



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
BUAP

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

*“ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS EN UN SISTEMA
ELÉCTRICO DE POTENCIA UTILIZANDO MATLAB”*

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

RAFAEL CASTELÁN FLORES

Asesor de tesis:

M.C. Ismael Albino Padilla

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Puebla, Pue.

ENERO 2023



Oficio No. SIEP/064/2023

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Director General de Bibliotecas
Presente

Por este medio me permito saludarle y, al mismo tiempo, me dirijo a usted para informarle que la tesis con título "ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA UTILIZANDO MATLAB" ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno: Rafael Castelán Flores.
Matrícula: 221470158.
Facultad de Ingeniería.
Maestría en Ingeniería con Opción Terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
II. Puebla de Z., a 02 de mayo de 2023

M. I. Ana Flena Posada Sánchez
Secretaria de Investigación y Estudios
de Posgrado.



Mtro. Ismael Albino Padilla
Director de Tesis.

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez
Co-director de Tesis.
Facultad de Ingeniería de la B.U.A.P.

Facultad
de Ingeniería

Bld. Iturbide y R. San Claudio
sn. edif. ING-4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Dedicatoria

A mis padres Eugenio Castelán Fernández y María Flores Tobón por su apoyo incondicional, su amor, consejos, por la oportunidad y apoyo para estudiar, por ustedes soy quien soy ahora, por su ejemplo, por lo que me han enseñado, por su ayuda, son las personas que más admiro en la vida, muchas gracias, los quiero mucho.

A mi familia.

A mis tías Lulu, Blanca, Ana, Christina e Inés, por todo su apoyo, Gracias.

A mis hermanos Mario y Liliana, a todos mis primos, en especial a Jordán, Alejandra y Mari y a mis sobrinos.

A mí mismo.

Agradecimientos

A mis asesores por su apoyo en la realización de esta tesis, por compartir su conocimiento conmigo, muchas gracias.

A todos mis compañeros, compañeros de trabajo y amigos quienes me apoyaron y retaron para siempre ser mejor.

A todas las personas que de alguna manera estuvieron conmigo, apoyándome durante mi desarrollo universitario y como persona.

A todas las personas que tuvieron esperanza en mí, espero haber podido satisfacer esas expectativas y si no fue así les agradezco por haberlas tenido.

Índice

Resumen.....	IX
Capítulo 1 Protocolo de tesis.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo general.....	4
1.5 Objetivos particulares.....	4
1.6 Hipótesis.....	4
Capítulo 2 Marco de referencia.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Información del sistema.....	5
2.3 Flujos de potencia.....	6
2.4 Métodos para la formulación de matriz de admitancias.....	6
2.5 Solución de estudios flujos de potencia.....	9
2.5.1 Método Gauss iterativo.....	11
2.5.2 Método de Gauss-Seidel.....	13
2.5.3 Método Newton-Raphson.....	13
2.5.4 Método Newton-Raphson desacoplado rápido.....	16
2.6 Análisis de contingencias.....	18
2.6.1 Introducción.....	18
2.6.2 Método de compensación.....	18
2.6.3 Método flujos de potencia.....	19
2.6.4 Selección automática de contingencia.....	19
Capítulo 3 Resultados de los estudios de análisis de contingencias.....	21
3.1 Introducción.....	21
3.2 Descripción del programa desarrollado.....	21
3.3 Descripción de los casos de estudio.....	24
3.4 Resultados de la solución de flujos de potencia.....	25
3.5 Simulación de contingencias por salida de una línea.....	30
3.5.1 Salida de una línea seleccionada.....	31
3.5.2 Salida de todas las líneas, una por vez.....	33
3.5.3 Salida de las líneas por nivel de tensión.....	45
Capítulo 4 Conclusiones y trabajos futuros.....	48
4.1 Conclusiones.....	48

4.2 Trabajos futuros.....	49
Referencias.....	51
Anexo A Descripción de los sistemas de prueba.....	53
Sistema de pruebas de 5 barras [7].....	53
Sistema de prueba de 30 barras IEEE [11].....	55
Sistema de prueba de 57 barras IEEE [11].....	58
Sistema de prueba de 118 barras IEEE [11].....	62
Anexo B Resultados completos de los estudios.....	69
Análisis de contingencias por el método de Newton-Raphson.	69
Sistema 2, análisis completo.....	69
Anexo C Código de los programas.....	75
Método Newton Raphson.	75

Índice de Figuras.

Figura 2.1 Ejemplo de sistema conectado de admitancias.....	7
Figura 2.2 Formato para la matriz de cuatro ecuaciones independientes.	8
Figura 2.3 Ejemplo de Y de barra para el sistema conectado de admitancias.....	8
Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa de análisis de contingencias.....	23
Figura 3.2 Diagrama de flujo del programa de análisis de contingencias.....	23
Figura 3.3 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 1.....	38
Figura 3.4 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 2.....	40
Figura 3.5 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 3.....	42
Figura 3.6 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 4.....	44
Figura 10 Diagrama unifilar sistema 1.....	53
Figura 11 Diagrama unifilar sistema 2.....	55
Figura 12 Diagrama unifilar sistema 3.....	58
Figura 13 Diagrama unifilar sistema 4.....	62

Índice de Tablas.

Tabla 3.1 Métodos de solución para el análisis de contingencias y sus programas.	24
Tabla 3.2 Casos de estudio.	24
Tabla 3.3 Resumen de los datos de los sistemas de prueba.	25
Tabla 3.4 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el programa MATPOWER.	25
Tabla 3.5 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Newton-Raphson.	26
Tabla 3.6 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Gauss-Seidel.	28
Tabla 3.7 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.	29
Tabla 3.8 Comparación entre los diferentes métodos de solución de flujos de potencia.	30
Tabla 3.9 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, MATPOWER3.2 (Newton-Raphson).	31
Tabla 3.10 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Newton-Raphson. ..	31
Tabla 3.11 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Gauss-Seidel.	32
Tabla 3.12 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Newton-Raphson Desacoplado Rápido.	32
Tabla 3.13 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando MATPOWER.	33
Tabla 3.14 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Newton-Raphson.	34
Tabla 3.15 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Gauss- Seidel.	35
Tabla 3.16 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.	36
Tabla 3.17 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando MATPOWER.	45
Tabla 3.18 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Newton-Raphson.	46
Tabla 3.19 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Gauss-Seidel.	46
Tabla 3.20 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.	47

Glosario de variables.

- Y – Valor de admitancia de la línea.
- θ – Angulo de la forma polar de la admitancia.
- G – Conductancia de la línea.
- B – Susceptancia de la línea.
- V – Tensión (Voltaje).
- δ – Angulo de la forma polar de la tensión.
- I – Corriente de las líneas.
- P – Potencia real.
- Q – Potencia reactiva.
- H – Primer cuadrante de la ecuación jacobiana.
- N – Segundo cuadrante de la ecuación jacobiana.
- J – Tercer cuadrante de la ecuación jacobiana.
- L – Cuarto cuadrante de la ecuación jacobiana.
- Z – Impedancia.

Resumen.

En la presente tesis se habla de los análisis de contingencias y su efecto en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), en los que se

Uno de los aspectos más importantes de la operación y planeación de los sistemas eléctricos de potencia es la seguridad operativa del sistema, se busca que un sistema no falle, por lo que los análisis de seguridad son esenciales para su operación, se tienen que revisar los estados durante una falla, tanto en estado transitorio como estable.

En este trabajo se podrá ver el análisis de contingencias, en el que se observa los efectos de una contingencia, en este caso la salida de un elemento del sistema, en su estado estable.

Se describirá la metodología de solución por medio de métodos iterativos, en los que se presentaran más de un método.

Se describirá un programa para la solución del análisis de contingencias, en el que se observará diferentes características para designar que se va a analizar.

Se observará la aplicación de este programa con diferentes sistemas de prueba y con diferentes métodos de solución.

Capítulo 1 Protocolo de tesis.

1.1 Introducción.

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) que nos brindan la energía todos los días, haciendo que podamos contar con energía eléctrica confiable (hasta cierto punto, no existe sistema perfecto que no llegue a fallar), generalmente se busca cierta estabilidad dentro de ciertos niveles y parámetros. Para poder hacer confiable estos sistemas se realizan múltiples estudios, especialmente si el sistema está en funcionamiento, algunos de estos estudios son el estudio de flujos de potencia y los análisis de seguridad, de los que se hablara un poco en este trabajo.

Uno de los elementos más importantes a tomar en cuenta para el diseño, la planeación y la correcta operación de los SEP, es la seguridad del sistema, al ser sistemas de grandes dimensiones, se vuelve más complicado el mantener la seguridad del mismo.

Como se menciona en el PRODESEN, se ha visto que son necesarios requerimientos adicionales, a los cuales se les denomina “Servicios Conexos”, estos servicios brindan al sistema la confiabilidad para podre hacer frente al comportamiento dinámico y transitorio, así como para la incertidumbre relacionada a las variables que en su conjunto forman la generación, transporte y el uso de la energía eléctrica. Un ejemplo que se puede dar son los efectos causados por contingencias, como la salida de fortuita de un elemento del sistema. [1]

Algunos de los problemas que se tienen constantemente en los SEP son: la pérdida de elementos del sistema por desconexión, como una o múltiples líneas, la pérdida de uno o múltiples transformadores, la pérdida o fallo en la generación. Al ser redes muy grandes es difícil tener el control de todo el sistema y no tener estas fallas y salidas de los elementos.

