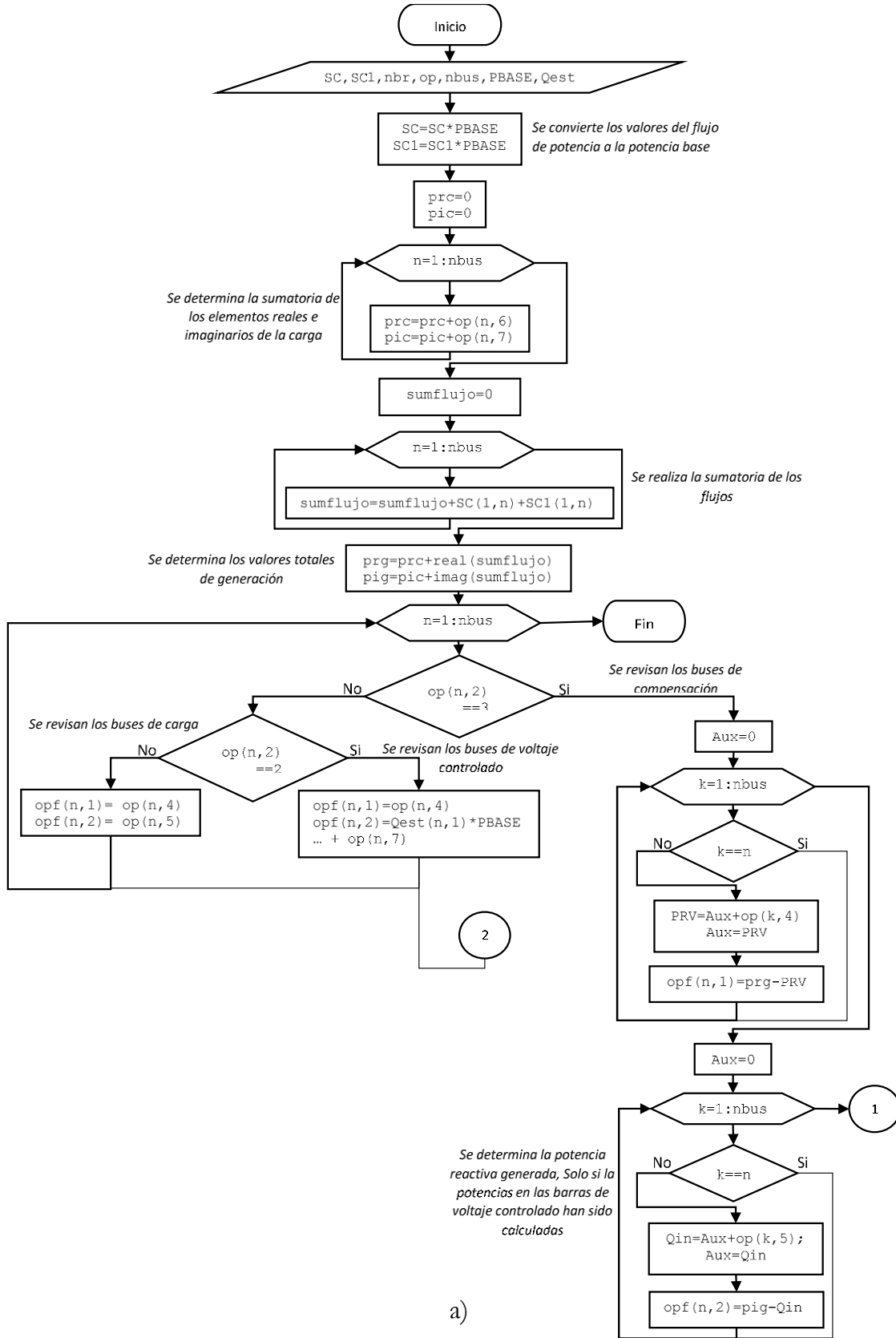


Figura 3.14 Diagrama de flujo para determinar los flujos en las líneas



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel



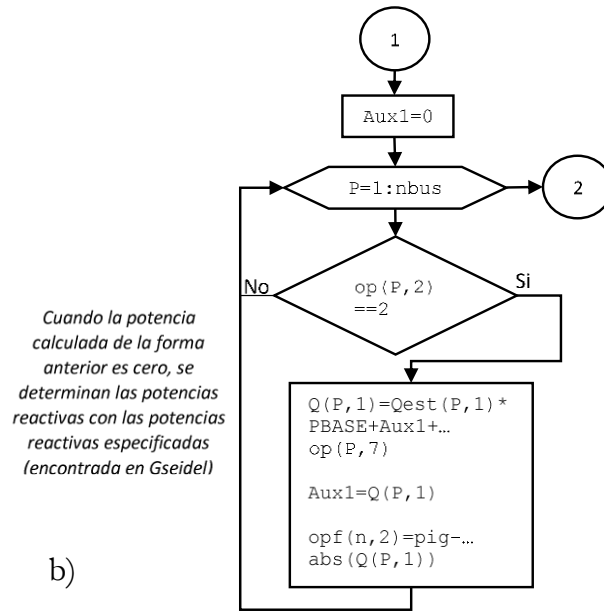


Figura 3.15 Diagrama de flujo para calcular las potencias generadas del sistema

Una vez que se obtienen los datos del cálculo del SEP se tienen que revisar los valores de las potencias reactivas que tienen los generadores debido a que cada máquina está limitada físicamente, si el resultado muestra que un generador está excediendo el límite de potencia reactiva entonces se tienen que volver a realizar los cálculos proponiendo el bus como un bus de carga donde su potencia generada será igual al valor del límite de la máquina. El diagrama de flujo de la figura 3.16 propone una forma de poder determinar este punto y como se puede observar esta técnica depende de dos subrutinas *RVlimites* y *ReV*.

La primera subrutina permitirá revisar cada barra que genere potencia reactiva en el sistema utilizando dos vectores *IQmax* (Para los límites superiores) y *IQmin* (para los límites inferiores) si alguno sobrepasara algún límite de potencia se asignara 1 al vector correspondiente, pero si no hay anomalías se colocara un 0. (Ver figura 3.17 a y b)

La segunda subrutina revisara la información contenida en los vectores *IQmax* y *IQmin* para verificar la existencia de límites en el sistema; Si los vectores tienen valores igual a 1 entonces se realizan los cambios en las barras y posteriormente se creará una matriz *op1data* que mantiene los datos de la matriz *opdata* original con excepción de los cambios en cuanto al tipo de barra y la revaloración de la potencia reactiva generada, con la finalidad de proteger la matriz original de cambios en sus valores internos. Finalmente se colocarán las subrutinas de proceso que se encuentran en la rutina PRINCIPAL, es decir *Adeo*, *inicio*, *KLp*, *YLpq*, *Gseidel* y *lineaflujo*. Este procedimiento se puede ver en la figura 3.19.

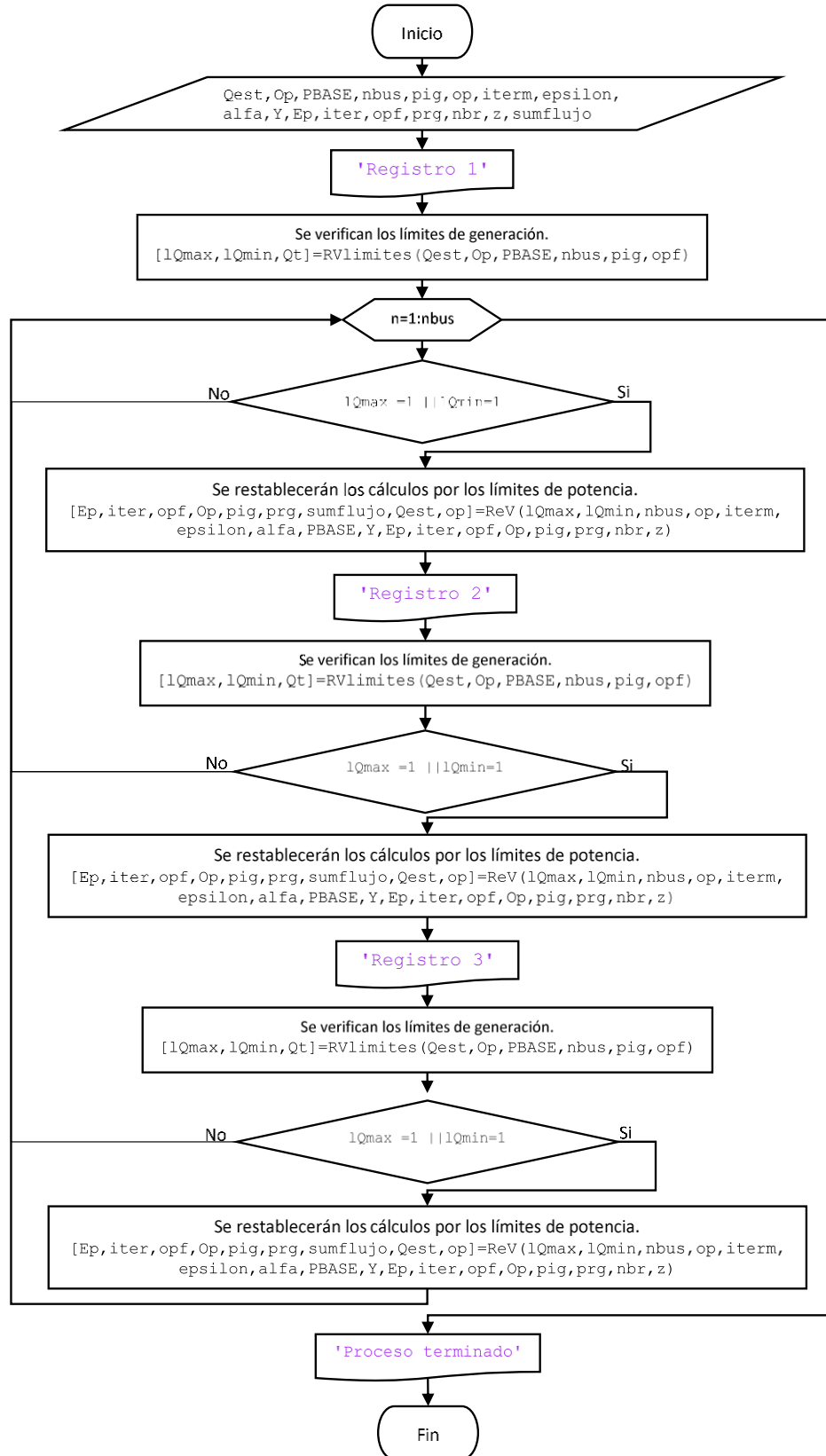
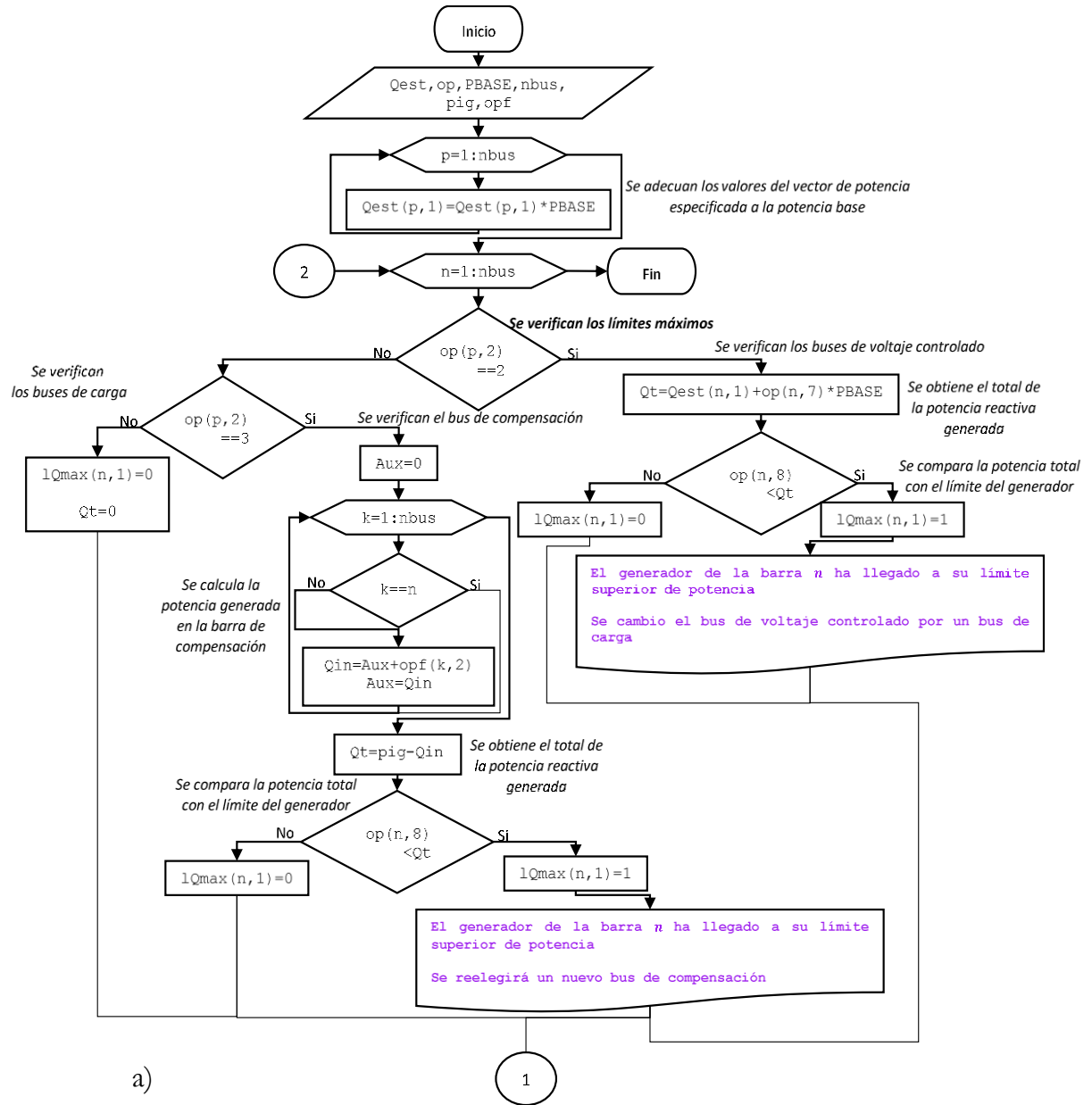


Figura 3.16 Diagrama de flujo para restablecer los cálculos del SEP si existen límites de potencia reactiva en el circuito



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel



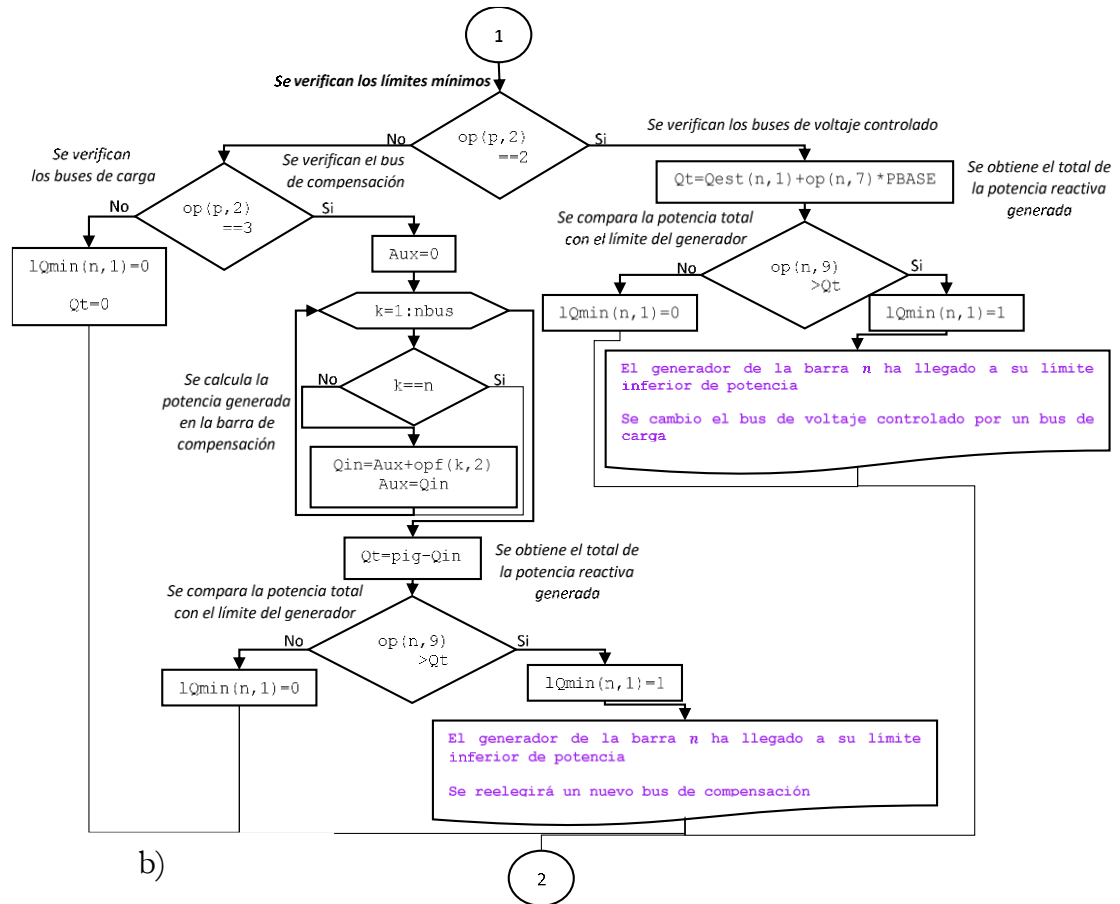


Figura 3.17 Diagrama de flujo para verificar los generadores que han excedido los límites de potencia reactiva

Cuando existe una respuesta ante algún límite de potencia en el sistema, la subrutina *ReV* recalculara los valores de potencias generadas con el uso de una variante del archivo *PotF.m* siendo nombrada *PotFF.m*. En este script se adecuarán los valores de las potencias específicas  $Q_{esp}$  a la potencia base del sistema por medio del arreglo presentado en la figura 3.18 a) y el arreglo del b) se reemplazará la forma de determinar la potencia reactiva de generación mostrada en la figura 3.15 b).

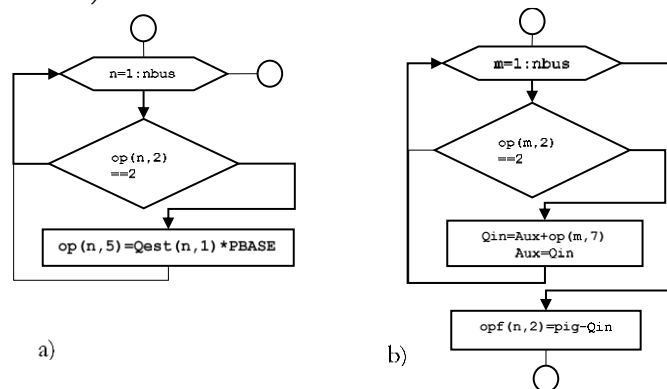


Figura 3.18 Arreglo de la subrutina para calcular las potencias reactivas generadas



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

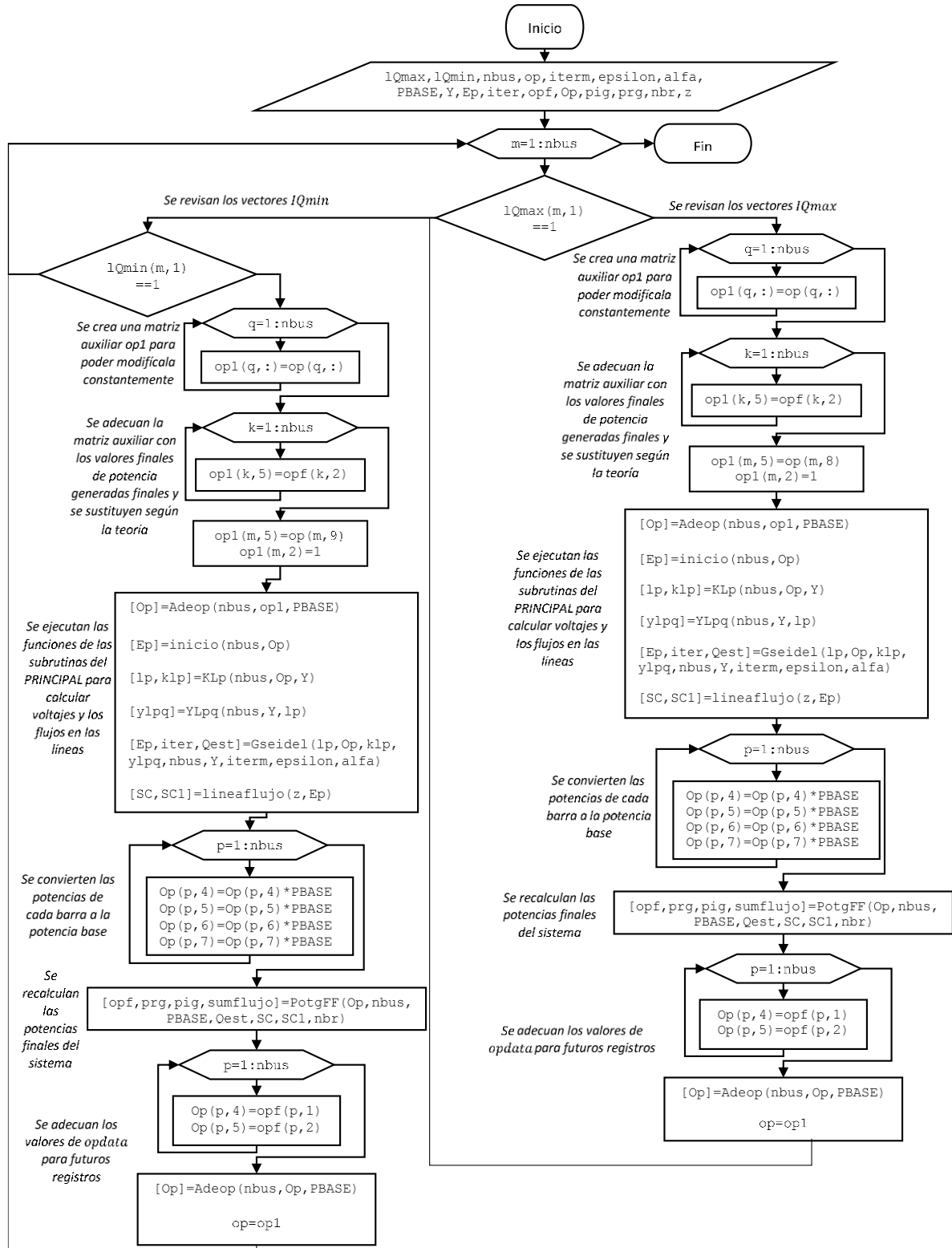


Figura 3.19 Diagrama de flujo para recalculer los valores del SEP



## 4 Resultados

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presentarán los resultados generados ante múltiples pruebas realizadas al programa V9 y se mostrara un análisis detallado de las ventajas de usar este formato como un medio de cálculo para resolver cálculos de flujo de potencia.

Se han elegido siete casos obtenidos de documentos enfocados al sector eléctrico, estos serán utilizado para ejecutar los algoritmos diseñados en este trabajo. Por otro lado, para poder mostrar las cualidades que caracterizan al programa V9 se empleará un software debidamente calificado y el cual será ejecutado simultáneamente con V9, con la finalidad de comparar los resultados de cada caso entre ambos programas.

Para realizar esta acción se utilizará MATPOWER (Thomas, Sánchez, & Gan, 2020). Este programa es un paquete de archivos con la extensión \*.m que resuelve problemas de flujo de energía siendo elaborado con la intención de garantizar un fácil manejo ante los investigadores en el área de la ingeniería. Este programa permitirá verificar que los resultados obtenidos de V9 son datos confiables e idealizara mejoras futuras para este proyecto.

### 4.2 Descripción y simulaciones de los sistemas de prueba

En este apartado se realizará la introducción de los casos con los que se probó el programa V9 para el cálculo de flujo de potencia, por lo que se diseñó un formato estándar para describirlos que se conformara de la siguiente manera:

- |                        |  |
|------------------------|--|
| a) Descripción general | Cada caso tendrá un apartado especial que permita presentar el circuito y proporcionar su respectiva referencia.   |
| b) Diagrama Unifilar   | Posteriormente se mostrará el esquema que representa al SEP permitiendo ubicar cada componente del circuito.   |
| c) Datos de las barras | En esta sección se encontrarán los datos correspondientes a las barras por medio de una tabla. Es importante mencionar que los tipos de buses se determinaran por la siguiente nomenclatura: |

[1] – Buses de carga



- [2] – Buses de Voltaje Controlado
- [3] – Buses de Compensación

- d) Datos de las líneas                      Para introducir los datos de las líneas del sistema se utilizará una tabla independiente a la anterior para poder facilitar la comprensión de los archivos de entrada establecido por IEEE.
- e) Resultados de los voltajes con variación del factor de aceleramiento                      El programa se ejecutó para cada valor del voltaje variando el factor de aceleramiento en 0.1 desde 1 hasta 2 y se colocaron los resultados de MATPOWER del mismo caso para comprobar la precisión y la eficiencia del programa V9.
- f) Pruebas de los resultados con variación de tolerancias                      Para poder aproximar los resultados de V9 con MATPOWER, se realizaron tablas que tienen los datos de la solución con una tolerancia de  $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-9}$
- g) Resultados del SEP considerando límites de potencias.                      Para presentar los resultados con límites de potencia se emplearon tablas donde se muestren los voltajes de convergencia del programa V9 y los de MATPOWER con el objetivo de garantizar un mayor grado de confiabilidad.

Los datos del sistema que se usaron para generar las variables de entrada para todos los casos son:

- Una iteración máxima permitida de 10000.
- Una tolerancia de  $1 \times 10^{-9}$ .
- Un factor de aceleramiento de 1.6.
- Una potencia base de 100 MVA.

En el anexo B (B1-B7) se pueden observar algunos formatos de impresión que ofrece Matlab.

• **Caso 1 Sistema de prueba de 4 Barras con Transformador**

El primer sistema de prueba está formado de 4 barras y un transformador conectado a la barra 3. Su diagrama unifilar se observa en la figura 4.1 y los datos que entran al sistema se obtienen de las tablas 4.1 y 4.2. Este SEP es obtenido del libro Análisis de Sistemas de Potencia (Grainger & Stevenson, 1996, pág. 342)

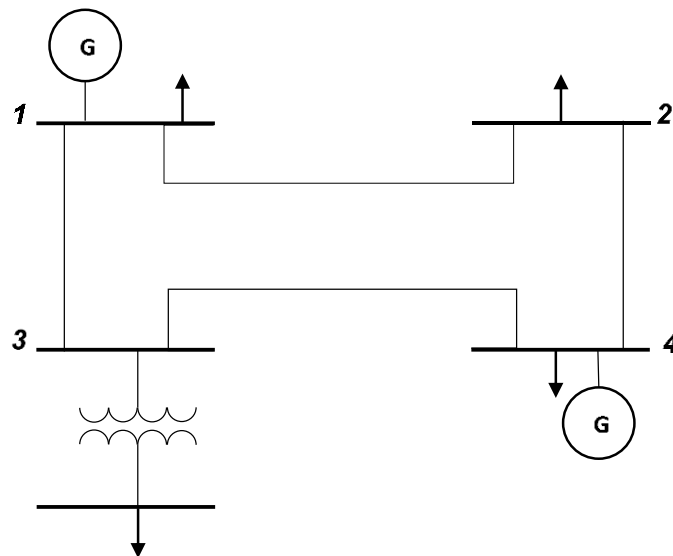


Figura 4.1 Diagrama Unifilar del caso 1

Tabla 4.1 Datos de las barras del caso 1

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Qmax	Qmin
1	3	1	0	0	50	30.99	200	-100
2	1	1	0	0	170	105.35	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0
4	2	1.02	318	0	200	49.58	200	-100
5	1	1	0	0	80	123.94	0	0

Tabla 4.2 Datos de las líneas del caso 1

Desde	Hacia	R	X	Ypq'	tap
1	2	0.01008	0.0504	0.05125	0
1	3	0.00744	0.0372	0.03875	0
2	4	0.00744	0.0372	0.03875	0
3	4	0.01272	0.0636	0.06375	0
3	5	0.00000	0.0200	0.00000	1.0385



**Tabla 4.3 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 1 (V9 v MATPOWER)**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6							
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5	Alfa	Iteraciones	Tiempo
1	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016730i	0.965577 - 0.031138i	1.019639 + 0.027122i	0.974383 - 0.071315i	1.00	26	0.011
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016730i	0.965576 - 0.031138i	1.019639 + 0.027122i	0.974383 - 0.071315i	1.10	21	0.016
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016730i	0.965576 - 0.031138i	1.019639 + 0.027121i	0.974382 - 0.071316i	1.20	17	0.011
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016730i	0.965576 - 0.031139i	1.019639 + 0.027121i	0.974382 - 0.071316i	1.30	12	0.010
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016731i	0.965576 - 0.031140i	1.019639 + 0.027120i	0.974382 - 0.071317i	1.40	14	0.011
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016731i	0.965576 - 0.031140i	1.019639 + 0.027120i	0.974382 - 0.071317i	1.50	17	0.009
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016731i	0.965575 - 0.031139i	1.019639 + 0.027120i	0.974382 - 0.071317i	1.60	23	0.014
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016731i	0.965576 - 0.031140i	1.019639 + 0.027120i	0.974382 - 0.071317i	1.70	33	0.010
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016731i	0.965577 - 0.031140i	1.019639 + 0.027120i	0.974383 - 0.071318i	1.80	54	0.017
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016731i	0.965574 - 0.031139i	1.019639 + 0.027120i	0.974381 - 0.071316i	1.90	143	0.016
	NC	NC	NC	NC	NC	2.00	NC	NC
Matpower	1.000000 + 0.000000i	0.982278 + 0.016731i	0.965576 - 0.031139i	1.019639 + 0.027120i	0.974382 - 0.071317i	SN	37	0.01

**Tabla 4.4 Pruebas de resultados del caso 1 con variación de tolerancias**

Caso 1	Tolerancia	Bus 5=200	V1		V2		V3		V4		V5	
			Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
Versión 9	1.00E-06	100	1.000000	0.000000	0.982252	-0.362627	0.973346	-0.079564	1.020000	2.581507	0.985384	-1.230186
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982252	-0.362622	0.973347	-0.079578	1.020000	2.581507	0.985385	-1.230206
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982252	-0.362621	0.973347	-0.079577	1.020000	2.581509	0.985385	-1.230205
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982252	-0.362621	0.973347	-0.079577	1.020000	2.581509	0.985385	-1.230204
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982252	-0.362621	0.973347	-0.079577	1.020000	2.581509	0.985385	-1.230204
Versión 9	1.00E-06	200	1.000000	0.000000	0.982421	-0.975812	0.966077	-1.847109	1.020000	1.523590	0.976988	-4.186113
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982421	-0.975816	0.966078	-1.847130	1.020000	1.523582	0.976988	-4.186119
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982421	-0.975817	0.966078	-1.847131	1.020000	1.523581	0.976988	-4.186120
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982421	-0.975817	0.966078	-1.847131	1.020000	1.523581	0.976988	-4.186120
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982421	-0.975817	0.966078	-1.847131	1.020000	1.523581	0.976988	-4.186120
Versión 9	1.00E-06	400	1.000000	0.000000	0.982495	-2.239400	0.945203	-5.467904	1.020000	-0.654817	0.951872	-10.379983
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982495	-2.239395	0.945202	-5.467840	1.020000	-0.654797	0.951872	-10.379951
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982495	-2.239396	0.945202	-5.467842	1.020000	-0.654798	0.951872	-10.379953
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982495	-2.239396	0.945202	-5.467842	1.020000	-0.654798	0.951872	-10.379953
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982495	-2.239396	0.945202	-5.467842	1.020000	-0.654798	0.951872	-10.379953

**Tabla 4.5 Solución del SEP/caso 1**

S/Límites de Potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.982421	-0.975817	0.982421	-0.975817	0.000000	0.000000
0.966078	-1.847131	0.966078	-1.847131	0.000000	0.000000
1.020000	1.523581	1.020000	1.523581	0.000000	0.000000
0.976988	-4.186120	0.976988	-4.186121	0.000000	0.000000
C/Límite Superior de Potencia (Bus 4, Qd=80 a 200)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.980821	-2.923726	0.980821	-2.923726	0.000000	0.000000
0.965016	-3.102506	0.965016	-3.102506	0.000000	0.000000
1.017381	-1.825797	1.017381	-1.825797	0.000000	0.000000
0.975854	-5.446793	0.975854	-5.446793	0.000000	0.000000
C/Límite Inferior de Potencia (Bus 4, Qd=-250)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.986047	-1.016507	0.986047	-1.016507	0.000000	0.000000
0.968458	-1.870082	0.968458	-1.870082	0.000000	0.000000
1.026068	1.427353	1.026068	1.427353	0.000000	0.000000
0.979533	-4.197254	0.979533	-4.197255	0.000000	0.000000



- **Caso 2 Sistema de prueba de 4 Barras sin Transformador**

El segundo sistema de prueba es el circuito del caso 1 sin transformador, por lo que su diagrama unifilar se puede representar por la figura 4.3 y los datos que entran al sistema se muestran en las tablas 4.6 y 4.7. Este SEP es obtenido del libro Análisis de Sistemas de Potencia (Grainger & Stevenson, 1996, pág. 342)

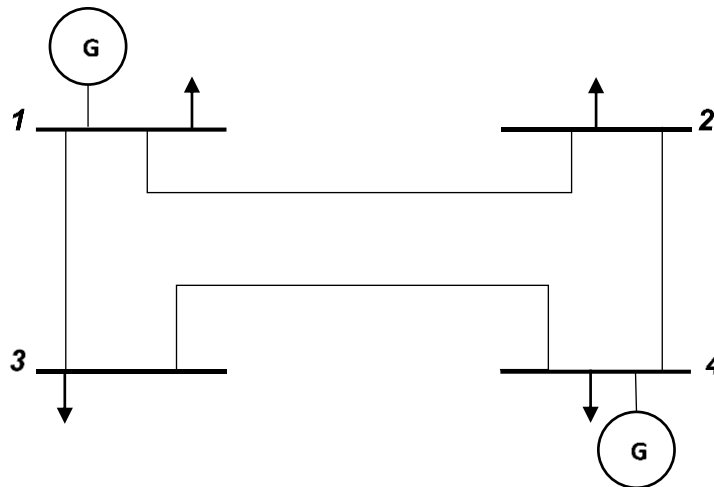


Figura 4.2 Diagrama Unifilar del caso 2

Tabla 4.6 Datos de las barras del caso 2

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			$P$ [MW]	$Q$ [Mvar]	$P$ [MW]	$Q$ [Mvar]	$Q_{max}$	$Q_{min}$
1	3	1	0	0	50	30.99	200	-100
2	1	1	0	0	170	105.35	0	0
3	1	1	0	0	200	123.94	0	0
4	2	1.02	318	0	80	49.58	200	-100

Tabla 4.7 Datos de las líneas del caso 2

Desde	Hacia	$R$	$X$	$Y_{pq}'$	$tap$
1	2	0.01008	0.0504	0.05125	0
1	3	0.00744	0.0372	0.03875	0
2	4	0.00744	0.0372	0.03875	0
3	4	0.01272	0.0636	0.06375	0



**Tabla 4.8 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 2 (V9 v MATPOWER)**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6						
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	Alfa	Iteraciones	Tiempo
2	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016737i	0.968488 - 0.031658i	1.019640 + 0.027110i	1	16	0.014
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016737i	0.968488 - 0.031658i	1.019640 + 0.027110i	1.1	15	0.010
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016737i	0.968488 - 0.031658i	1.019640 + 0.027110i	1.2	14	0.011
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016737i	0.968488 - 0.031658i	1.019640 + 0.027110i	1.3	13	0.010
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016737i	0.968487 - 0.031657i	1.019640 + 0.027111i	1.4	14	0.012
	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016736i	0.968488 - 0.031658i	1.019640 + 0.027111i	1.5	19	0.011
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016737i	0.968487 - 0.031657i	1.019640 + 0.027111i	1.6	26	0.013
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016737i	0.968487 - 0.031657i	1.019640 + 0.027111i	1.7	42	0.010
	1.000000 + 0.000000i	0.982279 - 0.016737i	0.968487 - 0.031656i	1.019640 + 0.027111i	1.8	90	0.011
	NC	NC	NC	NC	1.9	NC	NC
Matpower	1.000000 + 0.000000i	0.982278 - 0.016736i	0.968488 - 0.031657i	1.019640 + 0.027111i	SN	21	0.01

**Tabla 4.9 Pruebas de resultados del caso 2 con variación de tolerancias**

Caso 2	Tolerancia	Bus 3=200	V1		V2		V3		V4	
			PD	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud
Versión 9	1.00E-06	100	1.000000	0.000000	0.982252	-0.363201	0.974652	-0.092898	1.020000	2.580537
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982252	-0.363186	0.974652	-0.092929	1.020000	2.580535
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982252	-0.363184	0.974652	-0.092928	1.020000	2.580537
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982252	-0.363184	0.974652	-0.092928	1.020000	2.580537
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982252	-0.363184	0.974652	-0.092928	1.020000	2.580537
Versión 9	1.00E-06	200	1.000000	0.000000	0.982421	-0.976140	0.969005	-1.872144	1.020000	1.523056
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982421	-0.976124	0.969005	-1.872178	1.020000	1.523053
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982421	-0.976122	0.969005	-1.872177	1.020000	1.523055
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982421	-0.976122	0.969005	-1.872177	1.020000	1.523055
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982421	-0.976122	0.969005	-1.872177	1.020000	1.523055
Versión 9	1.00E-06	400	1.000000	0.000000	0.982495	-2.232975	0.955287	-5.517646	1.020000	-0.643762
Matpower	1.00E-06		1.000000	0.000000	0.982495	-2.232988	0.955287	-5.517613	1.020000	-0.643759
	1.00E-07		1.000000	0.000000	0.982495	-2.232990	0.955287	-5.517614	1.020000	-0.643760
	1.00E-08		1.000000	0.000000	0.982495	-2.232990	0.955287	-5.517614	1.020000	-0.643761
	1.00E-09		1.000000	0.000000	0.982495	-2.232990	0.955287	-5.517614	1.020000	-0.643761

**Tabla 4.10 Solución del SEP/caso 2**

S/Límites de Potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.982421	-0.976122	0.982421	-0.976122	0.000000	0.000000
0.969005	-1.872177	0.969005	-1.872177	0.000000	0.000000
1.020000	1.523055	1.020000	1.523055	0.000000	0.000000
C/Límite Superior de Potencia (Bus 4, Qd=200 a 400)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.981288	-2.219275	0.981288	-2.219275	0.000000	0.000000
0.954485	-5.514193	0.954485	-5.514193	0.000000	0.000000
1.017972	-0.613079	1.017972	-0.613079	0.000000	0.000000
C/Límite Inferior de Potencia (Bus 4, Qd=-250)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.987282	-1.030620	0.987282	-1.030620	0.000000	0.000000
0.972166	-1.902651	0.972166	-1.902651	0.000000	0.000000
1.028136	1.394310	1.028136	1.394310	0.000000	0.000000



• **Caso 3 Sistema de prueba de 5 Barras**

El siguiente caso a analizar es propuesto por El-Abiad pág. 284 en el cual se presenta un sistema de 5 barras (Figura 4.5) con los datos establecidos en las tablas 4.5 y 4.6.