Las líneas y otros elementos del SEP están sometidos a diversas contingencias que producen fallas eléctricas. Algunos de los fenómenos físicos que podemos mencionar que pueden causar una falla eléctrica son: viento, incendio de campo, caída de una torre, diferentes maniobras realizadas por las compañías de transmisión, descargas atmosféricas [2], por fauna salvaje que ingresa a las subestaciones, así como el fallo en un elemento de estas, por un fallo en los generadores, o también pueden quedar fuera de servicio elementos del sistema por mantenimientos programados.

Las fallas que se producen en los SEP se liberan, generalmente aislando el elemento en falla, por el sistema de protecciones del sistema, al operar aíslan la falla, lo cual pone fuera de servicio al elemento, esto generalmente deja fuera de servicio uno o más segmentos del SEP [2]. Esto afectara a todo el sistema, a la generación eléctrica, al transporte de la potencia y a las cargas que necesitan esa energía. Dejando variaciones en los voltajes y en la potencia real y reactiva que es transportada y que satisface al sistema.

Las fallas en su mayoría son libreadas rápidamente, dejando fuera de servicio los elementos del sistema por poco tiempo, pero aun siendo poco tiempo, esto como ya se dijo afecta a todo el sistema. Esto hace que se realicen diferentes análisis de seguridad.

En el pasado, cuando los SEP eran más pequeños y menos complejos, los métodos de análisis de seguridad y control que se empleaban eran generalmente realizados por los operadores del sistema utilizando solo su conocimiento y experiencia del sistema. Los SEP modernos son mucho más grandes y complejos, además que generalmente están conectados con otros sistemas, dificultando la tarea de los análisis de seguridad y control para el operador del sistema. [3]

Los estudios de flujos de potencia estudian el SEP en su estado completo, obteniendo la solución en estado estable, calculando el voltaje de los buses, las corrientes que circulan en las líneas, la potencia que se necesita para satisfacer al sistema, su distribución por el sistema y su dirección de flujo. El análisis del sistema completo generalmente se le llama como caso base, del cual se parte para estudiar las condiciones después de la modificación del sistema.

El estudio de análisis de contingencias es uno de los estudios que se realizan a los SEP para poder saber cuáles son las condiciones más críticas del sistema causado por la salida de uno o más elementos del sistema, este análisis se busca que sea más rápido que un estudio de flujos de potencia completo, eso ha hecho que se busquen soluciones más rápidas, encontrando métodos un poco menos precisos pero mucho más rápidos y que requieren menos capacidad de cómputo, para conocer las contingencias más críticas no se necesita la precisión, pero generalmente al conocer estas contingencias críticas para el sistema se realizan estudios más completos.

Para realizar un estudio de análisis de contingencias es necesario quitar elementos del sistema, simulando su salida del sistema en un caso de contingencias y a partir de esto obtener los flujos de potencia resultantes de este cambio, existen múltiples métodos para realizar este tipo de simulaciones. Con esta información se crean listas donde muestran los valores de los parámetros eléctricos de las barras que salen del rango aceptable por cada contingencia.

Estas listas con las contingencias más críticas son necesarias para los operadores del sistema, puesto que, al momento de las fallas el operador del sistema está demasiado preocupado por la falla que no puede interpretar adecuadamente el empeoramiento de las condiciones del sistema, o considerar nuevos problemas que puedan surgir por la misma falla. [3]

1.2 Planteamiento del problema.

El estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), es una parte fundamental en la ingeniería eléctrica actual, por lo que es un tema importante, tanto para la industria de la

energía, para los estudiantes de licenciatura y posgrados, como, para los catedráticos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

Una parte fundamental de los estudios de sistemas eléctricos de potencia son los análisis de contingencias, que permite analizar los puntos más críticos en los SEP después de analizar diferentes eventualidades en los elementos que componen el sistema.

Las herramientas actuales tienen costos altos o son de acceso limitado, además de que no permiten la observación de la programación del método de resolución y la forma en que el método es aplicado. El acceso a la programación nos permitiría entender a profundidad el proceso y funcionamiento del mismo.

El poder contar con una herramienta que nos permita desarrollar adecuadamente los análisis de contingencias, y nos ayude a entender el método y el proceso de resolución de los análisis se vuelve importante. Además, que nos permita realizar varios estudios, sobre un mismo, o diferentes sistemas, podamos modificar los parámetros del sistema necesarios para observar, analizar y comparar los diferentes resultados de los estudios de análisis de contingencias con su caso base y con diferentes métodos similares para su comprobación y comparación.

1.3 Justificación.

El análisis de contingencias es un estudio importante y muy útil para entender el comportamiento de los sistemas dependiendo de los eventos de desconexión (posibles fallas en los elementos, caídas de líneas, desconexión por mantenimiento, etc.), que se presenten en estos, y así poder analizar diferentes cambios en el sistema y observar y aprender de los resultados.

Poder observar su comportamiento a través de las modificaciones del sistema, ver cómo está siendo afectado todo el sistema por pequeños cambios y como la salida de un pequeño elemento puede generar un caso crítico en el SEP.

Los estudios de análisis de contingencias son extensos de realizar, puesto que son un conjunto de múltiples estudios de flujos de potencia para el mismo sistema, múltiples iteraciones por cada caso más varios elementos a considerar, hace que se complica, sea inviable al hacerlos de manera manual, o hasta en algunos casos imposible, dependiendo la complejidad del sistema.

El contar con una herramienta para realizar los estudios de análisis de contingencias se vuelve importante, para facilitar los múltiples estudios de casos al momento de analizar un sistema.

Poder contar con un programa que muestre el código y sea claro en método utilizado para hacer un estudio de análisis de contingencias, se vuelve de mucha utilidad para los estudiantes y los catedráticos, para que así, puedan comprender este proceso y lo puedan recrear, así como puedan observar los cambios en el sistema causado por las contingencias.

El programa base desarrollado en la facultad de ingeniería para la solución de flujos de potencia, basado en el método numérico de Gauss-Seidel, se puede complementar con una herramienta para hacer los estudios de análisis de contingencias. Este programa está desarrollado en el lenguaje de programación de Matlab, la cual es una herramienta ampliamente utilizada en la ingeniería y en muchos otros campos.

1.4 Objetivo general.

Crear una subrutina para desarrollar los estudios de análisis de contingencias para complementar el programa de estudios de flujos de potencia llamado PRINCIPAL_V8.m desarrollado en Matlab.

1.5 Objetivos particulares

- Realizar una subrutina compatible con el programa PRINCIPAL_V8 para realizar el análisis de contingencias.
- Comparar las soluciones de la subrutina desarrollada con los resultados obtenidos un programa comercial.
- Probar el programa utilizando sistemas de prueba para comprobar el análisis de contingencias.

1.6 Hipótesis.

La programación para el análisis de contingencias a través del programa Matlab mejora la rapidez con la que se realizan los análisis de contingencias y lograra que se enseñe de mejor manera uno de los métodos de resolución, el proceso del análisis y sus aplicaciones e importancia.

Capítulo 2 Marco de referencia.

2.1 Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia son un conjunto de elementos que buscan generar transmitir y distribuir la energía eléctrica de la forma más eficiente para satisfacer la necesidad de carga que existe en un área o región específica.

Los elementos principales que componen un SEP son los generadores (por diferentes medios de generación como energías limpias, quema de combustibles, etc.), cargas, transformadores, líneas de transmisión y protecciones.

2.2 Información del sistema

Para poder hacer el análisis del sistema para flujos de potencia y por tanto para un análisis de contingencias, lo primero a tomar en cuenta es la información de las características de los elementos que componen los sistemas para crear la matriz Y de barra o matriz de admitancias del sistema. La información que se menciona a continuación es lo necesario para crear esta matriz.

- Resistencia de las líneas de transmisión.
- Reactancia de las líneas de transmisión.
- Efecto capacitivo de las líneas de transmisión.
- Impedancia de los transformadores.
- Información de conexión de los buses por medio de las líneas de transmisión.

El punto de operación del sistema, que nos da las condiciones iniciales del sistema, e información de las cargas y los generadores, es otro de los aspectos importantes para realizar estos estudios, la cual se menciona a continuación.

- Tipo de bus (bus de carga, bus de voltaje controlado y bus de compensación).
- Voltaje de los buses.
- Potencia real y reactiva generada.
- Potencia real y reactiva de carga.

Algunos sistemas tienen otros elementos adicionales que afectan el resultado del estudio, puesto que justamente son insertados para mejorar las condiciones del sistema, esa información se especifica a continuación.

- Diagrama unifilar
- Capacidad de los bancos de capacitores.
- Capacidad de los bancos de reactores.
- Límites de generación de las máquinas.
- Límites operativos de las líneas de transmisión.

En el caso del diagrama unifilar, es importante puesto que da una idea general del sistema de manera visual.

Los resultados más importantes que da el estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada una de las barras del sistema, así como la magnitud y la dirección de la potencia real y reactiva en cada una de las líneas de transmisión y los transformadores. [4]

Los valores resultantes del estudio de flujos de potencia del caso base son parte esencial del análisis de contingencias, así como del resultado del mismo.

2.3 Flujos de potencia

Uno de los estudios que se realiza a los SEP es flujos de potencia, un estudio que nos permite saber la cantidad de energía que se tiene que producir para satisfacer el sistema junto con la carga, así como el flujo de la energía por el sistema. La información más importante que se obtiene de este estudio es la magnitud y el ángulo de fase de las barras del sistema, así como, la potencia real y reactiva que está fluyendo por las líneas en un arreglo específico del sistema [4]. Esta información es esencial, puesto que se puede analizar y evaluar el estado del sistema en base a la corriente que fluye [5].