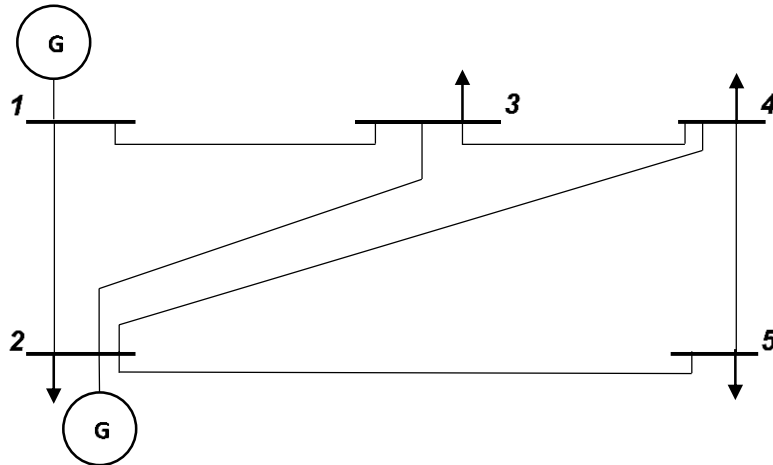


Figura 4.3 Diagrama Unifilar del caso 3 y del caso 4

Tabla 4.11 Datos de las barras del caso 3

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>
1	3	1.06	0	0	0	0	250	-250
2	1	1	40	30	20	10	250	-250
3	1	1	0	0	45	15	0	0
4	1	1	0	0	40	5	0	0
5	1	1	0	0	60	10	0	0

Tabla 4.12 Datos de las líneas del caso 3 y 4

Desde	Hacia	R	X	Y <sub>pq'</sub>	tap
1	2	0.02	0.06	0.030	0
1	3	0.08	0.24	0.025	0
2	3	0.06	0.18	0.020	0
2	4	0.06	0.18	0.020	0
2	5	0.04	0.12	0.015	0
3	4	0.01	0.03	0.010	0
4	5	0.08	0.24	0.025	0



**Tabla 4.13 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 3 (V9 v MATPOWER)**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6							
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5	Alfa	Iteraciones	Tiempo
3	1.060000 + 0.000000i	1.046183 - 0.051282i	1.020286 - 0.089206i	1.019145 - 0.095063i	1.012080 - 0.109056i	1.00	43	0.014
	1.060000 + 0.000000i	1.046183 - 0.051282i	1.020286 - 0.089207i	1.019145 - 0.095064i	1.012080 - 0.109057i	1.10	35	0.010
	1.060000 + 0.000000i	1.046183 - 0.051282i	1.020285 - 0.089208i	1.019144 - 0.095065i	1.012079 - 0.109057i	1.20	29	0.011
	1.060000 + 0.000000i	1.046182 - 0.051283i	1.020284 - 0.089208i	1.019143 - 0.095065i	1.012079 - 0.109058i	1.30	23	0.010
	1.060000 + 0.000000i	1.046182 - 0.051283i	1.020284 - 0.089209i	1.019143 - 0.095065i	1.012078 - 0.109058i	1.40	17	0.012
	1.060000 + 0.000000i	1.046181 - 0.051283i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	1.50	19	0.011
	1.060000 + 0.000000i	1.046181 - 0.051283i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	1.60	27	0.013
	1.060000 + 0.000000i	1.046182 - 0.051283i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	1.70	39	0.010
	1.060000 + 0.000000i	1.046182 - 0.051284i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	1.80	65	0.018
	1.060000 + 0.000000i	1.046181 - 0.051282i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	1.90	177	0.011
	NC	NC	NC	NC	NC	2.00	NC	NC
Matpower	1.060000 + 0.000000i	1.046182 - 0.051283i	1.020283 - 0.089209i	1.019142 - 0.095066i	1.012078 - 0.109058i	SN	58	0.02

**Tabla 4.14 Pruebas de resultados del caso 3 con variación de tolerancias**

Caso 3	Tolerancia	Bus 4=40 PD	V1		V2		V3		V4		V5	
			Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
Versión 9	1.00E-06	40	1.060000	0.000000	1.047438	-2.806332	1.024176	-4.996973	1.023566	-5.329134	1.017937	-6.150257
Matpower	1.00E-06		1.060000	0.000000	1.047438	-2.806348	1.024176	-4.996964	1.023566	-5.329132	1.017937	-6.150260
	1.00E-07		1.060000	0.000000	1.047438	-2.806350	1.024175	-4.996968	1.023566	-5.329136	1.017937	-6.150263
	1.00E-08		1.060000	0.000000	1.047438	-2.806350	1.024175	-4.996968	1.023566	-5.329137	1.017937	-6.150264
	1.00E-09		1.060000	0.000000	1.047438	-2.806350	1.024175	-4.996968	1.023566	-5.329137	1.017937	-6.150264
Versión 9	1.00E-06	50	1.060000	0.000000	1.045409	-3.019880	1.020575	-5.429730	1.019419	-5.853757	1.015060	-6.478154
Matpower	1.00E-06		1.060000	0.000000	1.045409	-3.019896	1.020575	-5.429722	1.019419	-5.853757	1.015061	-6.478158
	1.00E-07		1.060000	0.000000	1.045409	-3.019898	1.020575	-5.429726	1.019419	-5.853761	1.015061	-6.478161
	1.00E-08		1.060000	0.000000	1.045409	-3.019898	1.020575	-5.429726	1.019419	-5.853761	1.015061	-6.478161
	1.00E-09		1.060000	0.000000	1.045409	-3.019898	1.020575	-5.429726	1.019419	-5.853761	1.015061	-6.478161
Versión 9	1.00E-06	80	1.060000	0.000000	1.038829	-3.667374	1.009003	-6.753135	1.006160	-7.462289	1.005763	-7.479579
Matpower	1.00E-06		1.060000	0.000000	1.038829	-3.667392	1.009003	-6.753130	1.006160	-7.462290	1.005763	-7.479582
	1.00E-07		1.060000	0.000000	1.038829	-3.667394	1.009003	-6.753135	1.006160	-7.462295	1.005763	-7.479585
	1.00E-08		1.060000	0.000000	1.038829	-3.667394	1.009003	-6.753135	1.006160	-7.462295	1.005763	-7.479586
	1.00E-09		1.060000	0.000000	1.038829	-3.667394	1.009003	-6.753135	1.006160	-7.462295	1.005763	-7.479586

**Tabla 4.15 Solución del SEP/caso 3**

MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.047438	-2.806350	1.047438	-2.806350	0.000000	0.000000
1.024175	-4.996968	1.024175	-4.996969	0.000000	0.000000
1.023566	-5.329137	1.023566	-5.329137	0.000000	0.000000
1.017937	-6.150264	1.017937	-6.150264	0.000000	0.000000

Debido a la configuración de los tipos de barra, el sistema solo puede exceder el límite del bus de compensación pero en la práctica cuando esto sucede se debe conectar un generador en paralelo permitiendo tener una mayor capacidad del límite de potencia reactivo. Por lo que no se es posible recalculer los datos del sistema.

- **Caso 4 Sistema de prueba de 5 Barras con cambio del bus de compensación**

Para verificar el buen funcionamiento del programa se creó una variante del caso 3 con un cambio del bus de compensación como se muestra en la tabla 4.7. En cuanto al diagrama unifilar y los datos de línea se podrán utilizar los del caso 3.



Tabla 4.16 Datos de las barras del caso 4

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>
1	1	1	40	30	20	10	250	-250
2	3	1.06	0	0	0	0	250	-250
3	1	1	0	0	45	15	0	0
4	1	1	0	0	40	5	0	0
5	1	1	0	0	60	10	0	0

Tabla 4.17 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 4 (V9 v MATPOWER)

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6								
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5	Alfa	Iteraciones	Tiempo	
4	1.069941 - 0.005620i	1.060000 + 0.000000i	1.035633 - 0.052914i	1.034862 - 0.055874i	1.028945 - 0.062409i	1.00	24	0.0112	
	1.069941 - 0.005620i	1.060000 + 0.000000i	1.035633 - 0.052914i	1.034862 - 0.055874i	1.028945 - 0.062409i	1.10	19	0.0143	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035633 - 0.052914i	1.034863 - 0.055874i	1.028945 - 0.062409i	1.20	14	0.0105	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.30	12	0.0128	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.40	16	0.0094	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.50	20	0.0102	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.60	28	0.0111	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.70	42	0.0124	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062409i	1.80	72	0.0228	
	1.069941 - 0.005621i	1.060000 + 0.000000i	1.035634 - 0.052915i	1.034863 - 0.055875i	1.028945 - 0.062408i	1.90	187	0.0153	
Matpower	NC	NC	NC	NC	NC	2.00	NC	NC	

Tabla 4.18 Pruebas de resultados del caso 4 con variación de tolerancias

Caso 4	Tolerancia	Bus 4=40	V1		V2		V3		V4		V5		
			Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	
Versión 9	1.00E-06	40	1.069956	-0.301005	1.060000	0.000000	1.036985	-2.924927	1.036370	-3.090536	1.030836	-3.470916	
			Matpower	1.069956	-0.300988	1.060000	0.000000	1.036985	-2.924929	1.036370	-3.090530	1.030836	-3.470939
				1.069956	-0.300988	1.060000	0.000000	1.036985	-2.924931	1.036370	-3.090531	1.030836	-3.470939
				1.069956	-0.300988	1.060000	0.000000	1.036985	-2.924931	1.036370	-3.090531	1.030836	-3.470939
				1.069956	-0.300988	1.060000	0.000000	1.036985	-2.924931	1.036370	-3.090531	1.030836	-3.470939
Versión 9	1.00E-06	50	1.069511	-0.353454	1.060000	0.000000	1.034953	-3.198440	1.033897	-3.438330	1.029905	-3.587486	
			Matpower	1.069511	-0.353435	1.060000	0.000000	1.034953	-3.198440	1.033896	-3.438321	1.029905	-3.587508
				1.069511	-0.353437	1.060000	0.000000	1.034953	-3.198443	1.033896	-3.438325	1.029905	-3.587509
				1.069511	-0.353437	1.060000	0.000000	1.034953	-3.198444	1.033896	-3.438325	1.029905	-3.587509
				1.069511	-0.353437	1.060000	0.000000	1.034953	-3.198444	1.033896	-3.438325	1.029905	-3.587509
Versión 9	1.00E-06	80	1.068095	-0.511048	1.060000	0.000000	1.028560	-4.026928	1.026153	-4.493818	1.026948	-3.939374	
			Matpower	1.068095	-0.511029	1.060000	0.000000	1.028560	-4.026925	1.026153	-4.493808	1.026948	-3.939396
				1.068095	-0.511029	1.060000	0.000000	1.028560	-4.026928	1.026153	-4.493810	1.026948	-3.939397
				1.068095	-0.511030	1.060000	0.000000	1.028560	-4.026928	1.026153	-4.493810	1.026948	-3.939397
				1.068095	-0.511030	1.060000	0.000000	1.028560	-4.026928	1.026153	-4.493810	1.026948	-3.939397

Tabla 4.19 Solución del SEP/caso 4

MATPOWER		V9		Diferencia	
1.069956	-0.300988	1.069956	-0.300988	0.000000	0.000000
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.036985	-2.924931	1.036985	-2.924931	0.000000	0.000000
1.036370	-3.090531	1.036370	-3.090531	0.000000	0.000000
1.030836	-3.470939	1.030836	-3.470939	0.000000	0.000000

• **Caso 5 Sistema de prueba de 9 Barras**

El caso 5 es un sistema de prueba publicado en el proyecto: Power System Dynamic Analysis - Phase 1 (Dembart , Erisman, Cate, Epton, & Dommel, 1997) El diagrama unifilar se encuentra en la figura 4.8 y los datos asignados su muestran en las tablas 4.8 y 4.9.

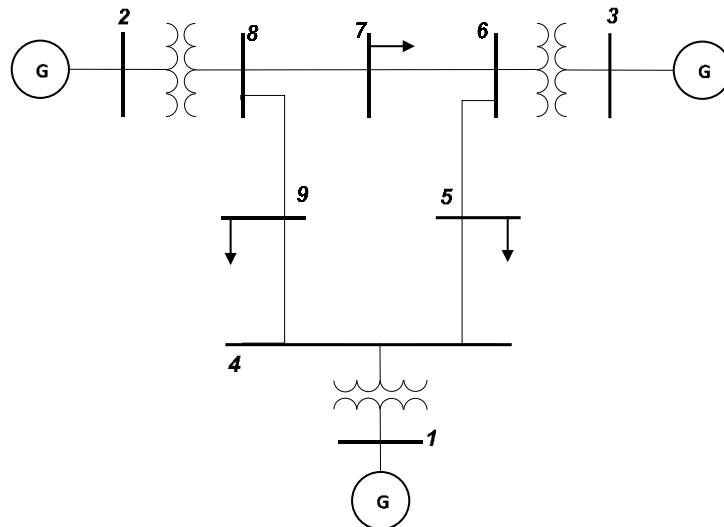


Figura 4.4 Diagrama Unifilar del caso 5

Tabla 4.20 Datos de las barras del caso 5

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>
1	3	1	0	0	0	0	60	-60
2	2	1	163	0	0	0	60	-60
3	2	1	85	0	0	0	60	-60
4	1	1	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	90	30	0	0
6	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	100	35	0	0
8	1	1	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	0	125	50	0	0

Tabla 4.21 Datos de las líneas del caso 5

Desde	Hacia	R	X	Y <sub>pq'</sub>	tap
1	4	0.0000	0.0576	0.0000	0
4	5	0.0170	0.0920	0.0790	0
5	6	0.0390	0.1700	0.1790	0
3	6	0.0000	0.0586	0.0000	0
6	7	0.0119	0.1008	0.1045	0
7	8	0.0085	0.0720	0.0745	0
8	2	0.0000	0.0625	0.0000	0
8	9	0.0320	0.1610	0.1530	0



Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

9	4	0.0100	0.0850	0.0880	0
---	---	--------	--------	--------	---

Las tablas 4.22 y 4.23 muestran solo los valores de una cantidad determinada de buses, pero los datos completos se anexarán al apéndice B-B8

**Tabla 4.22 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 5 (V9 v MATPOWER)**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6						
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	Alfa	Iteraciones	Tiempo
5	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167941i	0.996536 + 0.083163i	0.986137 - 0.041449i	1.0	100	0.022
	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167942i	0.996536 + 0.083164i	0.986137 - 0.041449i	1.1	88	0.023
	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167944i	0.996536 + 0.083166i	0.986137 - 0.041448i	1.2	79	0.022
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167945i	0.996536 + 0.083167i	0.986137 - 0.041448i	1.3	70	0.024
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167946i	0.996535 + 0.083169i	0.986136 - 0.041448i	1.4	63	0.021
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167947i	0.996535 + 0.083170i	0.986136 - 0.041447i	1.5	56	0.018
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167948i	0.996535 + 0.083170i	0.986136 - 0.041447i	1.6	50	0.021
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167948i	0.996535 + 0.083171i	0.986136 - 0.041447i	1.7	44	0.016
	1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083174i	0.986136 - 0.041446i	1.8	46	0.017
	1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083175i	0.986136 - 0.041446i	1.9	78	0.022
1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167952i	0.996535 + 0.083175i	0.986135 - 0.041445i	2.0	1734	0.096	
Matpower	1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083174i	0.986136 - 0.041446i	SN	153	0.05

**Tabla 4.23 Pruebas de resultados del caso 5 con variación de tolerancias**

Bus	Bus 7 = 100					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	9.668741	1.000000	9.668741	0.000000	0.000000
3	1.000000	4.771073	1.000000	4.771073	0.000000	0.000000
'''	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 9						
Bus	Bus 7 = 200					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-1.586566	1.000000	-1.586567	0.000000	0.000000
3	1.000000	-6.012148	1.000000	-6.012149	0.000000	0.000000
'''	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 9						
Bus	Bus 7 = 400					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-13.855613	1.000000	-13.855613	0.000000	0.000000
3	1.000000	-17.876162	1.000000	-17.876162	0.000000	0.000000
'''	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 9						



**Tabla 4.24 Solución del SEP/caso 5**

S/Límites de potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	9.668741	1.000000	9.668741	0.000000	0.000000
1.000000	4.771073	1.000000	4.771073	0.000000	0.000000
..	..	..	..	..	..
C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9
C/Límite Superior de Potencia (Bus 7, Qd=35 a 125)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.989571	10.586214	0.989571	10.586214	0.000000	0.000000
1.000000	5.125093	1.000000	5.125093	0.000000	0.000000
..	..	..	..	..	..
C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9
C/Límites Inferior de Potencia (Bus 7, Qd=35 a -110)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	8.633738	1.000000	8.633738	0.000000	0.000000
1.001870	4.153417	1.001870	4.153417	0.000000	0.000000
..	..	..	..	..	..
C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9	C/Bus 9

- **Caso 6 Sistema de prueba de 14 Barras**

El sistema de prueba del caso 6 representa una porción del sistema eléctrico de potencia estadounidense (ubicado en el medio oeste de los EUA), esta información es proporcionada por los archivos IEEE (Dabbaghi y Christie, 1993). Los datos de línea y los datos en las barras fueron tomados del libro Simulación de Sistemas eléctricos.

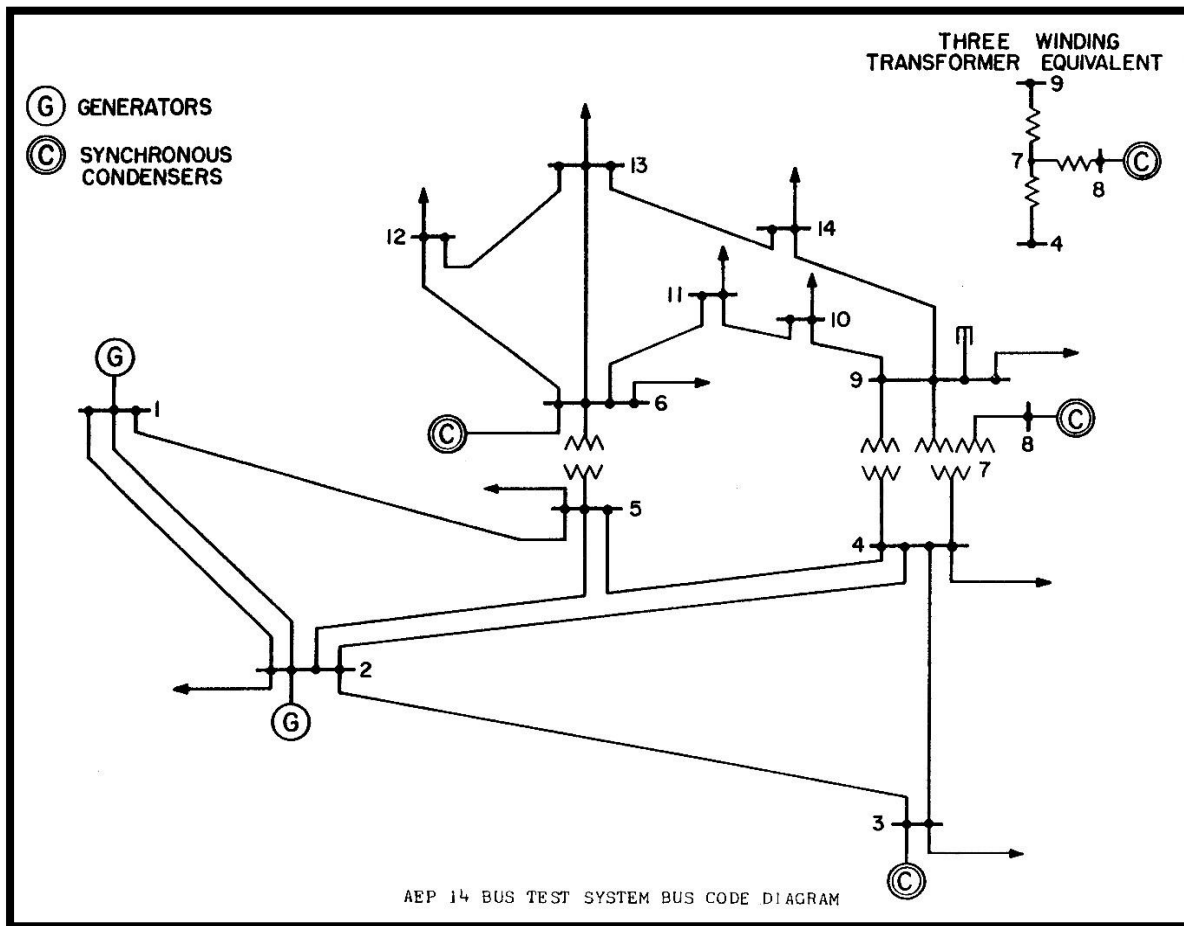


Figura 4.5 Diagrama Unifilar del caso 6

Tabla 4.25 Datos de las barras del caso 6

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>
1	3	1.060	0	0	0.0	0.0	100	-20
2	2	1.045	40	0	21.7	12.7	50	-40
3	2	1.010	0	0	94.2	19.0	40	0
4	1	1	0	0	47.8	3.9	0	0
5	1	1	0	0	7.6	1.6	0	0
6	2	1.070	0	0	11.2	7.5	24	-6
7	1	1	0	0	0.0	0.0	0	0
8	2	1.090	0	0	0.0	0.0	24	-6
9	1	1	0	0	29.5	16.6	0	0
10	1	1	0	0	9.0	5.8	0	0
11	1	1	0	0	3.5	1.8	0	0
12	1	1	0	0	6.1	1.6	0	0
13	1	1	0	0	13.5	5.8	0	0
14	1	1	0	0	14.9	5.0	0	0



*Tabla 4.26 Datos de las líneas del caso 6*

Desde	Hacia	R	X	Ypq'	tap
1	2	0.01938	0.05917	0.0264	0
1	5	0.05403	0.22304	0.0246	0
2	3	0.04699	0.19797	0.0219	0
2	4	0.05811	0.17632	0.0170	0
2	5	0.05695	0.17388	0.0173	0
3	4	0.06701	0.17103	0.0064	0
4	5	0.01335	0.04211	0	0
4	7	0	0.20912	0	1.0224
4	9	0	0.55618	0	1.0319
5	6	0	0.25202	0	1.0729
6	11	0.09498	0.19890	0	0
6	12	0.12291	0.25581	0	0
6	13	0.06615	0.13027	0	0
7	8	0	0.17615	0	0
7	9	0	0.11001	0	0
9	10	0.03181	0.08450	0	0
9	14	0.12711	0.27038	0	0
10	11	0.08205	0.19207	0	0
12	13	0.22092	0.19988	0	0
13	14	0.17093	0.34802	0	0

Las tablas 4.27 y 4.28 muestran solo los valores de una cantidad determinada de buses, pero los datos completos se anexarán al apéndice B-B9.



**Tabla 4.27 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 6 (V9 v MATPOWER)**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6						
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	Alfa	Iteraciones	Tiempo
6	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090934i	0.985038 - 0.223158i	0.995043 - 0.179329i	1.00	137	0.0646
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090934i	0.985038 - 0.223159i	0.995043 - 0.179330i	1.10	119	0.0643
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090935i	0.985038 - 0.223160i	0.995042 - 0.179331i	1.20	104	0.067
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090935i	0.985038 - 0.223160i	0.995042 - 0.179331i	1.30	91	0.0709
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985038 - 0.223161i	0.995042 - 0.179332i	1.40	80	0.0744
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985038 - 0.223162i	0.995042 - 0.179333i	1.50	70	0.0698
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985037 - 0.223162i	0.995042 - 0.179333i	1.60	61	0.0634
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090937i	0.985037 - 0.223163i	0.995041 - 0.179334i	1.70	54	0.061
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090938i	0.985037 - 0.223164i	0.995040 - 0.179336i	1.80	56	0.06590
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090938i	0.985037 - 0.223165i	0.995041 - 0.179336i	1.90	148	0.0741
	NC	NC	NC	NC	2.00	NC	NC
Matpower	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090938i	0.985037 - 0.223164i	0.995041 - 0.179336i	SN	181	0.99

**Tabla 4.28 Pruebas de resultados del caso 6 con variación de tolerancias**

Bus	Bus 12 PD = 6.1 QD=1.6					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-4.992308	1.045000	-4.992308	0.000000	0.000000
3	1.010000	-12.765136	1.010000	-12.765136	0.000000	0.000000
...	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 14						
Bus	Bus 12 PD = 10.1 QD=5.6					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-5.087516	1.045000	-5.087516	0.000000	0.000000
3	1.010000	-12.920637	1.010000	-12.920637	0.000000	0.000000
...	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 14						
Bus	Bus 12 PD = 20 QD=10					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-5.327133	1.045000	-5.327133	0.000000	0.000000
3	1.010000	-13.311833	1.010000	-13.311833	0.000000	0.000000
...	...	...	...	...	...	...
Continua hasta el bus 14						



**Tabla 4.29 Solución del SEP/caso 6**

S/Límites de potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.045000	-4.992308	1.045000	-4.992259	0.000000	-0.000048
1.010000	-12.765136	1.010000	-12.764940	0.000000	-0.000196
..	..	..	..	..	..
C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14
C/ Límite Superior de potencia (Solo activando la subrutina)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.044883	-4.991465	1.044890	-4.991514	-0.000006	0.000050
1.010000	-12.769113	1.010000	-12.768891	0.000000	-0.000221
..	..	..	..	..	..
C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14
C/ Límite Inferior de potencia (Bus 6, Qd=7.5 a -25.5)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.045000	-4.988863	1.045000	-4.988870	0.000000	0.000007
1.010000	-12.752118	1.010000	-12.752129	0.000000	0.000011
..	..	..	..	..	..
C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14	C/Bus 14

- **Caso 7 Sistema de prueba de 30 Barras**

El séptimo sistema de prueba fue obtenido de igual manera por IEEE (Dabbagchi y Christie, 1993) siendo una representación de un SEP ubicado en el medio Oeste de los EUA y está conformado de 30 buses con los datos mostrados en la tabla 4.30 y 4.31. Para este caso solo se mostrar un fragmento de las tablas debido a su alta cantidad de buses, pero las tablas completas se podrán encontrar en el apéndice B-B10

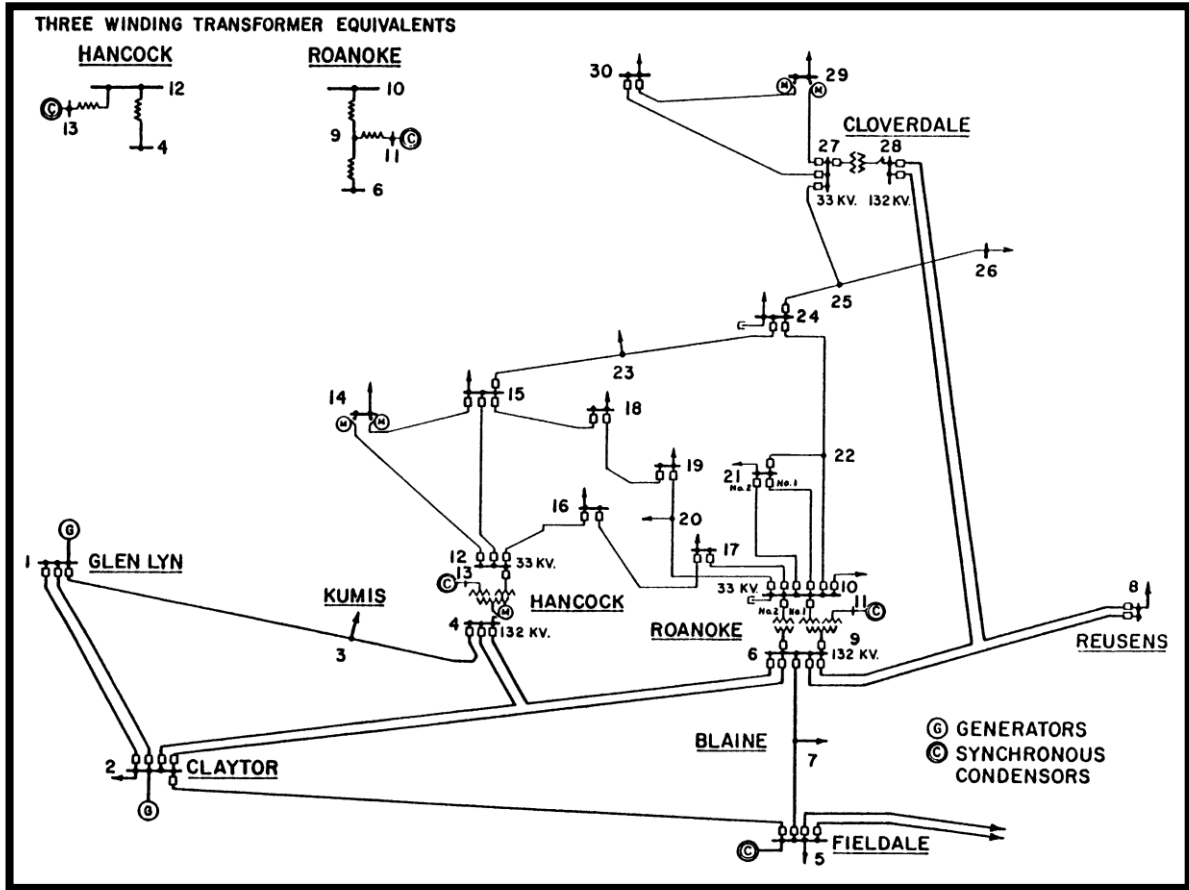


Figura 4.6 Diagrama Unifilar del caso 7

Tabla 4.30 Datos de las barras del caso 7

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Qmax	Qmin
1	3	1	23.54	0	0	0	150	-20
2	2	1	60.97	0	21.7	12.7	60	-20
3	1	1	0	0	2.4	1.2	0	0
4	1	1	0	0	7.6	1.6	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	22.8	10.9	0	0
8	1	1	0	0	30	30	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	5.8	2	0	0

La tabla continua hasta el bus 30

Tabla 4.31 Datos de las líneas del caso 7

Desde	Hacia	R	X	Ypq'	tap
1	2	0.02	0.06	0.015	0
1	3	0.05	0.19	0.01	0



2	4	0.06	0.17	0.01	0
2	5	0.05	0.2	0.01	0
2	6	0.06	0.18	0.01	0
3	4	0.01	0.04	0	0
4	6	0.01	0.04	0	0
4	12	0	0.26	0	0
5	7	0.05	0.12	0.005	0
6	7	0.03	0.08	0.005	0
6	8	0.01	0.04	0	0
6	9	0	0.21	0	0
...	...	...	...	...	...

Tabla 4.32 Resultados con variación en el factor de aceleramiento, caso 7 (V9 v MATPOWER)

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6					Versión 9, Epsilon = 1E-6		
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5	Alfa	Iteraciones	Tiempo
6	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	612	1.00	0.178
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	535	1.10	0.127
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	471	1.20	0.113
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	416	1.30	0.115
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	369	1.40	0.093
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	327	1.50	0.081
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	291	1.60	0.074
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	260	1.70	0.070
	1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	232	1.80	0.078
1.000000 0.000000	0.999974 -0.007252	0.982768 -0.026110	0.979584 -0.030691	0.981679 -0.031885	207	1.90	0.062	
	NC	NC	NC	NC	NC	NC	2.00	NC
Matpower	1.000000 0.000000i	0.999974 -0.007252i	0.982791 -0.026114i	0.979612 -0.030695i	0.981886 -0.031952i	769	SN	0.3

Tabla 4.33 Pruebas de resultados del caso 7 con variación de tolerancias

Bus	Bus 26 = 2.3					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.415500	1.000000	-0.415491	0.000000	-0.000010
3	0.983115	-1.521892	0.983138	-1.522074	-0.000023	0.000182
..	..	..	..	..	..	..
Continua hasta el bus 30						
Bus	Bus 26 = 15					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.439670	1.000000	-0.439654	0.000000	-0.000016
3	0.983036	-1.560544	0.983059	-1.560715	-0.000023	0.000170
..	..	..	..	..	..	..
Continua hasta el bus 30						
Bus	Bus 26 = 30					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.543679	1.000000	-0.543649	0.000000	-0.000030
3	0.982687	-1.726040	0.982710	-1.726183	-0.000023	0.000143
..	..	..	..	..	..	..
Continua hasta el bus 30						



**Tabla 4.34 Solución del SEP/caso 7**

S/ Límite de potencia					
Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	-0.415500	1.000000	-0.415491	0.000000	-0.000010
0.983115	-1.521892	0.983138	-1.522074	-0.000023	0.000182
..	..	..	..	..	..
C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30
C/ Límite Superior de potencia (Cambio del bus 24, Qd=6.7 a 50.7)					
Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	-0.455872	1.000000	-0.455820	0.000000	-0.000053
0.982915	-1.584515	0.982943	-1.584704	-0.000028	0.000189
..	..	..	..	..	..
C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30
C/ Límite Inferior de potencia (Cambio del bus 24, Qd=6.7 a -50.7)					
Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.000000	0.000000
1.00000	-0.44344	1.00000	-0.44349	0.000000	0.000049
0.98304	-1.57021	0.98307	-1.57051	-0.000024	0.000297
..	..	..	..	..	..
C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30	C/Bus 30

### 4.3 Observaciones y análisis de resultados

Para determinar la eficiencia del programa se deben analizar detalladamente los resultados obtenidos y presentados en el subcapítulo anterior. De manera general se abordarán dos puntos esenciales: en primer lugar, se realizará un análisis del factor de aceleramiento en el proceso iterativo de Gauss-Seidel y posteriormente se realizará un estudio que permita observar la precisión de los resultados variando el valor de tolerancia.