Este estudio nos provee de información para un sistema de potencia específico, que está sujeto a la capacidad de regulación de los diferentes elementos del sistema; los generadores, los condensadores, los cambios de la regulación de voltaje del transformador (taps), así como intercambios específicos entre sistemas operativos individuales.

La importancia del estudio de flujos de potencia abarca muchos ámbitos. Algunos de los puntos a resaltar son la planeación y el diseño de la expansión de los sistemas eléctricos de potencia a futuro, así como también el poder determinar de una mejor manera las condiciones óptimas de operación de los sistemas ya existentes, logrando así una mejor eficiencia [4].

Otro punto a resaltar es que la información obtenida a través de los estudios de flujos de potencia es necesaria para evaluar continuamente el desempeño del sistema, también para analizar la efectividad de las posibles expansiones del sistema, previamente planeados, que se realizan para satisfacer la creciente demanda de potencia por el aumento de carga.

El cálculo de los flujos de potencia son el primer paso para realizar un análisis de contingencias, por lo que para ello revisaremos lo necesario para realizarlo.

2.4 Métodos para la formulación de matriz de admitancias

Lo primero que se necesita para la solución de los flujos de potencia es crear una matriz que nos relacione los elementos del sistema. De acuerdo con el procedimiento para resolver el problema de flujos de potencia por cualquiera de los métodos iterativos conocidos, uno de los datos esenciales para poder resolverlo son las admitancias propias y mutuas de la matriz de admitancias conocidas como Y_{barras} o las impedancias de punto de operación y de transferencia conocidas como Z_{barras} , que es especificada en el diagrama unifilar. [4]

En la **figura 1.1** se muestra un ejemplo de un diagrama unifilar en el cual se especifican las admitancias de las líneas que interconectan a las barras, generalmente estas líneas son las líneas de transmisión en los SEP. Se ve como se numeran las barras y se especifican las fuentes también, los números de los buses también servirán para identificar los elementos como las líneas.

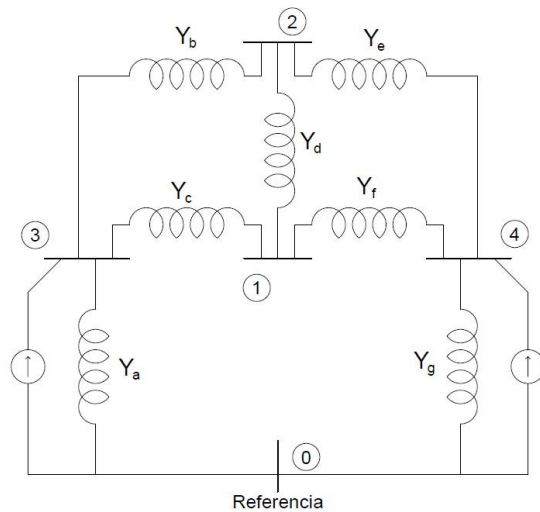


Figura 2.1 Ejemplo de sistema conectado de admitancias.

Para crear una matriz de admitancias se necesita una formulación que relacione todo el sistema, con este objetivo se representan los elementos del sistema como admitancias, después se aplica la “Ley de corrientes de Kirchhoff” (la suma de corrientes saliendo del nodo igual a la suma de corrientes que entran al nodo) para así obtener los voltajes en cada uno de los nodos del sistema. De esta forma se pueden encontrar todas las corrientes en las ramas.

En la **figura 1.2** se puede observar un ejemplo de cómo es una matriz de admitancias y se ve su importancia en la relación que tiene con el voltaje y la corriente. Las admitancias son el inverso de la impedancia por lo que $Y = \frac{1}{Z}$ y por tanto $Z = \frac{1}{Y}$.

$$\begin{array}{cccc}
 & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{1} & Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\
 \textcircled{2} & Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\
 \textcircled{3} & Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\
 \textcircled{4} & Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44}
 \end{array}
 \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Figura 2.2 Formato para la matriz de cuatro ecuaciones independientes.

Se sabe que las corrientes que fluyen por la red a través de los elementos del sistema, desde su fuente y se distribuye por el sistema, es igual a la suma de varios productos. Tomando cualquiera de los nodos, uno de los productos es la suma de las admitancias que se conectan a ese nodo por el voltaje de ese mismo nodo. Este producto también toma en cuenta la corriente que sale del nodo si el voltaje es cero en uno de los otros nodos. Cada uno de los otros productos es igual al voltaje en otro nodo, en negativo, por la admitancia que está conectada entre ese nodo y el nodo del cual se está formulando la ecuación. [4]

De esta forma se toman todas las admitancias que relacionan a un nodo por medio de las corrientes, y así formando la matriz de admitancias, también denominada matriz de admitancias de barra (Y_{barra}).

El método a seguir para poder formular los elementos típicos de Y_{barra} son:

- Los elementos de la diagonal Y_{jj} son iguales a la suma de las admitancias que están directamente conectados al nodo J.
- Los elementos fuera de la diagonal Y_{ij} son iguales al negativo de la admitancia total conectada entre los nodos I y J.

Las admitancias en la diagonal de la matriz se llaman admitancias propias de los nodos y las que se encuentran fuera de la diagonal son las admitancias mutuas de los nodos. [4]

Es importante observar el ejemplo que se muestra en la **figura 2.3** de cómo se conforma la matriz de admitancias de acuerdo a lo que vimos anteriormente sobre la formulación con las leyes de corrientes de Kirchoff, en este ejemplo se conforma en base a la **figura 2.1**.

$$Y_{barra} = \begin{array}{cccc}
 & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\
 \textcircled{1} & (Y_c + Y_d + Y_f) & -Y_d & -Y_c & -Y_f \\
 \textcircled{2} & -Y_d & (Y_b + Y_d + Y_e) & -Y_b & -Y_e \\
 \textcircled{3} & -Y_c & -Y_b & (Y_a + Y_b + Y_c) & 0 \\
 \textcircled{4} & -Y_f & -Y_e & 0 & (Y_e + Y_f + Y_g)
 \end{array}$$

Figura 2.3 Ejemplo de Y de barra para el sistema conectado de admitancias.

2.5 Solución de estudios flujos de potencia

Utilizando la formulación para resolver el problema de flujos de potencia, una de las opciones es utilizar las admitancias propias y mutuas que constituyen la matriz de admitancias también conocida como Y_{barra} o las impedancias de punto de operación y de transferencia que componen la matriz Z_{barra} . Lo primero que se tiene que conocer del sistema para poder construir cualquiera de estas matrices es el diagrama unifilar, cuya información tendrá que ser introducida a la computadora. [4]

Un típico elemento Y_{ij} de nuestra matriz de admitancias tiene la forma

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j|Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.1)$$

Comentado [IAP1]: Los números de las ecuaciones deben estar enfrente de la ecuación, se ve mejor. Además, el número de la ecuación no corresponde al capítulo 2

El voltaje en una barra típica i del sistema está dado en coordenadas polares por

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j \sin \delta_i \quad (2.2)$$

Donde:

La corriente total que se inyecta en la red a través de la barra i en términos de los elementos Y_{in} de Y_{barra} está dada por la sumatoria

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (2.3)$$

Sean P_i y Q_i las potencias reales y reactivas totales que entran en la red a través de la barra i

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.4)$$

$$Q_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.5)$$

Las ecuaciones de potencia real y reactiva P_i y Q_i constituyen la forma polar de las ecuaciones de flujos de potencia; estos son valores calculados para la potencia total que entran a la red a través de una barra típica i . Sea P_{gi} la potencia programada que se está generando en la barra i y P_{di} la potencia programada que demanda la carga en esa barra.

Entonces la ecuación $P_{i,prog} = P_{gi} - P_{di}$ da la potencia programada total que está siendo inyectada dentro de la red en la barra i . Se nombra al valor calculado de P_i como $P_{i,calc}$ y se llama a la definición de error ΔP_i como el valor programado $P_{i,prog}$ menos el valor calculado $P_{i,calc}$.

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,calc} \quad (2.6)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,calc} \quad (2.7)$$

Si los valores programados $P_{i,calc}$ y $Q_{i,calc}$ son iguales a los valores programados $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$ se dice que los errores ΔP_i y ΔQ_i son cero en la barra i y se tienen las siguientes ecuaciones de balance de potencia

$$g_i' = P_i - P_{i,prog} = P_i - (P_{gi} - P_{di}) = 0 \quad (2.8)$$

$$g_i'' = Q_i - Q_{i,prog} = Q_i - (Q_{gi} - Q_{di}) = 0 \quad (2.9)$$

Cada barra de la red tiene dos de esas ecuaciones.

Para el resolver el problema de flujos de potencia es necesario resolver P_i y Q_i de las ecuaciones (2.4) y (2.5), de potencia activa y reactiva, para los voltajes de barra desconocidos que originen los errores de las potencias activa y reactiva ΔP_i y ΔQ_i sean cero en cada barra. [4]

Para cada barra hay cuatro variables desconocidas, la potencia real P_i , la potencia reactiva Q_i , la magnitud del voltaje V_i y el ángulo del voltaje δ_i . En cada barra se especifican dos de los valores desconocidos y se busca obtener los otros dos.