De las tablas 4.3, 4.8, 4.13, 4.17, 4.22, 4.27 y 4.32 se puede obtener la información general que caracteriza al programa, debido a que se proporcionan los valores de iteración y tiempo de convergencia para cada valor de  $\alpha$  desde 1 hasta 2. Conforme los resultados obtenidos en las tablas podemos deducir que:

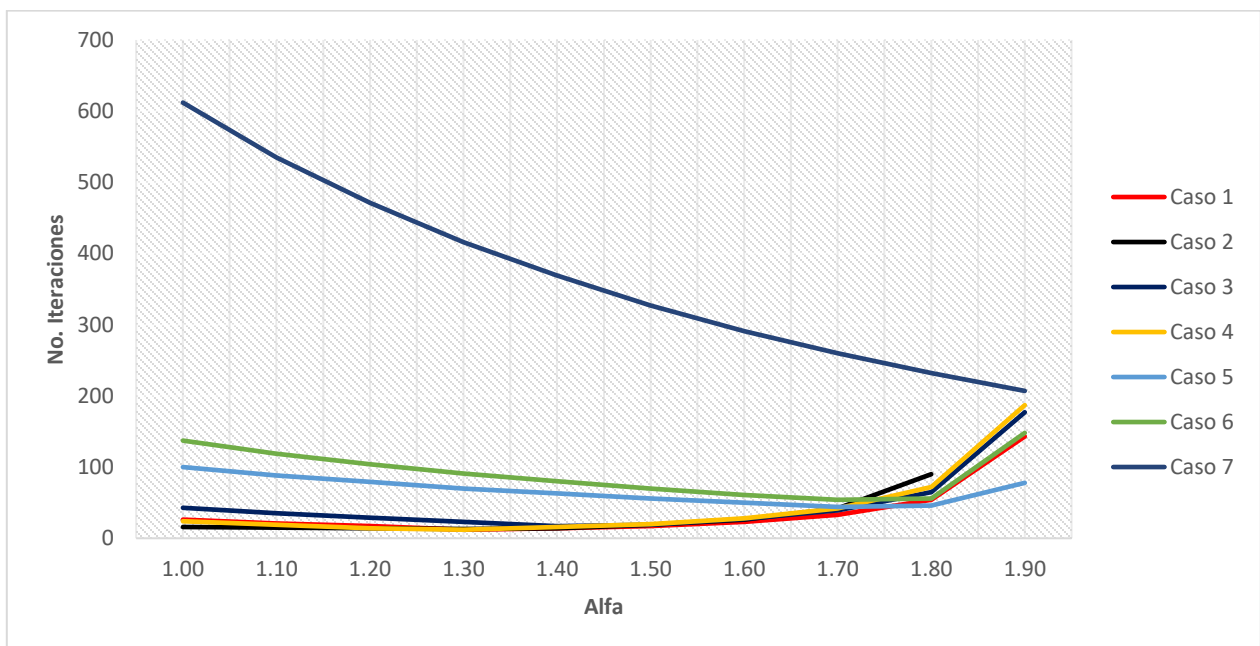
1. Si se analizan los casos por separado, se podrá verificar que conforme se aumenta el factor de aceleramiento para extrapolar los voltajes, la cantidad de iteraciones será menor hasta cierto límite, puesto que en algún punto (entre 1 y 2) la cantidad de iteraciones cambiará de dirección (haciendo referencia a la gráfica de la figura 4.7) e ira en aumento.



2. Al considerar los casos de manera general se puede observar que entre más grande el sistema, el número de iteraciones de convergencia tiende a aumentar.
3. Por otro lado, si se observan los mínimos absolutos de cada caso se puede determinar un valor general del factor de aceleramiento. En la tabla 3.34 se pueden ver los valores mínimos por caso y su alfa correspondiente. Si se realiza un promedio y se aplica un margen de error del 5% debido a la cantidad de casos con los que se hace el análisis se obtiene un valor aproximado de 1.6 para el valor máximo. Usualmente ese valor es utilizado en los cálculos de ingeniería.

*Tabla 4.35 Valores mínimos de iteración de convergencia de cada caso simulado*

Caso	Iteración Mínima	Valor mínimo de Alfa
1	12	1.3
2	13	1.3
3	17	1.4
4	12	1.3
5	44	1.7
6	54	1.7
7	207	1.9
Promedio del valor de alfa		1.51
Valor máximo de tolerancia		1.59
Valor mínimo de tolerancia		1.43

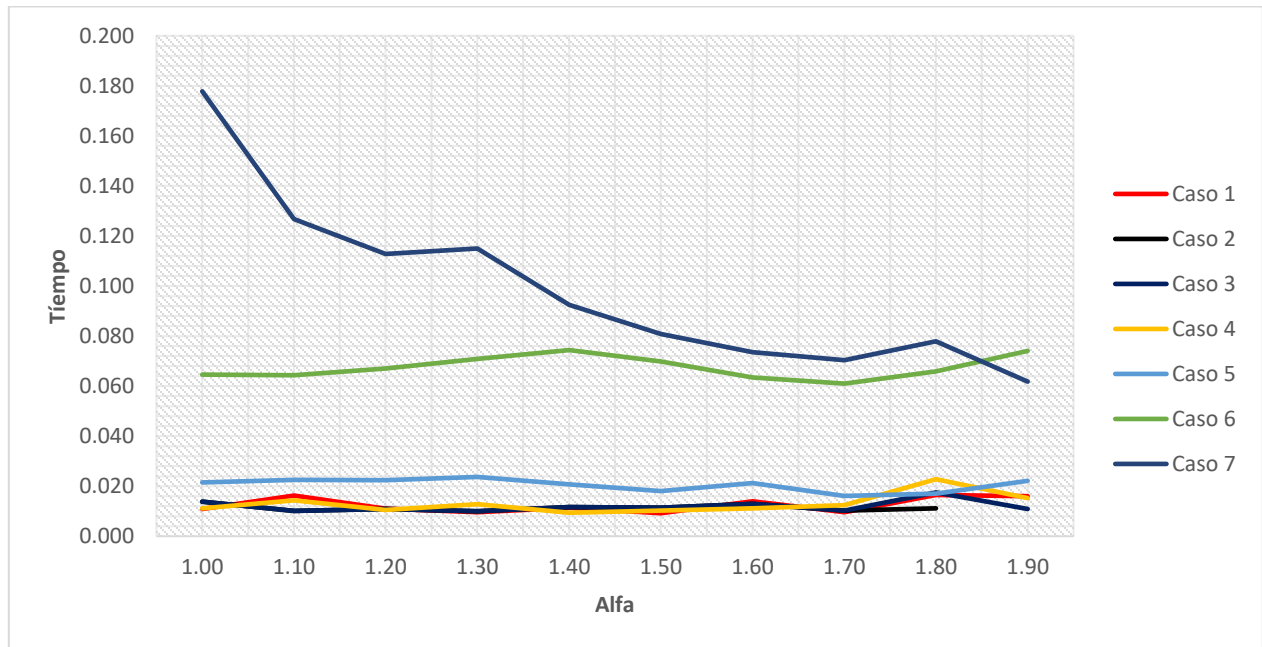


*Figura 4.7 Grafica de iteraciones convergentes v factor de aceleración*



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

Por lo tanto, el programa ofrece un alto grado de flexibilidad al permitir determinar un factor de aceleramiento y es capaz de generar un proceso óptimo considerando un valor mínimo. En la gráfica de la figura 4.8 se analiza el tiempo de convergencia de los SEP que se simularon. De estos datos se puede identificar que entre más grande es el SEP, mayor será el tiempo de realización del cálculo.



*Figura 4.8 Grafica de tiempo de convergencia v factor de aceleración*

Las tablas 4.4, 4.9, 4.14, 4.18, 4.23, 4.28 y 4.33 poseen los valores que permiten saber el grado de exactitud de los resultados entre V9 y MATPOWER cambiando el valor de un bus cualquiera para generar variantes del sistema. El error entre los voltajes convergentes que se obtienen de ambos programas es más pequeño al disminuir el grado de precisión  $\epsilon$ . Por lo que un valor de tolerancia de  $1 \times 10^{-9}$  puede generar mayor precisión y mejor exactitud de los resultados.



## 5 Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

El programa V9 cumple el objetivo de este trabajo permitiendo calcular los valores más representativos de un SEP, es decir:

- a) Los voltajes convergentes.
- b) Las potencias generadas por los buses de voltaje de controlado.
- c) Las potencias generadas por los buses de compensación.
- d) Los flujos de potencia en las líneas del circuito.
- e) Las pérdidas totales en la red.

De igual forma el formato digital permite realizar los cálculos utilizando la metodología de Gauss-Seidel en el entorno de MATLAB R2019 considerando las bases teóricas para incluir los transformadores en las rutinas de desarrollo. Por otro lado, el programa puede detectar si un generador ha sobrepasado su valor nominal de potencia reactiva, recalculando el sistema las veces necesarias hasta que exista un balance en el circuito dentro de los límites establecidos por el código de red y finalmente es prudente mencionar que los argumentos de entrada y salida están bajo los formatos estándares de IEEE. Con los argumentos antes mencionados se concluye que este proyecto ha sido altamente eficiente para solucionar los SEP, manteniendo una estructura organizada, flexible y precisa ante cualquier situación de un circuito eléctrico.

### 5.2 Áreas de oportunidad para trabajos futuros

Durante el proceso de diseño del programa V9 se han podido considerar mejoras que brindan una mejor oportunidad de optimizar la organización de los procesos de cálculo. Por lo que es recomendable ante futuros estudios:

1. Almacenar los procesos de ajustes de datos en subrutinas independientes; siendo estas llamadas en lugar de ejecutar las instrucciones de ajuste de datos. Estos casos están presentes en la subrutina Rev.m
2. Es preferible ampliar el número de registros para recalculando el sistema hasta que se cumplan los resultados dentro de los límites establecidos. Por lo que se puede adaptar una sentencia *while* en lugar de la sentencia *for* en el script Rest.m

Por otra parte, es necesario considerar las bases teóricas que se presentan cuando los buses de compensación exceden el límite de potencia reactiva. Debido a que se ha decidido que esta versión solo especifique la anomalía sin considerar aplicar una acción al instante.



## Bibliografía

- Alcubierre, M. (2005). *Introducción a FORTRAN*. México: Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.
- Canales, H. E. (2017). *Estudio de Flujos de Potencia con PSS/E*. Puebla.
- Castelán, R. (2018). *Estudio de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia utilizando el programa PSS/e*. Puebla, México.
- Cortés Rosas, J. J., González Cárdenas, M. E., Pinilla Morán, V. D., Salazar Moreno, A., & Tovar Pérez, V. H. (2019). Métodos iterativos de Jacobi y Gauss-Seidel. *Plataforma educativa para Análisis Numérico*, 2, 5.
- Crow, M. L. (2010). *Computational methods for electric power systems*. Boca Raton: CRC Press5.
- Dembart, B., Erisman, A., Cate, E., Epton, M., & Dommel, H. (1997). *Power System Dynamic Analysis*. Washington: Energy Technology Applications Division.
- Díaz, L., Mestas, R., & Hanco, R. (2015). *Metodos numericos con MATLAB*.
- El-Abiad, W. S. (1968). *Computer Methods in Power Systems*. New York: McGraw-Hill.
- Elgerd, O. I. (1971). *Electric energy systems theory: an introduction*. New York : McGraw-Hill.
- Elgerd, O. I. (1982). *Electric Energy Systems Theory*. New York : McGraw-Hill.
- Energía, C. R. (2019). *Código de Red*. México .
- Grainger, J., & Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. México: McGraw-Hill.
- J. Duncan Glover, M. S. (2008). *Power System Analysis and Design*. Standford: USA.
- López, L. (2003). *Programación estructurada, un enfoque algorítmico*. México: Alfaomega.
- Mathieu, M. J. (2014). *Introducción a la programación*. México: Grupo Editorial Patria, S.A. de C.V.
- Moore, H. (2007). *Matlab para ingenieros*. Pearson.
- Ogata, K. (1999). *Problemas de ingeniería de control usando MATLAB*. Madrid : PRENTICE HALL IBERIA.
- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Solís, M. L. (2006). *MÉTODOS ITERATIVOS EFICIENTES PARA PROBLEMAS DE CONVECCIÓN-DIFUSIÓN TRANSITORIOS*. Barcelona: Departament de Matemàtica Aplicada III.
- Stevenson, W. D. (1995). *Elements of power system analysis*. New York: McGraw-Hill.



Thomas, R., Sánchez, M., & Gan, D. (8 de Octubre de 2020). *MATPOWER*. Obtenido de MATPOWER: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.

W. Kernighan, B., & M. Ritchie, D. (1978). *The C programming Language*. New Jersey: Prentice Hall.

## Anexos A

### A1 Funciones básicas de operación en Matlab.

No.	Funciones	Descripción
1	$\text{sqrt}(x)$	Calcula la raíz cuadrada de un número o de una variable asignada.
2	$\text{exp}(x)$	Función que permite obtener el exponencial representado de ( $e^x$ )
3	$\text{abs}(x)$	Función que permite obtener el valor absoluto de un número o una variable asignada.
4	$\text{log}(x)$	Calcula el logaritmo natural de un número o variable asignada.
5	$\text{log2}(x)$	Calcula el logaritmo en base 2.
6	$\text{log10}(x)$	Calcula el logaritmo de base 10 de un número o variable asignada.
7	$\text{factorial}(x)$	Función que permite calcular el número factorial de una variable asignada ( $x$ ).
8	$\text{gcd}(m,n)$	Calcula el máximo común divisor.
9	$\text{lcm}(m,n)$	Calcula el mínimo común múltiplo.
10	$\text{rem}(x,y)$	Determina el resto de la división entera.
11	$\text{nthroot}(x,n)$	Calcula la raíz n-ésima de $x$ .



### A2 Funciones básicas de trigonometría para Matlab.

No.	Funciones	Descripción
1	$\sin(x)$	Función que permite obtener el seno de un número o variable asignada en radianes.
2	$\cos(x)$	Función que permite obtener el coseno de un número o variable asignada en radianes.
3	$\tan(x)$	Función que permite obtener la tangente de un número o variable asignada en radianes.
4	$\csc(x)$	Función que permite obtener la cosecante de un número o variable asignada en radianes.
5	$\sec(x)$	Función que permite obtener la secante de un número o variable asignada en radianes.
6	$\cot(x)$	Función que permite obtener la cotangente de un número o variable asignada en radianes.
7	$\text{deg2rad}$	Función que convierte los ángulos de grados a radianes
8	$\text{rad2deg}$	Función que convierte los ángulos de radianes a grados.
10	$\dots d(x)$	Función trigonométrica con el ángulo expresado en grados
11	$\dots h(x)$	Función trigonométrica hiperbólica con el ángulo expresado en radianes
12	$\dots a(x)$	Inversa de la función trigonométrica con el resultado expresado en radianes
13	$a \dots d(x)$	Inversa de la función trigonométrica con el resultado expresado en grados
14	$a \dots h(x)$	Inversa de la función trigonométrica hiperbólica con el resultado expresado en radianes



### A3 Funciones básicas de formato para Matlab.

No.	Funciones	Descripción
1	<i>format short</i>	Cifras de punto fijo con 4 dígitos decimales.
2	<i>format long</i>	Cifras de punto fijo con 14 dígitos decimales.
3	<i>format short e</i>	Notación científica con 4 dígitos decimales.
4	<i>format long e</i>	Notación científica con 15 dígitos decimales.
5	<i>format short g</i>	Cifras con 5 primeros dígitos fijos o en punto flotante.
6	<i>format long g</i>	Cifras con 15 primeros dígitos fijos o en punto flotante.
7	<i>format short eng</i>	Notación científica con 4 dígitos después de la coma y un exponente de 3.
8	<i>format long eng</i>	Notación científica con 16 dígitos significantes y un exponente de 3.
9	<i>format back</i>	Formato con 2 decimales.
10	<i>format hex</i>	Formato hexadecimal
11	<i>format rat</i>	Aproximación racional
12	<i>format +</i>	Positivo, negativo o espacio en blanco.
13	<i>format compact</i>	Elimina las líneas vacías para permitir más líneas con información en la ventana
14	<i>format loose</i>	Añade líneas vacías



**A4 Funciones para expresar números complejos en Matlab.**

No.	Funciones	Descripción
1	<i>angle</i> (x)	Determina el ángulo (en radianes) del complejo x
2	<i>complex</i> (y, z)	genera el complejo $y + zi$
3	<i>conj</i> (x)	Determina el conjugado del número complejo x
4	<i>imag</i> (x)	Determina la parte imaginaria del número complejo x
5	<i>real</i> (x)	Determina la parte real del número complejo x
6	<i>sign</i> (x)	Esta función divide el complejo x por su magnitud y devuelve un número complejo con el mismo ángulo de fase, pero con magnitud 1.

**A5 Resolución de la Ecuación 3.36**

La obtención de la variable B de la ecuación 3.36 para representar el circuito  $\pi$  equivalente se muestra a continuación.

$$(E_p - aE_q) \frac{y_{pq}}{a^2} = (E_p - E_q) \frac{y_{pq}}{a} + E_p B$$

$$B = \frac{(E_p - aE_q) \frac{y_{pq}}{a^2} - (E_p - E_q) \frac{y_{pq}}{a}}{E_p}$$

$$B = \frac{\frac{(E_p - aE_q)y_{pq}}{a^2} - \frac{(E_p - E_q)y_{pq}}{a}}{E_p}$$

$$B = \frac{\frac{(E_p - aE_q)ay_{pq} - (E_p - E_q)a^2y_{pq}}{a^3}}{E_p}$$



$$B = \frac{\frac{(aE_p - a^2E_q)y_{pq} - (a^2E_p - a^2E_q)y_{pq}}{a^3}}{E_p}$$

$$B = \frac{\left(\frac{(aE_p - a^2E_q) - (a^2E_p - a^2E_q)}{a^3}\right)y_{pq}}{E_p}$$

$$B = \frac{\frac{(aE_p - a^2E_q - a^2E_p + a^2E_q)y_{pq}}{a^3}}{E_p}$$

$$B = \frac{\frac{(aE_p - a^2E_p(-a^2E_q + a^2E_q))y_{pq}}{a^3}}{E_p}$$

$$B = \frac{\frac{(a - a^2)E_p y_{pq}}{a^3}}{E_p} = \frac{(a - a^2)y_{pq}}{a^3} = \frac{(y_{pq}a - y_{pq}a^2)}{a^3} = \frac{y_{pq}}{a^2} - \frac{y_{pq}}{a}$$

$$B = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{a} - 1 \right) y_{pq}$$

Ec. 3.42



## Anexos B

### B1 Caso 1 Sistema de prueba de 4 Barras con Transformador

```

-----
Historial del proceso
-----
Registro 1.
          PROCESO REALIZADO CON EXITO
-----
          Tabla de resultados del sistema
-----
          Información de barras
-----
                                Generación          Carga
-----
línea Voltaje   Angulo      MW      Mvar      MW      Mvar
-----
1      1.000000   0.000000   186.97   122.30   50.00   30.99
2      0.982421  -0.975817    0.00     0.00   170.00  105.35
3      0.966078  -1.847131    0.00     0.00    0.00    0.00
4      1.020000   1.523581   318.00   186.08    80.00   49.58
5      0.976988  -4.186121    0.00     0.00   200.00  123.94
-----
Potencia total en las barras:  504.97   308.37   500.00   309.86
-----
          Líneas de flujo
-----
desde  hacia   PMW      QMVAR      desde  hacia   PMW      QMVAR
-----
1      2      +38.68   +22.30      2      1      -38.45   -31.24
1      3      +98.28   +69.01      3      1      -97.17   -70.93
2      4     -131.55  -74.11      4      2     +133.26  +74.92
3      4     -102.83  -64.61      4      3     +104.74  +61.58
3      5     +200.00  +135.54     5      3     -200.00  -123.94
-----
total de flujo en el sistema:    PMW: +4.97      QMVAR: -1.49
-----
Iteración de convergencia:36   Tiempo de ejecución del programa:0.0229
-----

```

```

-----
          Datos del transformador
-----
          Localización          Datos de Entrada
-----
Desde  Hasta          tap
-----
1      2          (No hay transformador)
1      3          (No hay transformador)
2      4          (No hay transformador)
3      4          (No hay transformador)
3      5          1.0384
-----

```



**B2 Formato de salida del caso 2**

```

-----
                        Historial del proceso
-----
Registro 1.
                        PROCESO REALIZADO CON EXITO
-----
                        Tabla de resultados del sistema
-----
                        Información de barras
-----
                                Generación                Carga
-----
línea Voltaje   Angulo      MW      Mvar      MW      Mvar
  1    1.000000  0.000000  186.81  114.50   50.00   30.99
  2    0.982421 -0.976122    0.00    0.00   170.00  105.35
  3    0.969005 -1.872177    0.00    0.00   200.00  123.94
  4    1.020000  1.523055  318.00  181.43   80.00   49.58
-----
Potencia total en las barras:  504.81    295.93    500.00    309.86
-----
                        Líneas de flujo
-----
desde  hacia   PMW    QMVAR   desde  hacia   PMW    QMVAR
  1     2     +38.69 +22.30   2     1     -38.46 -31.24
  1     3     +98.12 +61.21   3     1     -97.09 -63.57
  2     4    -131.54 -74.11   4     2    +133.25 +74.92
  3     4    -102.91 -60.37   4     3    +104.75 +56.93
-----
total de flujo en el sistema:    PMW: +4.81    QMVAR: -13.93
-----
Iteración de convergencia:45    Tiempo de ejecución del programa:0.0101
-----

```

```

-----
                        Datos del transformador
-----
Localización      Datos de Entrada
-----
Desde  Hasta      tap
  1     2      (No hay transformador)
  1     3      (No hay transformador)
  2     4      (No hay transformador)
  3     4      (No hay transformador)
-----

```



**B3 Formato de salida del caso 3**

```

-----
                        Historial del proceso
-----
Registro 1.
                        PROCESO REALIZADO CON EXITO
-----
                        Tabla de resultados del sistema
-----
                        Información de barras
-----
                                Generación                Carga
-----
línea  Voltaje    Angulo      MW      Mvar      MW      Mvar
-----
1      1.060000    0.000000    129.59  -7.42     0.00     0.00
2      1.047438    -2.806350    40.00   30.00    20.00    10.00
3      1.024175    -4.996969     0.00   0.00    45.00    15.00
4      1.023566    -5.329137     0.00   0.00    40.00     5.00
5      1.017937    -6.150264     0.00   0.00    60.00    10.00
-----
Potencia total en las barras:  169.59      22.58      165.00      40.00
-----
                        Líneas de flujo
-----
desde  hacia    PMW      QMVAR    desde  hacia    PMW      QMVAR
-----
1      2      +88.86   -8.58    2      1      -87.45   +6.15
1      3      +40.72   +1.16    3      1      -39.53   -3.01
2      3      +24.69   +3.55    3      2      -24.34   -6.78
2      4      +27.94   +2.96    4      2      -27.49   -5.93
2      5      +54.82   +7.34    5      2      -53.70   -7.17
-----
total de flujo en el sistema:    PMW: +4.59      QMVAR: -17.42
-----
Iteración de convergencia:43    Tiempo de ejecución del programa:0.0104
-----

```

```

-----
                        Datos del transformador
-----
Localización          Datos de Entrada
-----
Desde  Hasta          tap
-----
1      2      (No hay transformador)
1      3      (No hay transformador)
2      3      (No hay transformador)
2      4      (No hay transformador)
2      5      (No hay transformador)
-----

```



**B4 Formato de salida del caso 4**

```

-----
                        Historial del proceso
-----
Registro 1.
                        PROCESO REALIZADO CON EXITO
-----
                        Tabla de resultados del sistema
-----
                        Información de barras
-----
                                Generación                Carga
-----
línea  Voltaje    Angulo      MW      Mvar      MW      Mvar
  1     1.069956  -0.300988  40.00   30.00    20.00   10.00
  2     1.060000   0.000000 127.92  -13.17    0.00    0.00
  3     1.036985  -2.924931  0.00    0.00    45.00   15.00
  4     1.036370  -3.090531  0.00    0.00    40.00    5.00
  5     1.030836  -3.470939  0.00    0.00    60.00   10.00
-----
Potencia total en las barras: 167.92    16.83    165.00    40.00
-----
                        Líneas de flujo
-----
desde  hacia    PMW      QMVAR    desde  hacia    PMW      QMVAR
  1     2      -3.60    +15.55    2     1      +3.67    -22.16
  1     3     +23.60    +4.45    3     1     -23.18    -8.72
  2     3     +32.35    +1.32    3     2     -31.78    -4.02
  2     4     +34.05    +1.20    4     2     -33.43    -3.72
  2     5     +57.84    +6.46    5     2     -56.63    -6.10
-----
total de flujo en el sistema:    PMW: +2.92    QMVAR: -23.17
-----
Iteración de convergencia:44    Tiempo de ejecución del programa:0.0332
-----

```

```

-----
                        Datos del transformador
-----
Localización          Datos de Entrada
-----
Desde  Hasta          tap
  1     2          (No hay transformador)
  1     3          (No hay transformador)
  2     3          (No hay transformador)
  2     4          (No hay transformador)
  2     5          (No hay transformador)

```



**B5 Formato de salida del caso 5**

```

-----
                        Historial del proceso
-----
Registro 1.
                        PROCESO REALIZADO CON EXITO
-----
                        Tabla de resultados del sistema
-----
                        Información de barras
-----
                                Generación                Carga
-----
línea Voltaje      Angulo      MW      Mvar      MW      Mvar
1      1.000000    0.000000    71.95   24.07     0.00    0.00
2      1.000000    9.668741   163.00  14.46     0.00    0.00
3      1.000000    4.771073    85.00  -3.65     0.00    0.00
4      0.987007    -2.406644     0.00    0.00     0.00    0.00
5      0.975472    -4.017264     0.00    0.00    90.00   30.00
6      1.003375    1.925601     0.00    0.00     0.00    0.00
7      0.985645    0.621544     0.00    0.00   100.00  35.00
8      0.996185    3.799120     0.00    0.00     0.00    0.00
9      0.957621   -4.349934     0.00    0.00   125.00  50.00
-----
Potencia total en las barras:  319.95      34.88      315.00      115.00
-----
                        Líneas de flujo
-----
desde  hacia  PMW      QMVAR      desde  hacia  PMW      QMVAR
1      4      +71.95   +24.07      4      1      -71.95   -20.75
4      5      +30.73   -0.59      5      4      -30.55   -13.69
5      6      -59.45   -16.31      6      5      +60.89   -12.43
3      6      +85.00   -3.65      6      3      -85.00   +7.89
6      7      +24.11   +4.54      7      6      -24.01   -24.40
7      8      -75.99   -10.60      8      7      +76.50   +0.26
8      2      -163.00  +2.28      2      8      +163.00  +14.46
8      9      +86.50   -2.53      9      8      -84.04   -14.28
9      4      -40.96   -35.72      4      9      +41.23   +21.34
-----
total de flujo en el sistema:      PMW: +4.95      QMVAR: -80.12
-----
Iteración de convergencia:86      Tiempo de ejecución del programa:0.0271
-----

```

```

-----
                        Datos del transformador
-----
                        Localización      Datos de Entrada
-----
Desde  Hasta      tap
1      4      (No hay transformador)
4      5      (No hay transformador)
5      6      (No hay transformador)
3      6      (No hay transformador)
6      7      (No hay transformador)
7      8      (No hay transformador)
8      2      (No hay transformador)
8      9      (No hay transformador)
9      4      (No hay transformador)
-----

```



**B6 Formato de salida del caso 6**

-----  
 Historial del proceso  
 -----

Registro 1.

El generador de la barra 8 ha llegado a su límite de potencia  
 Se cambio el bus de voltaje controlado por un bus de carga

Registro 2.

El generador de la barra 2 ha llegado a su límite de potencia  
 Se cambio el bus de voltaje controlado por un bus de carga

Registro 3.

PROCESO REALIZADO CON EXITO

-----  
 Tabla de resultados del sistema  
 -----

Información de barras

línea	Voltaje	Angulo	Generación		Carga	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.060000	0.000000	232.62	-14.33	0.00	0.00
2	1.044890	-4.991514	40.00	50.00	21.70	12.70
3	1.010000	-12.768891	0.00	29.36	94.20	19.00
4	1.010624	-10.211307	0.00	0.00	47.80	3.90
5	1.014993	-8.741538	0.00	0.00	7.60	1.60
6	1.070000	-14.428432	0.00	23.62	11.20	7.50
7	1.046973	-13.217193	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.085905	-13.217193	0.00	24.00	0.00	0.00
9	1.031014	-14.801397	0.00	0.00	29.50	16.60
10	1.030325	-15.017412	0.00	0.00	9.00	5.80
11	1.046341	-14.839758	0.00	0.00	3.50	1.80
12	1.053296	-15.278407	0.00	0.00	6.10	1.60
13	1.046710	-15.312816	0.00	0.00	13.50	5.80
14	1.019586	-16.052544	0.00	0.00	14.90	5.00
Potencia total en las barras:			272.62	112.65	259.00	81.30

-----  
 Líneas de flujo  
 -----

desde	hacia	PMW	QMVAR	desde	hacia	PMW	QMVAR
1	2	+157.18	-20.47	2	1	-152.86	+27.79
1	5	+75.42	+5.81	5	1	-72.65	+0.33
2	3	+73.51	+3.53	3	2	-71.17	+1.70
2	4	+55.94	+2.29	4	2	-54.26	-0.81
2	5	+41.72	+3.60	5	2	-40.79	-4.45
3	4	-23.03	+8.31	4	3	+23.43	-8.60
4	5	-59.65	+9.60	5	4	+60.13	-8.09
4	7	+27.19	-6.78	7	4	-27.19	+8.31
4	9	+15.49	+2.69	9	4	-15.49	-1.42
5	6	+45.71	+10.62	6	5	-45.71	-5.94
6	11	+8.19	+8.53	11	6	-8.08	-8.29
6	12	+8.04	+3.13	12	6	-7.96	-2.96
6	13	+18.28	+9.79	13	6	-18.03	-9.30
7	8	-0.00	-24.48	8	7	+0.00	+25.44

-----  
 total de flujo en el sistema:      PMW: +13.62      QMVAR: 31.35  
 -----

Iteración de convergencia:91      Tiempo de ejecución del programa:0.0376  
 -----



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

## Datos del transformador

Localización		Datos de Entrada
Desde	Hasta	tap
1	2	(No hay transformador)
1	5	(No hay transformador)
2	3	(No hay transformador)
2	4	(No hay transformador)
2	5	(No hay transformador)
3	4	(No hay transformador)
4	5	(No hay transformador)
4	7	1.0224
4	9	1.0319
5	6	1.0729
6	11	(No hay transformador)
6	12	(No hay transformador)
6	13	(No hay transformador)
7	8	(No hay transformador)

## B7 Formato de salida del caso 7

### Historial del proceso

Registro 1.

PROCESO REALIZADO CON EXITO

### Tabla de resultados del sistema

#### Información de barras

línea	Voltaje	Angulo	Generación		Carga	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.000000	0.000000	25.98	-0.99	0.00	0.00
2	1.000000	-0.415500	60.97	32.14	21.70	12.70
3	0.983115	-1.521892	0.00	0.00	2.40	1.20
4	0.980065	-1.794517	0.00	0.00	7.60	1.60
5	0.982197	-1.860296	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.973141	-2.266671	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.967245	-2.650481	0.00	0.00	22.80	10.90
8	0.960581	-2.725537	0.00	0.00	30.00	30.00
9	0.980486	-2.996738	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.984395	-3.374775	0.00	0.00	5.80	2.00
11	0.980486	-2.996739	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.985460	-1.536666	0.00	0.00	11.20	7.50
13	1.000000	1.476434	37.00	11.36	0.00	0.00
14	0.976670	-2.307810	0.00	0.00	6.20	1.60
15	0.980223	-2.311649	0.00	0.00	8.20	2.50
16	0.977387	-2.644281	0.00	0.00	3.50	1.80
17	0.976857	-3.392170	0.00	0.00	9.00	5.80
18	0.968433	-3.478219	0.00	0.00	3.20	0.90
19	0.965279	-3.958046	0.00	0.00	9.50	3.40
20	0.969158	-3.870866	0.00	0.00	2.20	0.70
21	0.993381	-3.488436	0.00	0.00	17.50	11.20
22	1.000000	-3.392837	21.59	39.61	0.00	0.00
23	1.000000	-1.589110	19.20	7.97	3.20	1.60
24	0.988530	-2.630259	0.00	0.00	8.70	6.70



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

25	0.990201	-1.689416	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.972180	-2.138786	0.00	0.00	3.50	2.30
27	1.000000	-0.828240	26.91	10.56	0.00	0.00
28	0.974677	-2.265735	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.979597	-2.128299	0.00	0.00	2.40	0.90
30	0.967883	-3.041324	0.00	0.00	10.60	1.90

Potencia total en las barras: 191.65 100.64 189.20 107.20

## Líneas de flujo

desde	hacia	PMW	QMVAR	desde	hacia	PMW	QMVAR
1	2	+10.89	-5.09	2	1	-10.86	+2.17
1	3	+15.08	+4.10	3	1	-14.96	-5.58
2	4	+16.07	+5.22	4	2	-15.89	-6.68
2	5	+13.79	+4.61	5	2	-13.67	-6.13
2	6	+20.28	+7.44	6	2	-19.99	-8.52
3	4	+12.56	+4.38	4	3	-12.54	-4.31
4	6	+22.50	+11.42	6	4	-22.44	-11.15
4	12	-1.67	-2.03	12	4	+1.67	+2.05
5	7	+13.67	+6.13	7	5	-13.55	-6.80
6	7	+9.28	+3.25	7	6	-9.25	-4.10
6	8	+24.82	+24.43	8	6	-24.69	-23.91
6	9	+5.79	-3.37	9	6	-5.79	+3.47
6	10	+3.31	-1.92	10	6	-3.31	+2.01
6	28	-0.77	-2.71	28	6	+0.77	+1.76
8	28	-5.31	-6.09	28	8	+5.34	+4.33
9	10	+5.79	-3.47	10	9	-5.79	+3.52
9	11	+0.00	+0.00	11	9	-0.00	-0.00
10	17	+3.37	+8.01	17	10	-3.35	-7.95
10	20	+5.92	+4.62	20	10	-5.86	-4.50
10	21	-2.23	-11.68	21	10	+2.28	+11.78
10	22	-3.75	-8.49	22	10	+3.82	+8.62
12	13	-37.00	-9.26	13	12	+37.00	+11.36
12	14	+5.39	+0.88	14	12	-5.35	-0.80
12	15	+9.48	-1.07	15	12	-9.41	+1.19
12	16	+9.26	-0.10	16	12	-9.18	+0.28
14	15	-0.85	-0.80	15	14	+0.85	+0.80
15	18	+9.16	+0.76	18	15	-9.07	-0.57
15	23	-8.81	-5.25	23	15	+8.92	+5.47
16	17	+5.68	-2.08	17	16	-5.65	+2.15
18	19	+5.87	-0.33	19	18	-5.85	+0.38

total de flujo en el sistema: PMW: +2.45 QMVAR: -6.56

Iteración de convergencia:291 Tiempo de ejecución del programa:0.7869

## Datos del transformador

Localización		Datos de Entrada
Desde	Hasta	tap
1	2	(No hay transformador)
1	3	(No hay transformador)
2	4	(No hay transformador)
2	5	(No hay transformador)
2	6	(No hay transformador)
3	4	(No hay transformador)
4	6	(No hay transformador)
4	12	(No hay transformador)
5	7	(No hay transformador)
6	7	(No hay transformador)



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

6	8	(No hay transformador)
6	9	(No hay transformador)
6	10	(No hay transformador)
6	28	(No hay transformador)
8	28	(No hay transformador)
9	10	(No hay transformador)
9	11	(No hay transformador)
10	17	(No hay transformador)
10	20	(No hay transformador)
10	21	(No hay transformador)
10	22	(No hay transformador)
12	13	(No hay transformador)
12	14	(No hay transformador)
12	15	(No hay transformador)
12	16	(No hay transformador)
14	15	(No hay transformador)
15	18	(No hay transformador)
15	23	(No hay transformador)
16	17	(No hay transformador)
18	19	(No hay transformador)

### B8 Tablas de solución del caso 5

#### B8 - 1 Resultados del caso 5 con variación del factor de aceleramiento

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6				
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5
5	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167941i	0.996536 + 0.083163i	0.986137 - 0.041449i	0.973076 - 0.068345i
	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167942i	0.996536 + 0.083164i	0.986137 - 0.041449i	0.973076 - 0.068344i
	1.000000 + 0.000000i	0.985797 + 0.167944i	0.996536 + 0.083166i	0.986137 - 0.041448i	0.973076 - 0.068343i
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167945i	0.996536 + 0.083167i	0.986137 - 0.041448i	0.973076 - 0.068343i
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167946i	0.996535 + 0.083169i	0.986136 - 0.041448i	0.973075 - 0.068342i
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167947i	0.996535 + 0.083170i	0.986136 - 0.041447i	0.973075 - 0.068341i
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167948i	0.996535 + 0.083170i	0.986136 - 0.041447i	0.973075 - 0.068341i
	1.000000 + 0.000000i	0.985796 + 0.167948i	0.996535 + 0.083171i	0.986136 - 0.041447i	0.973075 - 0.068340i
	1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083174i	0.986136 - 0.041446i	0.973076 - 0.068339i
1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083175i	0.986136 - 0.041446i	0.973075 - 0.068339i	
1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167952i	0.996535 + 0.083175i	0.986135 - 0.041445i	0.973074 - 0.068339i	
Matpower	1.000000 + 0.000000i	0.985795 + 0.167951i	0.996535 + 0.083174i	0.986136 - 0.041446i	0.973075 - 0.068339i