Para esto se tiene que especificar los tres tipos de barra

1. Barra de carga. Es cada barra que no tiene generación, P_i y Q_i son cero y la potencia real P_{di} y reactiva Q_{di} son tomadas del sistema por la carga (entradas negativas al sistema). En la barra que se especifica como de carga se conocen las variables de $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$, el voltaje $|V_i|$ y δ_i . Entonces se pueden definir los errores ΔP_i y ΔQ_i .
2. Es una barra donde se controla el voltaje (generalmente es de generación, pero también se puede controlar el voltaje en una barra sin generación), se conoce la magnitud del voltaje $|V_i|$ y P_{gi} . Entonces se puede calcular el error (ΔP_i) y calcular el ángulo del voltaje δ_i . Después de que se ha resuelto el problema de flujos de potencia, se puede calcular Q_i por medio de su ecuación
3. Generalmente se elige en la barra que se tenga conectado el generador más grande del sistema, No se definen errores para la barra de compensación, y así, la magnitud

del voltaje $|V_i|$ se especifica como la otra cantidad conocida junto con $\delta_i = 0$. el voltaje que se elige como referencia es $|V_i| = 1.0$ y $\delta_i = 0$. El ángulo del voltaje en la barra de compensación sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de barra. La barra de compensación nos sirve para solventar la potencia de pérdidas en los elementos del sistema, cantidad desconocida antes de resolver los flujos de potencia, por lo que es necesario contar con un generador que pueda y suministre esta potencia.

La diferencia entre las potencias totales suministrados por los generadores en las barras y las potencias recibidas por las cargas está dada por

$$\sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N Q_{gi} - \sum_{i=1}^N Q_{di} \quad (2.10)$$

Con esto podemos ver que el problema de flujos de potencia consiste en obtener los valores para todas las variables de estado, resolviendo un número igual de ecuaciones de flujos de potencia especificando los datos de entrada. Después de calcular las variables de estado, se conoce el estado completo del sistema, y ahora se pueden calcular todas las demás variables que dependen de las variables de estado. Cantidades como las potencias P_i y Q_i en la barra de compensación, la potencia reactiva Q_i en cada barra de voltaje controlado y las pérdidas de potencia P_l del sistema. [4]

Esto nos da en resumen, lo que obtendremos después de realizar el estudio de flujos de potencia, las variables dependientes que se buscan obtener del sistema al conocer su estado completo.

Los métodos utilizados para resolver el problema de flujos de potencia son técnicas iterativas, las más utilizadas son Gauss-Seidel y de Newton-Raphson. El método de Newton-Raphson resuelve las ecuaciones de flujos de potencia en su forma polar hasta hacer que los errores de las potencias sean los especificadas. Por su parte el método Gauss-Seidel resuelve también las ecuaciones del flujo de potencia, pero en coordenadas rectangulares hasta que las diferencias en los voltajes de barra de una iteración a otra son lo suficientemente pequeñas.

2.5.1 Método Gauss iterativo

Para utilizar el método de Gauss iterativo se usa la matriz de admitancias. Se inicia al asumir los voltajes para todas las barras menos la de compensación, donde el voltaje es especificado. Después se calcula la corriente de todos los buses menos del de compensación con la siguiente expresión

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \quad (2.11)$$

$p = 1, 2, \dots, n; p \neq s$

Donde n es el número de barras en el sistema

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(I_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \right) \quad (2.12)$$

$p = 1, 2, \dots, n; p \neq s$

Las corrientes calculadas de la ecuación (2.11), y los voltajes son sustituidos en la ecuación (2.12) para obtener un nuevo valor para los voltajes, los cuales se volverán a sustituir en la ecuación (2.12). Así se repite de manera consecutiva hasta que los cambios en el voltaje sean mínimos o por debajo de la tolerancia previamente especificada. Una vez fueron obtenidos los valores del voltaje, se calculan la potencia del bus de compensación y en las líneas.

Las ecuaciones (2.11) y (2.12) se pueden combinar para darnos una ecuación que solo tiene a los voltajes como variables, al ser ecuaciones no lineales se pueden resolver por un método iterativo.

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \right) \quad (2.13)$$

$p = 1, 2, \dots, n; p \neq s$

Se puede hacer una significativa reducción del tiempo de cálculo al tomar las siguientes reducciones aritméticas.

$$\frac{1}{Y_{pp}} = L_p \quad (2.14)$$

$$(P_p - jQ_p)L_p = KL_p \quad (2.15)$$

$$Y_{pp}L_p = YL_{pq} \quad (2.16)$$

Entonces nuestra ecuación se vuelve en la siguiente expresión

$$V_p = \frac{KL_p}{V_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{Lpq} V_q \quad (2.17)$$

$p = 1, 2, \dots, n; p \neq s$

2.5.2 Método de Gauss-Seidel.

El método de Gauss-Seidel usando la matriz de admitancias Y barra.

La ecuación (2.17) del voltaje de barra, puede también ser resuelto por el método de Gauss-Seidel iterativo. [5]

En este método el nuevo voltaje E_p^{k+1} , calculado por medio de la ecuación (2.17) se reemplaza E_p^k inmediatamente en las ecuaciones de las siguientes barras, para poder obtener un método más rápido.

2.5.3 Método Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson usando la matriz de admitancias Y barra.

En este método el problema de los flujos de potencia puede ser resuelto usando ecuaciones no lineales para poder expresar en términos del voltaje los valores especificados de potencia real y reactiva. [5]

El método de Newton-Raphson se basa en la expansión de las series de Taylor para funciones de dos o más variables.

Es necesario expresar los voltajes de las barras y las admitancias de las líneas en su forma polar.

La potencia en el bus p es

$$P_p - jQ_p = V_p^* I_p \quad (2.18)$$

$$P_p - jQ_p = V_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (2.19)$$

$$P_p - jQ_p = e_p + jf_p \quad (2.20)$$

$$Y_{pq} = G_{pq} + jB_{pq} \quad (2.21)$$

Con las ecuaciones (2.20) y (2.21) podemos sustituir en la ecuación (2.19), obteniendo la siguiente expresión

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} + jB_{pq})(e_p - jf_p) \quad (2.22)$$

Separándolo en sus componentes real e imaginario.

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{e_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})\} \quad (2.23)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + e_p(f_q G_{pq} + e_q B_{pq})\} \quad (2.24)$$

Esta formulación resulta en ecuaciones no lineales, dos por cada barra del sistema. La potencia real P_p y reactiva Q_p son conocidas y el voltaje en sus componentes e_p y f_p son desconocidas excepto por la barra de compensación, donde es especificado y se mantiene fijo.

Se requiere un conjunto de ecuaciones lineales que muestren la relación entre los cambios de las potencias, y de los componentes de los voltajes, que se muestran a continuación.

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P_1 \\ \dots \\ \Delta P_{n-1} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \dots \\ \Delta Q_{n-1} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta e_1 \\ \dots \\ \Delta e_{n-1} \\ \hline \Delta f_1 \\ \dots \\ \Delta f_{n-1} \\ \hline \end{array} \quad (2.25)$$

La matriz que contiene las derivadas parciales se llama jacobiana, y los errores son los valores de corrección que se tienen que sumar para dar la solución correcta

Las ecuaciones al determinar los elementos si el Jacobiano puede ser derivado de las ecuaciones de potencia de barras.

$$P_p = e_p(e_p G_{pp} + f_p B_{pp}) + f_p(f_p G_{pp} - e_p B_{pp}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{e_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \quad (2.26)$$

$p=1, 2, \dots, n-1$

La ecuación para la corriente en una barra p

$$I_p = c_p + j d_p = (G_{pp} - j B_{pp})(e_p + j f_p) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (G_{pq} + j B_{pq})(e_q + j f_q) \quad (2.27)$$

Los elementos fuera de la diagonal y en la diagonal de J_1 son respectivamente

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial e_p} &= e_p G_{pq} - f_p B_{pq} & q \neq p \\ \frac{\partial P_p}{\partial e_p} &= 2e_p G_{pp} + f_p B_{pp} - f_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n e_q G_{pq} + f_q B_{pq} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Los elementos fuera de la diagonal y en la diagonal de J_2 son respectivamente

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial f_p} &= e_p B_{pq} + f_p G_{pq} & q \neq p \\ \frac{\partial P_p}{\partial f_p} &= e_p B_{pp} + 2f_p G_{pp} - e_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Los elementos fuera de la diagonal y en la diagonal de J_3 son respectivamente

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_p}{\partial e_p} &= e_p B_{pq} + f_p G_{pq} & q \neq p \\ \frac{\partial P_p}{\partial e_p} &= f_p G_{pp} - f_p G_{pp} + 2e_p B_{pp} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Los elementos fuera de la diagonal y en la diagonal de J_2 son respectivamente

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} &= -e_p G_{pq} + f_p B_{pq} & q \neq p \\ \frac{\partial Q_p}{\partial f_p} &= e_p G_{pp} + 2f_p B_{pp} - e_p G_{pp} + \sum_{q=1, q \neq p}^n (e_q G_{pq} - f_q B_{pq})\end{aligned}\quad (2.31)$$

Los deltas de potencia son los cambios existentes entre los valores programados y los calculados.

Las diferencias de potencia son utilizadas para calcular las corrientes de las barras para evaluar los elementos del jacobiano.

$$\begin{aligned}\Delta P_p^k &= P_{p(\text{calculada})} - P_p^k \\ \Delta Q_p^k &= Q_{p(\text{calculada})} - PQ_p^k & P=1, 2, \dots, n-1\end{aligned}\quad (2.32)$$

2.5.4 Método Newton-Raphson desacoplado rápido

Después de que se realizaron observaciones a los SEP funcionando en estado estable, se concluye que cuando ocurren pequeñas variaciones en el voltaje en una barra, la potencia activa en la misma no sufre un cambio significativo. Es el mismo caso para pequeñas variaciones del ángulo de fase no afecta significativamente la potencia reactiva. Esto nos muestra que existe una fuerte dependencia entre el ángulo del voltaje y la potencia activa, así como entre la magnitud del voltaje y la potencia reactiva de la barra. En estas observaciones se basa el método desacoplado de Newton-Raphson. [6]

Este principio solo es válido en sistemas donde $G_{ij} \ll B_{ij}$.

A partir de las ecuaciones del método Newton-Raphson en forma polar.

$$\frac{\Delta P}{\Delta Q} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}\quad (2.33)$$

Se eliminan las submatrices N y J de la jacobiana.

$$\frac{\Delta P}{\Delta Q} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}\quad (2.34)$$

Por el principio de desacoplamiento MW_0 / MVAR_V las submatrices N y J se pueden despreciar dando como resultado las siguientes ecuaciones. [7]

$$\begin{aligned}[\Delta P] &= [H][\Delta \theta] \\ [\Delta Q] &= [L][\Delta V/V] \\ H_{ij} &= L_{ij} = -V_i V_j (G_{ii} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i \neq j \\ H_{ii} &= -B_{ii} V_i^2 - Q_i \\ L_{ii} &= -B_{ii} V_i^2 + Q_i\end{aligned}\quad (2.35)$$

Se realizan las siguientes simplificaciones para poder hacer constante a la jacobiana:

- $B_{ii}V_i^2 \gg Q_i$
- $\sin\theta_{ij} \ll \cos\theta_{ij}$
- Para la jacobiana se considera la magnitud del voltaje a 1 p.u.

Por lo tanto

$$H_{ii} = -B_{ii} \quad (2.36)$$

$$H_{ij} = -B_{ij} \quad (2.37)$$

$$L_{ii} = -B_{ii} \quad (2.38)$$

$$L_{ij} = -B_{ij} \quad (2.39)$$

Por lo que las ecuaciones para resolver el sistema quedan de la siguiente forma:

$$[\Delta P] = [B'][\Delta\theta] \quad (2.40)$$

$$[\Delta Q] = [B''][\Delta V] \quad (2.41)$$

Donde B' y B'' son las matrices compuestas por los componentes de la parte imaginaria de la Ybarra. [6]

Este método engloba cuatro variantes que se especificaran a continuación:

BB: en esta variación las resistencias no son ignoradas en su totalidad y las susceptancias componen tanto la matriz B' como la matriz B''. [6]

XB: para el cálculo de la matriz B', las resistencias son ignoradas y solamente se utilizan las reactancias. Esta es la variante estándar para el método de Newton-Raphson desacoplado rápido y tiene una excelente convergencia. [6]

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [B'][\Delta\theta] \\ [\Delta Q] &= [J][\Delta V/V] \end{aligned} \quad (2.42)$$

BX: para esta variante, al contrario que en la versión anterior XB, en este caso, en el cálculo de B'' las resistencias son ignoradas. [6]

XX: las resistencias son ignoradas tanto para el cálculo de la matriz B' como para B'', dejando el cálculo solo con las susceptancias. [6]

2.6 Análisis de contingencias

2.6.1 Introducción.

Como mencionamos anteriormente, en un análisis de seguridad existen varios aspectos a tomar en cuenta, como las fallas en el sistema. Al momento de una falla que cause la salida de un elemento del sistema, el sistema se estabilizará y pasará a estar en un estado estable, en este estado estable la tensión cambiará, a veces saliendo de valores aceptables, afectando los parámetros existentes en el sistema, este estudio se llama análisis de contingencias, en este estudio se observan los parámetros eléctricos y se comparan con sus límites para encontrar los casos más críticos causados por estas fallas. Estos análisis requieren el cálculo de múltiples flujos de potencia, tanto en el estado planeado y actual del sistema, como en estado de emergencia (contingencias). [5]

El análisis de contingencias es una herramienta muy valiosa, que se utiliza para la realización de planeaciones confiables y poder operar de manera segura los SEP. Este estudio se basa en el análisis del sistema durante contingencias de salida de líneas, interrupción de la generación, etc. Durante las contingencias se presentan las dos respuestas del sistema, tanto transitoria como estable, y se pueden simular ambos, para el análisis de contingencias se considera solo el estado estable. [8]

En los análisis de seguridad que se utilizan para la planificación, el primer método utilizado para el análisis de contingencias en estado estable se realizó probando todas las contingencias secuencialmente, para poder evaluar el desempeño del sistema y su confiabilidad. Por lo que este análisis consiste en simular la salida de los elementos (contingencias), ya sean de una o más unidades generadoras, o de los elementos de transmisión, para así poder ver su comportamiento en las diferentes variables, como el voltaje de las barras, y los flujos de potencia en las líneas. Por la necesidad de mejora se han desarrollado técnicas más rápidas, como el método desacoplado rápido de flujos de carga de Stott, los flujos de carga linealizados de corriente alterna, etc. Al tratarse de pruebas exhaustivas que buscan simular todas las posibles contingencias en un sistema, hace que estas requieran grandes cantidades de tiempo y sean costosas, y esto solo considerando contingencias simples, lo que se vuelve peor agregando contingencias múltiples. Pero, por otro lado, el aplicar las pruebas a solo un conjunto de contingencias seleccionadas por medio de la experiencia y la intuición del planificador o el operador del sistema puede generar problemas debido a la omisión de casos críticos no seleccionados [9]. Esto nos muestra la importancia de contar con un método confiable de selección de contingencias.

Algunos de los métodos que existen son los que se plantearan a continuación:

2.6.2 Método de compensación

El teorema de compensación nos dice que, un elemento pasivo del sistema puede ser reemplazado por un elemento activo que cause el mismo efecto en el sistema. Esto quiere

decir que, en la formulación nodal de un sistema, una fuente de corriente puede reemplazar al efecto de una línea de transmisión sin cambiar los voltajes o las corrientes del sistema. Esto nos permite usar la factorización original de la matriz de admitancias para simular cambios en el sistema. [10]

2.6.3 Método flujos de potencia.

El análisis de contingencias al ser un método de análisis en el que se evalúan los flujos de potencia en condiciones de emergencias, donde uno o más de los elementos del sistema quedan fuera, por lo que se puede realizar utilizando uno de los métodos iterativos utilizados para la solución de flujos de potencia.

Este método es uno de los primeros que se utilizó para la realización de un análisis de contingencias. Al realizar este análisis por medio del estudio de flujos de potencia, de manera iterativa, se vuelve un método más lento, pero ganando precisión. Con las capacidades computacionales actuales, el tiempo que toma obtener el estudio se ha reducido.

Al ser el análisis de contingencias un conjunto de múltiples estudios de flujos de potencia, cualquier método que resuelva el problema de flujos de potencia es útil para este análisis.

2.6.4 Selección automática de contingencia

Debido a que las contingencias ocurren de manera aleatoria, lo más normal sería asignarle una probabilidad a cada contingencia y así poder obtener un intervalo de incertidumbre general de cada variable que nos interesa comparar, debido al efecto combinado de todas las contingencias según su probabilidad. Este es uno de los métodos descritos. [8]

El poder estimar y asignar la probabilidad de que ocurra una contingencia es una de las formas que se pueden tomar en cuenta para hacer que tome menos tiempo el realizar el estudio, colocar una importancia por la probabilidad de que ocurra una contingencia puede ser una herramienta muy útil.

Existen diferentes métodos para la realización de estudio de contingencias, cualquier método que calcule los flujos de potencia es un potencial método para desarrollar el análisis de contingencias, algunos de los cuales fueron previamente descritos. Uno de los más utilizados y que podría considerarse es el de corriente directa, pero que en el caso de sistemas de alta complejidad y diferentes mediciones un método tradicional como el de Newton-Raphson o Gauss-Seidel son más adecuados.

Las restricciones que se ponen a las barras de carga, generalmente se especifican en un rango superior e inferior. El límite superior de esta restricción es el valor máximo de tensión en el sistema, mientras que el límite inferior está dado por el valor de la tensión con la que ya no se puede alimentar a la carga. Por otro lado, las restricciones de los flujos de potencia están dados por los límites térmicos de los conductores, y en ocasiones por la estabilidad en líneas largas. Por estas restricciones se puede evaluar el desempeño del sistema, reflejando la severidad de los valores de voltaje o de la sobrecarga de las líneas, que resulta de una contingencia. Al definir los límites del desempeño del sistema en función

de los valores mencionados de tensión en las barras y de los flujos de potencia en las líneas, estas se de establecen como restricciones blandas, es decir, al sobrepasar los límites, si no es de manera excesiva, se pueden tolerar en periodos cortos de tiempo. En este sentido, este índice se puede ver como una función de penalización que puede ser severa al superar las restricciones. [9]

El índice de rendimiento del nivel de voltaje elegido para cuantificar la deficiencia del sistema debido a voltajes de bus fuera de límite se define como

$$PI_v = \sum_{i=1}^{NB} \frac{W_{V_i}}{2n} \left(\frac{|V_i| - |V_i^{SP}|}{\Delta V_i^{Lim}} \right)^{2n} \quad (2.43)$$

Donde

$|V_i|$ = magnitud del voltaje en la barra i

$|V_i^{SP}|$ = magnitud de voltaje especificado en la barra i

ΔV_i^{Lim} = Limite de desviación de voltaje

n = Exponente de penalización de función

NB = número de barras del sistema

W_{V_i} = Factor de ponderación real no negativo.

Capítulo 3 Resultados de los estudios de análisis de contingencias.