Versión 9, Epsilon = 1E-6							
voltaje 6	voltaje 7	voltaje 8	voltaje 9	Alfa	Iteraciones	Tiempo	
1.002809 + 0.033705i	0.985587 + 0.010681i	0.993997 + 0.065996i	0.954863 - 0.072639i	1.0	100	0.022	
1.002809 + 0.033706i	0.985587 + 0.010683i	0.993997 + 0.065997i	0.954863 - 0.072638i	1.1	88	0.023	
1.002809 + 0.033708i	0.985587 + 0.010685i	0.993997 + 0.065999i	0.954863 - 0.072637i	1.2	79	0.022	
1.002809 + 0.033709i	0.985587 + 0.010686i	0.993997 + 0.066000i	0.954863 - 0.072637i	1.3	70	0.024	
1.002809 + 0.033710i	0.985587 + 0.010687i	0.993997 + 0.066001i	0.954863 - 0.072636i	1.4	63	0.021	
1.002809 + 0.033711i	0.985587 + 0.010688i	0.993996 + 0.066002i	0.954863 - 0.072635i	1.5	56	0.018	
1.002809 + 0.033712i	0.985587 + 0.010689i	0.993996 + 0.066003i	0.954863 - 0.072635i	1.6	50	0.021	
1.002809 + 0.033712i	0.985587 + 0.010689i	0.993996 + 0.066003i	0.954863 - 0.072635i	1.7	44	0.016	
1.002808 + 0.033715i	0.985586 + 0.010692i	0.993996 + 0.066005i	0.954863 - 0.072634i	1.8	46	0.017	
1.002809 + 0.033715i	0.985588 + 0.010692i	0.993996 + 0.066006i	0.954862 - 0.072634i	1.9	78	0.022	
1.002809 + 0.033715i	0.985587 + 0.010692i	0.993997 + 0.066006i	0.954863 - 0.072634i	2.0	1734	0.096	
1.002809 + 0.033715i	0.985587 + 0.010692i	0.993996 + 0.066005i	0.954863 - 0.072634i	SN	153	0.05	



**B8 - 2 Resultados del caso 5 con variación de la tolerancia**

Bus	Bus 7 = 100					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	9.668741	1.000000	9.668741	0.000000	0.000000
3	1.000000	4.771073	1.000000	4.771073	0.000000	0.000000
4	0.987007	-2.406644	0.987007	-2.406644	0.000000	0.000000
5	0.975472	-4.017264	0.975472	-4.017264	0.000000	0.000000
6	1.003375	1.925601	1.003375	1.925602	0.000000	0.000000
7	0.985645	0.621544	0.985645	0.621545	0.000000	0.000000
8	0.996185	3.799120	0.996185	3.799120	0.000000	0.000000
9	0.957621	-4.349934	0.957621	-4.349934	0.000000	0.000000
Bus	Bus 7 = 200					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-1.586566	1.000000	-1.586567	0.000000	0.000000
3	1.000000	-6.012148	1.000000	-6.012149	0.000000	0.000000
4	0.988673	-5.740542	0.988673	-5.740542	0.000000	0.000000
5	0.976256	-9.978577	0.976256	-9.978577	0.000000	0.000000
6	0.997897	-8.873254	0.997897	-8.873254	0.000000	0.000000
7	0.971744	-13.007454	0.971744	-13.007455	0.000000	0.000000
8	0.990409	-7.490540	0.990409	-7.490540	0.000000	0.000000
9	0.960584	-10.403880	0.960584	-10.403880	0.000000	0.000000
Bus	Bus 7 = 400					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-13.855613	1.000000	-13.855613	0.000000	0.000000
3	1.000000	-17.876162	1.000000	-17.876162	0.000000	0.000000
4	0.977500	-9.443660	0.977500	-9.443660	0.000000	0.000000
5	0.960401	-16.649200	0.960401	-16.649200	0.000000	0.000000
6	0.983237	-20.779963	0.983237	-20.779963	0.000000	0.000000
7	0.944759	-28.023130	0.944759	-28.023130	0.000000	0.000000
8	0.974244	-19.857903	0.974244	-19.857904	0.000000	0.000000
9	0.945873	-17.190530	0.945873	-17.190530	0.000000	0.000000



**B8 - 3 Resultados del caso considerando límites de potencia**

S/Límites de potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	9.668741	1.000000	9.668741	0.000000	0.000000
1.000000	4.771073	1.000000	4.771073	0.000000	0.000000
0.987007	-2.406644	0.987007	-2.406644	0.000000	0.000000
0.975472	-4.017264	0.975472	-4.017264	0.000000	0.000000
1.003375	1.925602	1.003375	1.925601	0.000000	0.000000
0.985645	0.621545	0.985645	0.621544	0.000000	0.000000
0.996185	3.799120	0.996185	3.799120	0.000000	0.000000
0.957621	-4.349934	0.957621	-4.349934	0.000000	0.000000
C/Límite Superior de Potencia (Bus 7, Qd=35 a 125)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.989571	10.586214	0.989571	10.586214	0.000000	0.000000
1.000000	5.125093	1.000000	5.125093	0.000000	0.000000
0.975410	-2.474700	0.975410	-2.474700	0.000000	0.000000
0.957477	-4.098252	0.957477	-4.098252	0.000000	0.000000
0.976425	2.201016	0.976425	2.201016	0.000000	0.000000
0.907738	1.090036	0.907738	1.090036	0.000000	0.000000
0.957228	4.412189	0.957228	4.412189	0.000000	0.000000
0.934802	-4.443784	0.934802	-4.443784	0.000000	0.000000
C/Límites Inferior de Potencia (Bus 7, Qd=35 a -110)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.000000	8.633738	1.000000	8.633738	0.000000	0.000000
1.001870	4.153417	1.001870	4.153417	0.000000	0.000000
1.000585	-2.386391	1.000585	-2.386391	0.000000	0.000000
0.997750	-4.030076	0.997750	-4.030076	0.000000	0.000000
1.038155	1.408484	1.038155	1.408484	0.000000	0.000000
1.083572	-0.130612	1.083572	-0.130612	0.000000	0.000000
1.038623	3.004738	1.038623	3.004738	0.000000	0.000000
0.983119	-4.351231	0.983119	-4.351231	0.000000	0.000000

**B9 Tablas de solución del caso 6**

**B9 - 1 Resultados del caso 6 con variación del factor de aceleramiento**

caso	Versión 9, Epsilon = 1E-6				
	voltaje 1	voltaje 2	voltaje 3	voltaje 4	voltaje 5
6	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090934i	0.985038 - 0.223158i	0.995043 - 0.179329i	1.003494 - 0.154319i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090934i	0.985038 - 0.223159i	0.995043 - 0.179330i	1.003494 - 0.154320i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090935i	0.985038 - 0.223160i	0.995042 - 0.179331i	1.003494 - 0.154321i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090935i	0.985038 - 0.223160i	0.995042 - 0.179331i	1.003493 - 0.154322i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985038 - 0.223161i	0.995042 - 0.179332i	1.003493 - 0.154323i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985038 - 0.223162i	0.995042 - 0.179333i	1.003493 - 0.154323i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090936i	0.985037 - 0.223162i	0.995042 - 0.179333i	1.003493 - 0.154323i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090937i	0.985037 - 0.223163i	0.995041 - 0.179334i	1.003493 - 0.154324i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090938i	0.985037 - 0.223164i	0.995040 - 0.179336i	1.003492 - 0.154326i
	1.060000 + 0.000000i	1.041036 - 0.090938i	0.985037 - 0.223165i	0.995041 - 0.179336i	1.003492 - 0.154326i
	NC	NC	NC	NC	NC



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

Versión 9, Epsilon = 1E-6						
voltaje 6	voltaje 7	voltaje 8	voltaje 9	voltage 10		
1.036317 - 0.266358i	1.021123 - 0.239914i	1.061106 - 0.249308i	0.998096 - 0.263798i	0.996219 - 0.267269i		
1.036317 - 0.266359i	1.021122 - 0.239916i	1.061105 - 0.249310i	0.998095 - 0.263800i	0.996219 - 0.267271i		
1.036317 - 0.266361i	1.021122 - 0.239917i	1.061105 - 0.249312i	0.998095 - 0.263802i	0.996218 - 0.267273i		
1.036316 - 0.266362i	1.021121 - 0.239919i	1.061105 - 0.249313i	0.998094 - 0.263803i	0.996218 - 0.267274i		
1.036316 - 0.266363i	1.021121 - 0.239920i	1.061104 - 0.249314i	0.998094 - 0.263805i	0.996218 - 0.267276i		
1.036316 - 0.266364i	1.021121 - 0.239921i	1.061104 - 0.249315i	0.998094 - 0.263806i	0.996217 - 0.267277i		
1.036315 - 0.266365i	1.021120 - 0.239922i	1.061104 - 0.249316i	0.998094 - 0.263806i	0.996217 - 0.267278i		
1.036315 - 0.266366i	1.021120 - 0.239923i	1.061104 - 0.249318i	0.998093 - 0.263808i	0.996217 - 0.267279i		
1.036314 - 0.266369i	1.021119 - 0.239926i	1.061103 - 0.249320i	0.998092 - 0.263810i	0.996216 - 0.267281i		
1.036314 - 0.266370i	1.021119 - 0.239926i	1.061103 - 0.249321i	0.998093 - 0.263811i	0.996216 - 0.267282i		
NC	NC	NC	NC	NC		
1.036314 - 0.266369i	1.021119 - 0.239925i	1.061103 - 0.249320i	0.998093 - 0.263810i	0.996216 - 0.267281i		
Versión 9, Epsilon = 1E-6						
voltaje 11	voltaje 12	voltaje 13	voltaje 14	Alfa	Iteraciones	Tiempo
1.012025 - 0.268025i	1.016235 - 0.277332i	1.009799 - 0.276273i	0.980688 - 0.282093i	1.00	137	0.0646
1.012025 - 0.268027i	1.016235 - 0.277334i	1.009798 - 0.276275i	0.980687 - 0.282095i	1.10	119	0.0643
1.012024 - 0.268028i	1.016235 - 0.277336i	1.009798 - 0.276277i	0.980686 - 0.282097i	1.20	104	0.067
1.012024 - 0.268030i	1.016234 - 0.277337i	1.009797 - 0.276278i	0.980686 - 0.282098i	1.30	91	0.0709
1.012024 - 0.268031i	1.016234 - 0.277339i	1.009797 - 0.276280i	0.980686 - 0.282100i	1.40	80	0.0744
1.012023 - 0.268032i	1.016234 - 0.277340i	1.009797 - 0.276281i	0.980685 - 0.282101i	1.50	70	0.0698
1.012023 - 0.268033i	1.016233 - 0.277341i	1.009796 - 0.276281i	0.980685 - 0.282102i	1.60	61	0.0634
1.012023 - 0.268034i	1.016233 - 0.277342i	1.009796 - 0.276283i	0.980685 - 0.282103i	1.70	54	0.061
1.012022 - 0.268037i	1.016231 - 0.277344i	1.009795 - 0.276286i	0.980684 - 0.282106i	1.80	56	0.06590
1.012022 - 0.268037i	1.016233 - 0.277346i	1.009795 - 0.276285i	0.980683 - 0.282105i	1.90	148	0.0741
NC	NC	NC	NC	2.00	NC	NC
1.012022 - 0.268037i	1.016232 - 0.277345i	1.009795 - 0.276285i	0.980684 - 0.282105i	SN	181	0.99



**B9 - 2 Resultados del caso 6 con variación de la tolerancia**

Bus	Bus 12 PD = 6.1 QD=1.6					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-4.992308	1.045000	-4.992308	0.000000	0.000000
3	1.010000	-12.765136	1.010000	-12.765136	0.000000	0.000000
4	1.011072	-10.216730	1.011072	-10.216730	0.000000	0.000000
5	1.015289	-8.742955	1.015289	-8.742955	0.000000	0.000000
6	1.070000	-14.415025	1.070000	-14.415025	0.000000	0.000000
7	1.048928	-13.222582	1.048928	-13.222582	0.000000	0.000000
8	1.090000	-13.222582	1.090000	-13.222582	0.000000	0.000000
9	1.032368	-14.805538	1.032368	-14.805538	0.000000	0.000000
10	1.031448	-15.018588	1.031448	-15.018588	0.000000	0.000000
11	1.046916	-14.834367	1.046916	-14.834367	0.000000	0.000000
12	1.053398	-15.265141	1.053398	-15.265141	0.000000	0.000000
13	1.046910	-15.301959	1.046910	-15.301959	0.000000	0.000000
14	1.020453	-16.048515	1.020453	-16.048516	0.000000	0.000000
Bus	Bus 12 PD = 10.1 QD=5.6					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-5.087516	1.045000	-5.087516	0.000000	0.000000
3	1.010000	-12.920637	1.010000	-12.920637	0.000000	0.000000
4	1.010469	-10.414481	1.010469	-10.414481	0.000000	0.000000
5	1.014564	-8.940527	1.014564	-8.940527	0.000000	0.000000
6	1.070000	-14.956702	1.070000	-14.956702	0.000000	0.000000
7	1.048672	-13.519790	1.048672	-13.519790	0.000000	0.000000
8	1.090000	-13.519790	1.090000	-13.519790	0.000000	0.000000
9	1.032220	-15.154345	1.032220	-15.154345	0.000000	0.000000
10	1.031360	-15.401757	1.031360	-15.401757	0.000000	0.000000
11	1.046907	-15.296052	1.046907	-15.296052	0.000000	0.000000
12	1.044287	-15.907348	1.044287	-15.907348	0.000000	0.000000
13	1.044484	-15.887020	1.044484	-15.887021	0.000000	0.000000
14	1.019299	-16.503376	1.019299	-16.503376	0.000000	0.000000
Bus	Bus 12 PD = 20 QD=10					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.045000	-5.327133	1.045000	-5.327133	0.000000	0.000000
3	1.010000	-13.311833	1.010000	-13.311833	0.000000	0.000000
4	1.008978	-10.912576	1.008978	-10.912577	0.000000	0.000000
5	1.012727	-9.437596	1.012727	-9.437596	0.000000	0.000000
6	1.070000	-16.319413	1.070000	-16.319413	0.000000	0.000000
7	1.048207	-14.267301	1.048207	-14.267301	0.000000	0.000000
8	1.090000	-14.267301	1.090000	-14.267301	0.000000	0.000000
9	1.032221	-16.030429	1.032221	-16.030429	0.000000	0.000000
10	1.031442	-16.364608	1.031442	-16.364609	0.000000	0.000000
11	1.047034	-16.457143	1.047034	-16.457143	0.000000	0.000000
12	1.028932	-17.781801	1.028932	-17.781801	0.000000	0.000000
13	1.040915	-17.396992	1.040915	-17.396992	0.000000	0.000000
14	1.017714	-17.660002	1.017714	-17.660003	0.000000	0.000000



**B9 - 3 Resultados del caso considerando límites de potencia**

S/ Límite de potencia					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.045000	-4.992308	1.045000	-4.992259	0.000000	-0.000048
1.010000	-12.765136	1.010000	-12.764940	0.000000	-0.000196
1.011072	-10.216730	1.011094	-10.216939	-0.000022	0.000209
1.015289	-8.742955	1.015310	-8.743218	-0.000020	0.000263
1.070000	-14.415025	1.070000	-14.415800	0.000000	0.000775
1.048928	-13.222582	1.048895	-13.222961	0.000032	0.000379
1.090000	-13.222582	1.090000	-13.222961	0.000000	0.000379
1.032368	-14.8055381	1.032338	-14.8059393	0.000030	0.000401
1.031448	-15.018588	1.031423	-15.019052	0.000025	0.000464
1.046916	-14.834367	1.046903	-14.834971	0.000013	0.000603
1.053398	-15.265141	1.053396	-15.265914	0.000002	0.000773
1.046910	-15.301959	1.046905	-15.302680	0.000004	0.000720
1.020453	-16.048516	1.020434	-16.049092	0.000019	0.000577
C/ Límite Superior de potencia (Solo activando la subrutina)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.044883	-4.991465	1.044890	-4.991514	-0.000006	0.000050
1.010000	-12.769113	1.010000	-12.768891	0.000000	-0.000221
1.010605	-10.211190	1.010624	-10.211307	-0.000019	0.000117
1.014974	-8.741307	1.014993	-8.741538	-0.000019	0.000232
1.070000	-14.427530	1.070000	-14.428432	0.000000	0.000902
1.047029	-13.216915	1.046973	-13.217193	0.000056	0.000278
1.085959	-13.216915	1.085905	-13.217193	0.000054	0.000278
1.031061	-14.8010805	1.031014	-14.8013971	0.000046	0.000317
1.030363	-15.016996	1.030325	-15.017412	0.000039	0.000416
1.046360	-14.839124	1.046341	-14.839758	0.000020	0.000634
1.053299	-15.277508	1.053296	-15.278407	0.000004	0.000899
1.046717	-15.311999	1.046710	-15.312816	0.000007	0.000817
1.019616	-16.051953	1.019586	-16.052544	0.000030	0.000591
C/ Límite Inferior de potencia (Bus 6, Qd=7.5 a -25.5)					
MATPOWER		V9		Diferencia	
1.060000	0.000000	1.060000	0.000000	0.000000	0.000000
1.045000	-4.988863	1.045000	-4.988870	0.000000	0.000007
1.010000	-12.752118	1.010000	-12.752129	0.000000	0.000011
1.012196	-10.222842	1.012195	-10.222849	0.000000	0.000007
1.016745	-8.764382	1.016743	-8.764380	0.000002	-0.000003
1.077208	-14.436345	1.077133	-14.437186	0.000075	0.000841
1.050159	-13.197542	1.050068	-13.198035	0.000091	0.000493
1.088980	-13.197542	1.088893	-13.198035	0.000088	0.000493
1.035026	-14.7618167	1.034937	-14.7625548	0.000089	0.000738
1.034934	-14.981889	1.034847	-14.982686	0.000088	0.000797
1.052242	-14.822596	1.052160	-14.823425	0.000082	0.000829
1.060360	-15.274504	1.060282	-15.275464	0.000077	0.000960
1.053572	-15.302427	1.053493	-15.303371	0.000079	0.000944
1.024937	-16.014948	1.024850	-16.015944	0.000086	0.000996