3.1 Introducción.

Existen varios métodos para realizar un estudio de análisis de contingencias, algunos de los métodos requieren que se refactorice la matriz de admitancias del sistema quitando la línea, para a continuación hacer el proceso iterativo para encontrar la solución a los flujos de potencia con las nuevas condiciones del sistema, y otros métodos donde se busca solo simular los cambios en el sistema partiendo del resultado de los flujos de potencia del caso base. El caso base nos indica los flujos de potencia y la tensión con las características en las que fue diseñado el sistema.

Puesto que los sistemas no están exentos de fallas en los elementos del mismo, así como de desconexión de los elementos para su mantenimiento, es importante el poder observar los flujos en condiciones de contingencias, observar los casos más críticos y así poder estar prevenidos o evitarlos.

La principal herramienta que un análisis de contingencias necesita es un método de solución para flujos de potencia, puesto que el análisis de contingencias es solo el conjunto de estudios de flujos de potencia bajo operación de contingencias o condiciones anormales, por lo que el primer método para la realización de un análisis de contingencias fue utilizando alguna de las múltiples formulaciones para resolver el problema de flujos de potencia.

Para este estudio se decidió utilizar diferentes métodos de flujos de potencia para realizar un análisis de contingencias, probando su precisión y su rapidez en la resolución de todas las contingencias simples (la salida de un solo elemento), realizando el programa en la versión de MATLAB R2022b.

3.2 Descripción del programa desarrollado.

Los pasos realizados para el desarrollo del programa de análisis de contingencias fueron los siguientes:

Primero. Se programaron los métodos de flujos de potencia Newton-Raphson y Newton-Raphson Desacoplado. Además, se cuenta con el programa del método de Gauss-Seidel de la rutina PrincipalV8, estos métodos son los que se utilizaron para la resolución de los flujos en su estado estable de contingencias.

Segundo. Se modificaron los archivos de los casos ya utilizados por el programa PrincipalV8 para adaptarlos a la utilización en este programa, donde se incluyó niveles de tensión, entre otros datos.

Tercero. Se realizó una rutina para la impresión de los resultados del estudio de flujos de potencia, esta rutina de resultados se inspiró en la utilizada en el programa de MATPOWER, donde se presenta de manera resumida los valores de magnitud y ángulo de

la tensión, así como los flujos que se presentan en las líneas y los valores totales de estos valores, los cuales nos dan una idea general del sistema.

Cuarto. Se crea un resumen de resultados nuevo, en este resumen se busca solo obtener los valores de tensión de las líneas que sobrepasen los límites establecidos por el usuario en el programa, estos valores están establecidos en 1.05 y .95 pu, de magnitud en cada bus, esta impresión de resultados la dará por cada caso colocado.

Quinto. Se modificaron los métodos de resolución de flujos de potencia para su utilización en el programa de análisis de contingencias, principalmente en un método para quitar las líneas del sistema.

Sexto. Se creó el programa de análisis de contingencias de manera separada para cada uno de los métodos, creando cuatro características principales.

Caso 1. Flujos de potencia. Corre el caso seleccionado en su caso base, sin quitar ninguna línea, e imprime el resultado obtenido.

Caso 2. Se especifica una línea que se desea quitar para la realización de flujos de potencia en ese caso específico de contingencia, e impidiendo el resumen del resultado de las barras que salieron de los límites establecidos. Esta característica del programa nos ayuda a poder determinar los valores del sistema en una contingencia previamente vista, ya sea porque se tiene identificada plenamente como un riesgo alto en el sistema, o porque se dese quitar para ver su comportamiento específico ante este estado de contingencia.

Caso 3. El programa saca las líneas una por una, haciendo el proceso de resolución de flujos de potencia para ese caso, para imprimir los valores de las líneas que sobrepasen los límites establecidos y pasara a la siguiente línea para repetir el proceso. Este caso nos ayuda a hacer un estudio de análisis de contingencias completo, mostrándonos todos los posibles casos de contingencias simples (de una sola línea por vez) en el sistema, con esto podemos determinar el estado completo del sistema e identificar los peores casos por la cantidad de barras que salen de los límites establecidos, o por la magnitud que se separan del rango.

Caso 4. Este último caso nos secciona el sistema en niveles de tensión, para solo quitar las líneas de este nivel de tensión y mostrarnos los resultados de las contingencias para esa sección específica. Esto para hacer el análisis de contingencias en un solo nivel de tensión, puesto que, en sistemas grandes, en ocasiones te interesa solo una porción del sistema, en lugar de todo el sistema, y así es más fácil el analizar los resultados de estas contingencias.

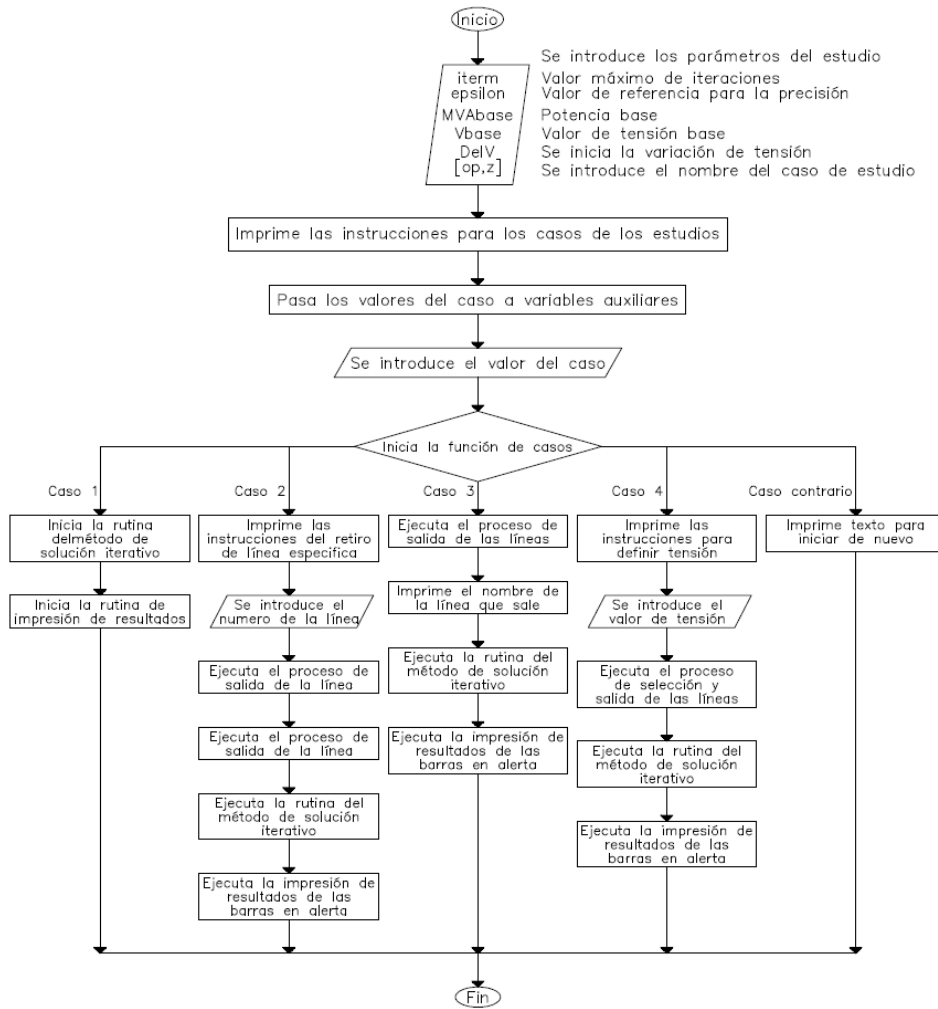


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa de análisis de contingencias.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo del programa de análisis de contingencias, con el cual se pueden realizar los diferentes casos de estudio que se mencionaran a continuación, este programa puede utilizar cualquiera de los métodos mencionados en la ejecución de la rutina del método de solución iterativo, entre los tres métodos anteriormente mencionados, en el caso de Gauss-Seidel se agrega un valor inicial de alfa, para la aceleración de la solución del resultado.

Tabla 3.1 Métodos de solución para el análisis de contingencias y sus programas.

Número	Nombre del método.	Descripción general.	Nombre carpeta.
1	Newton-Raphson.	MATPOWER es un programa de licencia open source en lenguaje de MATLAB para simular sistemas de potencia en estado estable, desarrollado por Power Systems Engineering Research Center.	MATPOWER3.2
2	Newton-Raphson.	Análisis de contingencias utilizando el método iterativo de Newton-Raphson.	AnaliCon Newton-Raphson
3	Gauss-Seidel	Análisis de contingencias utilizando el método iterativo de Gauss-Seidel.	AnaliCont GaussSeidel
4	Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB	Análisis de contingencias utilizando el método iterativo de Newton-Raphson Desacoplado Rápido en su variante estándar más útil XB	AnaliCon NRD XB

La tabla 3.1 nos muestra los programas desarrollados para el análisis de contingencias y para la comprobación de los resultados, resolviendo los caos de estudio que en la siguiente sección se mencionaran.

3.3 Descripción de los casos de estudio.

Para realizar la rutina de análisis de contingencias se utilizaron diferentes sistemas de pruebas para poder comparar y observar el funcionamiento del programa. Estos sistemas al ser de pruebas han sido utilizados para la comprobación de diferentes métodos, implementación de diferentes programas, y los parámetros y resultados han sido documentados ampliamente.

Tabla 3.2Casos de estudio.

Sistema	Descripción general.
1	Sistema de Prueba de libro Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Dr Stevenson, 5 barras-caso, incluye transformador
2	Sistema de prueba de 30 barras IEEE
3	Sistema de prueba de 57 barras IEEE
4	Sistema de prueba de 118 barras IEEE

La tabla 3.2 nos muestra los cuatro casos de estudio que se observaran en este trabajo, tres de estos sistemas son tomados del IEEE y el primero de ellos es de un libro, uno de los más utilizados en sistemas eléctricos de potencia.

Estos casos de estudio se describirán de manera completa en el anexo A, en donde se incluirá la información del diagrama unifilar, una tabla con la información de operación del

sistema y una segunda tabla con la información de las impedancias de los elementos del sistema.

Tabla 3.3 Resumen de los datos de los sistemas de prueba

Sistema	Número de buses	Número de líneas	Número de generadores	Número de cargas	Nombre del archivo
1	5	6	1	3	caso5nodosT
2	30	41	5	20	caso7
3	57	80	3	42	caso10
4	118	186	18	98	caso11

En la tabla 3.3 se muestra de manera resumida las características de los sistemas de prueba que se utilizaron para mostrar las capacidades de este programa.

3.4 Resultados de la solución de flujos de potencia.

La parte fundamental del método del programa de análisis de contingencias es la resolución de flujos de potencia, por lo que, para comprobar los resultados obtenidos por los métodos programados, se decidió comparar con el programa MATPOWER3.2, mostrando a continuación los resultados obtenidos, contrastados en el primer caso de 5 barras, contando con los valores a dos decimales de ambos programas.

En las tablas que se mostraran a continuación se retiraron una cantidad de resultados, de las barras del 16-36, con la intención de hacer que las tablas tengan menos información y sean más fáciles de observar.

Los resultados completos de ambos estudios se anexaron en el anexo B.

Tabla 3.4 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el programa MATPOWER.

Barra	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.04	0	478.66	128.85	55	17
2	1.01	-1.188	0	-0.75	3	88
3	0.985	-5.988	40	-0.9	41	21
4	0.981	-7.337	-	-	-	-
5	0.976	-8.546	-	-	13	4
6	0.98	-8.674	0	0.87	75	2
7	0.984	-7.601	-	-	-	-
8	1.005	-4.478	450	62.1	150	22

9	0.98	-9.585	0	2.29	121	26
10	0.986	-11.45	-	-	5	2
11	0.974	-10.193	-	-	-	-
12	1.015	-10.471	310	128.63	377	24
13	0.979	-9.804	-	-	18	2.3
14	0.97	-9.35	-	-	10.5	5.3
15	0.988	-7.19	-	-	22	5
46	1.06	-11.116	-	-	-	-
47	1.033	-12.512	-	-	29.7	11.6
48	1.027	-12.611	-	-	-	-
49	1.036	-12.936	-	-	18	8.5
50	1.023	-13.413	-	-	21	10.5
51	1.052	-12.533	-	-	18	5.3
52	0.98	-11.498	-	-	4.9	2.2
53	0.971	-12.253	-	-	20	10
54	0.996	-11.71	-	-	4.1	1.4
55	1.031	-10.801	-	-	6.8	3.4
56	0.968	-16.065	-	-	7.6	2.2
57	0.965	-16.584	-	-	6.7	2
		Total:	1278.66	321.08	1250.8	336.4

En la tabla 3.4 se nos muestra los resultados obtenidos de flujos de potencia obtenidos del programa MATPOWER3.2 para el caso de 30 barras del sistema 2, en su caso base, utilizando el método de resolución de Newton-Raphson y con una tolerancia de 1×10^{-8} en potencia le tomo 3 iteraciones y solo 0.07 segundos obtener el resultado.

Tabla 3.5 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Newton-Raphson.

Barra	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.04	0	479.26	129.83	55	17
2	1.01	-1.189	0	-0.75	3	88
3	0.985	-5.993	40	7.37	41	21
4	0.978	-7.293	0	0	0	0
5	0.976	-8.544	0	0	13	4
6	0.98	-8.69	0	6.01	75	2

7	0.982	-7.588	0	0	0	0
8	1.005	-4.498	450	65.39	150	22
9	0.98	-9.617	0	6.86	121	26
10	0.986	-11.488	0	0	5	2
11	0.973	-10.215	0	0	0	0
12	1.015	-10.501	310	130.75	377	24
13	0.978	-9.82	0	0	18	2.3
14	0.969	-9.36	0	0	10.5	5.3
15	0.987	-7.195	0	0	22	5
46	1.057	-11.145	0	0	0	0
47	1.029	-12.54	0	0	29.7	11.6
48	1.023	-12.628	0	0	0	0
49	1.033	-12.975	0	0	18	8.5
50	1.021	-13.459	0	0	21	10.5
51	1.051	-12.584	0	0	18	5.3
52	0.968	-11.219	0	0	4.9	2.2
53	0.955	-11.828	0	0	20	10
54	0.987	-11.542	0	0	4.1	1.4
55	1.028	-10.853	0	0	6.8	3.4
56	0.964	-16.065	0	0	7.6	2.2
57	0.96	-16.576	0	0	6.7	2
		Total:	1279.26	345.45	1250.8	336.4

En la tabla 3.5 se nos muestra los resultados de flujos de potencia para el sistema 3 de 57 barras en el caso base por el método de Newton-Raphson con una tolerancia de 1×10^{-5} en potencia, convergiendo en 3 iteraciones y le toma 0.135 segundos obtener el resultado.

Tabla 3.6 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Gauss-Seidel.

Barra	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.04	0	479.26	129.83	55	17
2	1.01	-1.189	0	-0.75	3	88
3	0.985	-5.993	40	7.37	41	21
4	0.978	-7.293	0	0	0	0
5	0.976	-8.543	0	0	13	4
6	0.98	-8.689	0	6.01	75	2
7	0.982	-7.588	0	0	0	0
8	1.005	-4.498	450	65.39	150	22
9	0.98	-9.617	0	6.86	121	26
10	0.986	-11.488	0	0	5	2
11	0.973	-10.215	0	0	0	0
12	1.015	-10.5	310	130.75	377	24
13	0.978	-9.82	0	0	18	2.3
14	0.969	-9.36	0	0	10.5	5.3
15	0.987	-7.195	0	0	22	5
46	1.057	-11.144	0	0	0	0
47	1.029	-12.54	0	0	29.7	11.6
48	1.023	-12.628	0	0	0	0
49	1.033	-12.975	0	0	18	8.5
50	1.021	-13.459	0	0	21	10.5
51	1.051	-12.584	0	0	18	5.3
52	0.968	-11.219	0	0	4.9	2.2
53	0.955	-11.828	0	0	20	10
54	0.987	-11.542	0	0	4.1	1.4
55	1.028	-10.853	0	0	6.8	3.4
56	0.964	-16.064	0	0	7.6	2.2
57	0.96	-16.576	0	0	6.7	2
		Total:	1279.26	345.45	1250.8	336.4

En la tabla 3.6 se nos muestra los resultados de flujos de potencia para el sistema 3 de 57 barras en el caso base por el método de Gauss-Seidel con una tolerancia de 1×10^{-6} en potencia, convergiendo en 166 iteraciones y le toma 0.254 segundos obtener el resultado.

Tabla 3.7 Resultados del programa para el sistema 3 realizado por el método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.

Barra	Voltaje		Generación		Carga	
	#	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.04	0	479.26	129.83	55	17
2	1.01	-1.189	0	-0.75	3	88
3	0.985	-5.993	40	7.37	41	21
4	0.978	-7.293	0	0	0	0
5	0.976	-8.544	0	0	13	4
6	0.98	-8.69	0	6.01	75	2
7	0.982	-7.588	0	0	0	0
8	1.005	-4.498	450	65.39	150	22
9	0.98	-9.617	0	6.86	121	26
10	0.986	-11.488	0	0	5	2
11	0.973	-10.215	0	0	0	0
12	1.015	-10.501	310	130.75	377	24
13	0.978	-9.82	0	0	18	2.3
14	0.969	-9.36	0	0	10.5	5.3
15	0.987	-7.195	0	0	22	5
46	1.057	-11.145	0	0	0	0
47	1.029	-12.54	0	0	29.7	11.6
48	1.023	-12.628	0	0	0	0
49	1.033	-12.975	0	0	18	8.5
50	1.021	-13.459	0	0	21	10.5
51	1.051	-12.584	0	0	18	5.3
52	0.968	-11.219	0	0	4.9	2.2
53	0.955	-11.828	0	0	20	10
54	0.987	-11.542	0	0	4.1	1.4
55	1.028	-10.853	0	0	6.8	3.4
56	0.964	-16.065	0	0	7.6	2.2
57	0.96	-16.576	0	0	6.7	2
		Total:	1279.26	345.45	1250.8	336.4

En la tabla 3.7 se nos muestra los resultados de flujos de potencia para el sistema 3 de 57 barras en el caso base por el método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido versión XB con una tolerancia de 1×10^{-5} en potencia, convergiendo en 58 iteraciones y le toma 0.075 segundos obtener el resultado.

Tabla 3.8 Comparación entre los diferentes métodos de solución de flujos de potencia.

Sistema	Método 1				Método 2				Método 3				Método 4			
	iter	t	Error		iter	t	Error		iter	t	Error		iter	t	Error	
			V	Ang			V	Ang			V	Ang			V	Ang
1	4	0.07	0	0	3	0.103	0.06	2.30	26	0.101	0.06	2.30	4	0.098	0.06	2.30
2	3	0.04	0	0	3	0.071	0.01	0.15	171	0.136	0.01	0.15	12	0.05	0.01	0.15
3	3	0.02	0	0	3	0.054	0.05	0.03	166	0.235	0.05	0.03	58	0.073	0.05	0.03
4	4	0.02	0	0	26	0.303	0.06	1.18	1060	4.245	0.06	1.17	6	0.337	0.06	1.18

En la tabla 3.8 se nos muestra las comparaciones entre los diferentes métodos de solución para la parte de flujos de potencia en comparación con los valores obtenidos de la referencia de MATPOWER3.2. La comparación se hace con dos criterios, la velocidad de resolución y la cantidad de iteraciones, aunque este último depende mucho del método de solución, en el caso de Gauss-Seidel siempre van a ser más iteraciones.