**B10 Tablas de solución del caso 7**

*B10 - 1 Datos de entrada de los buses del caso 7*

Bus	Tipo	Voltaje Inicial	Generación		Carga		Límites de Potencia	
			P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>
1	3	1	23.54	0	0	0	150	-20
2	2	1	60.97	0	21.7	12.7	60	-20
3	1	1	0	0	2.4	1.2	0	0
4	1	1	0	0	7.6	1.6	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	22.8	10.9	0	0
8	1	1	0	0	30	30	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	5.8	2	0	0
11	1	1	0	0	0	0	0	0
12	1	1	0	0	11.27	7.5	0	0
13	2	1	37	0	0	0	44.7	-15
14	1	1	0	0	6.2	1.6	0	0
15	1	1	0	0	8.2	2.5	0	0
16	1	1	0	0	3.5	1.8	0	0
17	1	1	0	0	9	5.8	0	0
18	1	1	0	0	3.2	0.9	0	0
19	1	1	0	0	9.5	3.4	0	0
20	1	1	0	0	2.2	0.7	0	0
21	1	1	0	0	17.5	11.2	0	0
22	2	1	21.59	0	0	0	62.5	-15
23	2	1	19.2	0	3.2	1.6	40	-10
24	1	1	0	0	8.7	6.7	0	0
25	1	1	0	0	0	0	0	0
26	1	1	0	0	3.5	2.3	0	0
27	2	1	26.91	0	0	0	48.7	-15
28	1	1	0	0	0	0	0	0
29	1	1	0	0	2.4	0.9	0	0
30	1	1	0	0	10.6	1.9	0	0

*B10 - 2 Datos de entrada de las líneas del caso 7*

Desde	Hacia	R	X	Y <sub>pq'</sub>	tap
1	2	0.02	0.06	0.015	0
1	3	0.05	0.19	0.01	0
2	4	0.06	0.17	0.01	0
2	5	0.05	0.2	0.01	0
2	6	0.06	0.18	0.01	0
3	4	0.01	0.04	0	0
4	6	0.01	0.04	0	0



# Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

4	12	0	0.26	0	0
5	7	0.05	0.12	0.005	0
6	7	0.03	0.08	0.005	0
6	8	0.01	0.04	0	0
6	9	0	0.21	0	0
6	10	0	0.56	0	0
6	28	0.02	0.06	0.005	0
8	28	0.06	0.2	0.01	0
9	10	0	0.11	0	0
9	11	0	0.21	0	0
10	17	0.03	0.08	0	0
10	20	0.09	0.21	0	0
10	21	0.03	0.07	0	0
10	22	0.07	0.15	0	0
12	13	0	0.14	0	0
12	14	0.12	0.26	0	0
12	15	0.07	0.13	0	0
12	16	0.09	0.2	0	0
14	15	0.22	0.2	0	0
15	18	0.11	0.22	0	0
15	23	0.1	0.2	0	0
16	17	0.08	0.19	0	0
18	19	0.06	0.13	0	0
19	20	0.03	0.07	0	0
21	22	0.01	0.02	0	0
22	24	0.12	0.18	0	0
23	24	0.13	0.27	0	0
24	25	0.19	0.33	0	0
25	26	0.25	0.38	0	0
25	27	0.11	0.21	0	0
27	29	0.22	0.42	0	0
27	30	0.32	0.6	0	0
28	27	0	0.4	0	0
29	30	0.24	0.45	0	0







**B10 - 4 Resultados del caso 7 con variación de la tolerancia**

Bus	Bus 26 = 2.3					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-09	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.415500	1.000000	-0.415491	0.000000	-0.000010
3	0.983115	-1.521892	0.983138	-1.522074	-0.000023	0.000182
4	0.980065	-1.794517	0.980093	-1.794728	-0.000028	0.000210
5	0.982197	-1.860296	0.982406	-1.863823	-0.000210	0.003527
6	0.973141	-2.266671	0.973184	-2.266957	-0.000043	0.000286
7	0.967245	-2.650481	0.967355	-2.651837	-0.000111	0.001355
8	0.960581	-2.725537	0.960624	-2.725769	-0.000043	0.000232
9	0.980486	-2.996738	0.980506	-2.996933	-0.000021	0.000195
10	0.984395	-3.374775	0.984404	-3.374936	-0.000009	0.000161
11	0.980486	-2.996739	0.980506	-2.996933	-0.000021	0.000195
12	0.985460	-1.536666	0.985468	-1.536912	-0.000008	0.000246
13	1.000000	1.476434	1.000000	1.476163	0.000000	0.000271
14	0.976670	-2.307810	0.976677	-2.308035	-0.000007	0.000225
15	0.980223	-2.311649	0.980229	-2.311835	-0.000006	0.000187
16	0.977387	-2.644281	0.977396	-2.644486	-0.000009	0.000205
17	0.976857	-3.392170	0.976865	-3.392339	-0.000009	0.000170
18	0.968433	-3.478219	0.968440	-3.478388	-0.000007	0.000169
19	0.965279	-3.958046	0.965287	-3.958205	-0.000008	0.000159
20	0.969158	-3.870866	0.969166	-3.871024	-0.000008	0.000158
21	0.993381	-3.488436	0.993383	-3.488393	-0.000002	-0.000043
22	1.000000	-3.392837	1.000000	-3.392729	0.000000	-0.000108
23	1.000000	-1.589110	1.000000	-1.589228	0.000000	0.000118
24	0.988530	-2.630259	0.988566	-2.631461	-0.000036	0.001202
25	0.990201	-1.689416	0.990215	-1.689989	-0.000014	0.000572
26	0.972180	-2.138786	0.972194	-2.139346	-0.000014	0.000560
27	1.000000	-0.828240	1.000000	-0.828439	0.000000	0.000199
28	0.974677	-2.265735	0.974715	-2.265929	-0.000038	0.000194
29	0.979597	-2.128299	0.979597	-2.128498	0.000000	0.000199
30	0.967883	-3.041324	0.967883	-3.041524	0.000000	0.000199
Bus	Bus 26 = 15					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-08	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.439670	1.000000	-0.439654	0.000000	-0.000016
3	0.983036	-1.560544	0.983059	-1.560715	-0.000023	0.000170
4	0.979975	-1.841474	0.980004	-1.841670	-0.000028	0.000196
5	0.982156	-1.899616	0.982365	-1.903132	-0.000210	0.003516
6	0.973034	-2.321949	0.973077	-2.322218	-0.000043	0.000269
7	0.967160	-2.699449	0.967271	-2.700789	-0.000111	0.001340
8	0.960468	-2.782590	0.960511	-2.782805	-0.000043	0.000215
9	0.980479	-3.084186	0.980500	-3.084354	-0.000021	0.000168
10	0.984447	-3.478815	0.984456	-3.478945	-0.000009	0.000130
11	0.980479	-3.084186	0.980500	-3.084354	-0.000021	0.000168
12	0.985509	-1.616978	0.985518	-1.617199	-0.000008	0.000220
13	1.000000	1.395971	1.000000	1.395726	0.000000	0.000245
14	0.976726	-2.393398	0.976733	-2.393595	-0.000007	0.000197
15	0.980250	-2.402571	0.980255	-2.402727	-0.000006	0.000157
16	0.977431	-2.734714	0.977439	-2.734891	-0.000009	0.000177
17	0.976904	-3.492227	0.976913	-3.492367	-0.000009	0.000140
18	0.968465	-3.573743	0.968472	-3.573882	-0.000007	0.000139
19	0.965317	-4.056288	0.965325	-4.056416	-0.000008	0.000128
20	0.969200	-3.970572	0.969208	-3.970700	-0.000008	0.000128
21	0.993396	-3.606722	0.993398	-3.606646	-0.000002	-0.000076
22	1.000000	-3.515202	1.000000	-3.515059	0.000000	-0.000142
23	1.000000	-1.696027	1.000000	-1.696108	0.000000	0.000081
24	0.983271	-2.618518	0.983307	-2.619682	-0.000036	0.001164
25	0.969326	-1.260502	0.969340	-1.261043	-0.000014	0.000542
26	0.895529	0.337014	0.895544	0.336421	-0.000016	0.000593
27	1.000000	-0.971512	1.000000	-0.971666	0.000000	0.000154
28	0.974537	-2.331059	0.974575	-2.331232	-0.000038	0.000174
29	0.979597	-2.271570	0.979597	-2.271725	0.000000	0.000154
30	0.967883	-3.184596	0.967883	-3.184750	0.000000	0.000154



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

Bus	Bus 26 = 30					
	Versión 9	1.00E-09	Matpower	1.00E-07	Diferencia	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.543679	1.000000	-0.543649	0.000000	-0.000030
3	0.982687	-1.726040	0.982710	-1.726183	-0.000023	0.000143
4	0.979582	-2.042545	0.979610	-2.042707	-0.000028	0.000162
5	0.981973	-2.068981	0.982183	-2.072471	-0.000210	0.003490
6	0.972560	-2.560133	0.972603	-2.560360	-0.000043	0.000227
7	0.966785	-2.910419	0.966896	-2.911721	-0.000111	0.001302
8	0.959959	-3.030633	0.960002	-3.030804	-0.000043	0.000171
9	0.980403	-3.429767	0.980423	-3.429873	-0.000021	0.000106
10	0.984600	-3.879707	0.984609	-3.879766	-0.000009	0.000059
11	0.980403	-3.429767	0.980423	-3.429873	-0.000021	0.000106
12	0.985695	-1.951074	0.985703	-1.951234	-0.000008	0.000159
13	1.000000	1.061307	1.000000	1.061123	0.000000	0.000184
14	0.976951	-2.751717	0.976957	-2.751849	-0.000007	0.000132
15	0.980343	-2.785489	0.980349	-2.785575	-0.000006	0.000086
16	0.977582	-3.097240	0.977591	-3.097352	-0.000009	0.000112
17	0.977050	-3.881871	0.977058	-3.881942	-0.000009	0.000070
18	0.968576	-3.962879	0.968583	-3.962947	-0.000007	0.000068
19	0.965441	-4.449106	0.965448	-4.449164	-0.000008	0.000058
20	0.969331	-4.365419	0.969339	-4.365476	-0.000008	0.000057
21	0.993441	-4.052796	0.993443	-4.052642	-0.000002	-0.000154
22	1.000000	-3.974222	1.000000	-3.974000	0.000000	-0.000222
23	1.000000	-2.165601	1.000000	-2.165596	0.000000	-0.000006
24	0.974814	-2.977730	0.974849	-2.978801	-0.000036	0.001071
25	0.935789	-1.236472	0.935804	-1.236912	-0.000015	0.000440
26	0.773740	3.651875	0.773759	3.651231	-0.000020	0.000644
27	1.000000	-1.706264	1.000000	-1.706292	0.000000	0.000028
28	0.973861	-2.625658	0.973900	-2.625778	-0.000039	0.000120
29	0.979597	-3.006322	0.979597	-3.006351	0.000000	0.000028
30	0.967883	-3.919348	0.967883	-3.919376	0.000000	0.000028



**B10 - 5 Resultados del caso considerando límites de potencia**

S/ Límite de potencia						
Alpa	Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
1.00E-09	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.415500	1.000000	-0.415491	0.000000	-0.000010
3	0.983115	-1.521892	0.983138	-1.522074	-0.000023	0.000182
4	0.980065	-1.794517	0.980093	-1.794728	-0.000028	0.000210
5	0.982197	-1.860296	0.982406	-1.863823	-0.000210	0.003527
6	0.973141	-2.266671	0.973184	-2.266957	-0.000043	0.000286
7	0.967245	-2.650481	0.967355	-2.651837	-0.000111	0.001355
8	0.960581	-2.725537	0.960624	-2.725769	-0.000043	0.000232
9	0.980486	-2.996738	0.980506	-2.996933	-0.000021	0.000195
10	0.984395	-3.374775	0.984404	-3.374936	-0.000009	0.000161
11	0.980486	-2.996739	0.980506	-2.996933	-0.000021	0.000195
12	0.985460	-1.536666	0.985468	-1.536912	-0.000008	0.000246
13	1.000000	1.476434	1.000000	1.476163	0.000000	0.000271
14	0.976670	-2.307810	0.976677	-2.308035	-0.000007	0.000225
15	0.980223	-2.311649	0.980229	-2.311835	-0.000006	0.000187
16	0.977387	-2.644281	0.977396	-2.644486	-0.000009	0.000205
17	0.976857	-3.392170	0.976865	-3.392339	-0.000009	0.000170
18	0.968433	-3.478219	0.968440	-3.478388	-0.000007	0.000169
19	0.965279	-3.958046	0.965287	-3.958205	-0.000008	0.000159
20	0.969158	-3.870866	0.969166	-3.871024	-0.000008	0.000158
21	0.993381	-3.488436	0.993383	-3.488393	-0.000002	-0.000043
22	1.000000	-3.392837	1.000000	-3.392729	0.000000	-0.000108
23	1.000000	-1.589110	1.000000	-1.589228	0.000000	0.000118
24	0.988530	-2.630259	0.988566	-2.631461	-0.000036	0.001202
25	0.990201	-1.689416	0.990215	-1.689989	-0.000014	0.000572
26	0.972180	-2.138786	0.972194	-2.139346	-0.000014	0.000560
27	1.000000	-0.828240	1.000000	-0.828439	0.000000	0.000199
28	0.974677	-2.265735	0.974715	-2.265929	-0.000038	0.000194
29	0.979597	-2.128299	0.979597	-2.128498	0.000000	0.000199
30	0.967883	-3.041324	0.967883	-3.041524	0.000000	0.000199



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

C/ Límite Superior de potencia (Cambio del bus 24, Qd=6.7 a 50.7)						
Alpa 1.00E-09	Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.455872	1.000000	-0.455820	0.000000	-0.000053
3	0.982915	-1.584515	0.982943	-1.584704	-0.000028	0.000189
4	0.979833	-1.870628	0.979867	-1.870844	-0.000034	0.000216
5	0.982071	-1.925514	0.982285	-1.929024	-0.000214	0.003510
6	0.972849	-2.357541	0.972899	-2.357873	-0.000051	0.000331
7	0.967011	-2.731277	0.967129	-2.732647	-0.000117	0.001371
8	0.960287	-2.817351	0.960338	-2.817612	-0.000051	0.000261
9	0.980170	-3.180976	0.980215	-3.181321	-0.000046	0.000345
10	0.984085	-3.607363	0.984128	-3.607719	-0.000043	0.000356
11	0.980170	-3.180976	0.980215	-3.181321	-0.000046	0.000345
12	0.985404	-1.658617	0.985419	-1.658604	-0.000015	-0.000013
13	1.000000	1.354653	1.000000	1.354620	0.000000	0.000033
14	0.976593	-2.427297	0.976607	-2.427208	-0.000014	-0.000089
15	0.980144	-2.428169	0.980158	-2.428003	-0.000013	-0.000166
16	0.977186	-2.813428	0.977213	-2.813581	-0.000027	0.000153
17	0.976564	-3.606335	0.976603	-3.606624	-0.000039	0.000289
18	0.968233	-3.635862	0.968257	-3.635866	-0.000024	0.000004
19	0.965034	-4.140121	0.965065	-4.140213	-0.000030	0.000092
20	0.968898	-4.065795	0.968932	-4.065948	-0.000034	0.000153
21	0.992821	-3.768738	0.992867	-3.769150	-0.000046	0.000413
22	0.999355	-3.686515	0.999401	-3.686959	-0.000046	0.000444
23	1.000000	-1.659479	1.000000	-1.658901	0.000000	-0.000578
24	0.945498	-1.429799	0.945559	-1.430969	-0.000061	0.001169
25	0.973481	-1.332554	0.973505	-1.332857	-0.000024	0.000304
26	0.955138	-1.797798	0.955162	-1.798078	-0.000024	0.000281
27	1.000000	-0.950647	1.000000	-0.950497	0.000000	-0.000149
28	0.974399	-2.360693	0.974444	-2.360873	-0.000046	0.000180
29	0.979597	-2.250706	0.979597	-2.250556	0.000000	-0.000150
30	0.967883	-3.163731	0.967883	-3.163581	0.000000	-0.000150



## Simulación de Flujos de Potencia en Corriente Alterna Mediante el Método de Gauss-Seidel

C/ Límite Inferior de potencia (Cambio del bus 24, Qd=6.7 a -50.7)						
Alpa	Versión 9		MATPOWER		Diferencia	
1.00E-09	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	-0.443439	1.000000	-0.443488	0.000000	0.000049
3	0.983041	-1.570210	0.983065	-1.570507	-0.000024	0.000297
4	0.979983	-1.853205	0.980013	-1.853555	-0.000029	0.000350
5	0.982166	-1.904585	0.982376	-1.908211	-0.000210	0.003626
6	0.973053	-2.328304	0.973097	-2.328735	-0.000043	0.000431
7	0.967176	-2.705239	0.967287	-2.706720	-0.000111	0.001481
8	0.960483	-2.789912	0.960527	-2.790291	-0.000043	0.000379
9	0.980473	-3.059391	0.980495	-3.059799	-0.000022	0.000408
10	0.984423	-3.437912	0.984434	-3.438321	-0.000011	0.000409
11	0.980473	-3.059391	0.980495	-3.059799	-0.000022	0.000408
12	0.985739	-1.685199	0.985753	-1.685742	-0.000014	0.000543
13	1.000000	1.327049	1.000000	1.326462	0.000000	0.000586
14	0.977069	-2.488114	0.977086	-2.488724	-0.000017	0.000610
15	0.980516	-2.525955	0.980535	-2.526715	-0.000019	0.000761
16	0.977585	-2.755949	0.977597	-2.756422	-0.000013	0.000474
17	0.976943	-3.469302	0.976955	-3.469723	-0.000011	0.000421
18	0.968680	-3.638537	0.968697	-3.639141	-0.000016	0.000604
19	0.965467	-4.086707	0.965482	-4.087231	-0.000015	0.000524
20	0.969304	-3.982907	0.969318	-3.983400	-0.000014	0.000494
21	0.993384	-3.534740	0.993386	-3.534951	-0.000002	0.000210
22	1.000000	-3.434260	1.000000	-3.434406	0.000000	0.000146
23	1.000462	-1.974532	1.000492	-1.975852	-0.000030	0.001320
24	1.038561	-4.469396	1.038606	-4.471194	-0.000045	0.001798
25	1.009472	-2.522592	1.009489	-2.523591	-0.000017	0.001000
26	0.991808	-2.954659	0.991826	-2.955644	-0.000018	0.000985
27	1.000000	-1.030789	1.000000	-1.031262	0.000000	0.000473
28	0.974527	-2.343294	0.974566	-2.343646	-0.000039	0.000352
29	0.979597	-2.330848	0.979597	-2.331321	0.000000	0.000473
30	0.967883	-3.243874	0.967883	-3.244347	0.000000	0.000473