3.5 Simulación de contingencias por salida de una línea.

Para la resolución del estudio de análisis de contingencias, se realizó a través de la modificación de los parámetros introducidos a la matriz de admitancias, quitando la información de la línea que se va a simular la salida introduciendo un estado de contingencia en el sistema, para después proceder a la solución de los flujos de potencia a través de un método iterativo. El método iterativo nos dará valores más precisos para la solución de flujos de potencia, pero generalmente esto lleva un costo computacional, el cual en tiempos actuales con las computadoras que se tienen, en sistemas pequeños, como los sistemas utilizados en este trabajo, tienden a ser una mínima diferencia.

Para mostrar los resultados del análisis de contingencias, se mostrarán los resultados de los sistemas seleccionados de manera resumida, solo mostrando algunos de los valores de tensión de las barras en la salida de algunas líneas, de manera resumida, los resultados completos se mostrarán en el Anexo B.

3.5.1 Salida de una línea seleccionada.

Como se mencionó anteriormente, la segunda de las características del programa o el caso dos, es la de seleccionar la línea que se desea quitar para simular la contingencia causada por la salida de esa línea. Para la comprobación de dicha característica, se utiliza el programa MATPOWER3.2

Se quito la línea 22 – 23, esta línea se seleccionó por la cantidad de barras que saca de los límites establecidos, siendo esta la que más afecta a todo el sistema, 9 de las barras salen de su límite, a continuación, se mostrarán los resultados resumidos de todos los sistemas.

Tabla 3.9 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, MATPOWER3.2 (Newton-Raphson).

Barra	Voltaje	
	Mag(pu)	#
10	1.05	4.962
20	0.935	-23.919
21	0.92	-25.153
22	0.914	-25.758
25	1.05	-1.028
53	0.946	-15.837
66	1.05	-2.698
76	0.943	-8.108
118	0.949	-7.923

En la tabla 3.9 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar la línea 22-23 del sistema 4 de 118 barras utilizando el programa MATPOWER3.2, el resultado es dado en 4 iteraciones y le tomo al programa 0.07 segundos, la línea se sacó del cálculo de manera manual, entrando a los datos del caso y poniendo la línea como un comentario para que no fuera tomada por el programa.

Tabla 3.10 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Newton-Raphson.

Barra	Voltaje	
	Mag(pu)	#
10	1.05	4.962
20	0.935	-23.919
21	0.92	-25.153
22	0.914	-25.758

25	1.05	-1.028
53	0.946	-15.837
66	1.05	-2.698
76	0.943	-8.108
118	0.949	-7.923

En la tabla 3.10 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar la línea 22-23 del sistema 4 de 118 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Newton-Raphson, el resultado es dado en 26 iteraciones y le tomo al programa 1.68 segundos.

Tabla 3.11 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Gauss-Seidel.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
10	1.05	4.962
20	0.935	-23.919
21	0.92	-25.153
22	0.914	-25.757
25	1.05	-1.027
53	0.946	-15.837
76	0.943	-8.108
118	0.949	-7.923

En la tabla 3.11 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar la línea 22-23 del sistema 4 de 118 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Gauss-Seidel, el resultado es dado en 1304 iteraciones y le tomo al programa 6.80 segundos.

Tabla 3.12 Resultados del sistema 4, salida de la línea 22-23, Análisis de contingencias Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
10	1.05	5.849
25	1.05	-1.836
53	0.946	-15.563
66	1.05	-2.443
76	0.943	-8.208

118	0.949	-8.064
-----	-------	--------

En la tabla 3.12 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar la línea 22-23 del sistema 4 de 118 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Newton-Raphson Desacoplado Rápido, el resultado es dado en 6 iteraciones y le tomo al programa 1.6 segundos.

Para el caso de estudio del sistema 4, el método estándar del método Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB tiene problemas para la convergencia, por lo que se utilizó la formulación del método Newton-Raphson Desacoplado Rápido BX, el cual tiene una mejor convergencia para este tipo de casos.

3.5.2 Salida de todas las líneas, una por vez.

Para la tercera característica, de acuerdo a lo descrito anteriormente, se realiza el estudio completo del análisis de contingencias simple, sacando una línea por vez, todas las líneas, con esto se muestra los valores de tensión de las barras que salen del rango establecido, mostrando así, de manera más completa los posibles fallos del sistema en contingencia. Para la comprobación de dicha característica, se utiliza el programa MATPOWER3.2

Al ser un estudio muy extenso, con múltiples resultados por cada línea que sale, se utilizó el sistema 1 de 5 barras para mostrar esta característica, con la finalidad de mostrar la menor cantidad de tablas que puedan perder la finalidad de este trabajo.

Tabla 3.13 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando MATPOWER.

Barra #	Voltaje	
	Mag(pu)	#
Sale línea 1 - 2		
2	0.923	-8.475
4	0.9	-10.863
Sale línea 1 - 4		
2	0.913	-7.822
4	0.792	-19.784
Sale línea 1 - 5		
4	0.922	-10.289
Sale línea 2 - 3		
2	0.772	-15.631
4	0.796	-15.844
Sale línea 2 - 4		

4	0.842	-15.191
Sale línea 3 - 5		
2	0.946	3.027
4	0.918	-4.011
5	0.939	-6.597

En la tabla 3.13 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada línea del sistema 1 de 5 barras utilizando el programa MATPOWER3.2, las líneas se sacaron de manera manual poniendo como comentario cada línea, una por vez y anotando los resultados para pasar a la siguiente línea. Estos resultados serán utilizados como comparación.

Tabla 3.14 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Newton-Raphson.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 1 - 2		
2	0.923	-8.475
4	0.9	-10.863
Sale línea 1 - 4		
2	0.913	-7.822
4	0.792	-19.784
Sale línea 1 - 5		
4	0.922	-10.289
Sale línea 2 - 3		
2	0.772	-15.631
4	0.796	-15.844
Sale línea 2 - 4		
4	0.842	-15.191
Sale línea 3 - 5		
2	0.946	3.027
4	0.918	-4.011
5	0.939	-6.597

En la tabla 3.14 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 1 de 5 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Newton-Raphson, el primer resultado es dado en 3

iteraciones, el segundo resultado es dado en 4 iteraciones, el tercer resultado es dado en 3 iteraciones, el cuarto resultado es dado en 3 iteraciones, el quinto resultado es dado en 4 iteraciones, el sexto resultado es dado en 3 iteraciones y le tomo al programa 0.3 segundos.

Tabla 3.15 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Gauss-Seidel.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 1 - 2		
2	0.923	-8.474
4	0.9	-10.863
Sale línea 1 - 4		
2	0.913	-7.822
4	0.792	-19.785
Sale línea 1 - 5		
4	0.922	-10.289
Sale línea 2 - 3		
2	0.772	-15.631
4	0.796	-15.844
Sale línea 2 - 4		
Se alcanzó el número máximo de iteraciones		
Sale línea 3 - 5		
2	0.946	3.027
4	0.918	-4.011
5	0.939	-6.597

En la tabla 3.15 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 1 de 5 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB, con una precisión de 1×10^{-5} , el primer resultado es dado en 4 iteraciones, el segundo resultado es dado en 10 iteraciones, el tercer resultado es dado en 4 iteraciones, el cuarto resultado es dado en 9 iteraciones, el quinto resultado es dado en 7 iteraciones, el sexto resultado es dado en 4 iteraciones y le tomo al programa 0.12 segundos.

Tabla 3.16 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias simple completo utilizando el método Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 1 - 2		
2	0.923	-8.475
4	0.9	-10.863
Sale línea 1 - 4		
2	0.913	-7.822
4	0.792	-19.784
Sale línea 1 - 5		
4	0.922	-10.289
Sale línea 2 - 3		
2	0.772	-15.631
4	0.796	-15.844
Sale línea 2 - 4		
4	0.842	-15.191
Sale línea 3 - 5		
2	0.946	3.027
4	0.918	-4.011
5	0.939	-6.597

En la tabla 3.16 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 1 de 5 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Gauss-Seidel, con una precisión de 1×10^{-5} , el primer resultado es dado en 31 iteraciones, el segundo resultado es dado en 46 iteraciones, el tercer resultado es dado en 42 iteraciones, el cuarto resultado es dado en 132 iteraciones, el quinto alcanzo el número máximo de iteraciones sin dar resultado, el sexto resultado es dado en 58 iteraciones y le tomo al programa 0.26 segundos.

En esta tercera característica también se le agrego una subrutina para graficar los resultados obtenidos, de esta forma se tiene de forma visual los resultados y de manera aún más reducida. El numero de la línea esta nombrado en el orden de salida, si la primera línea que sale es la línea 1-2 entonces esa línea se le nombra como línea 1, el resumen donde se imprimen estos resultados, en las que se nombra la línea, después se coloca de que barra a que barra está conectada, el bus afectado para finalmente imprimir los resultados de tensión para esa barra que salió de rango de tensión es en archivo denominado "Impresion1.m". Además de graficar indica cual ha sido la contingencia más severa, esta

contingencia seria la que más barras saco de su rango aceptable de tensión al momento de salir.

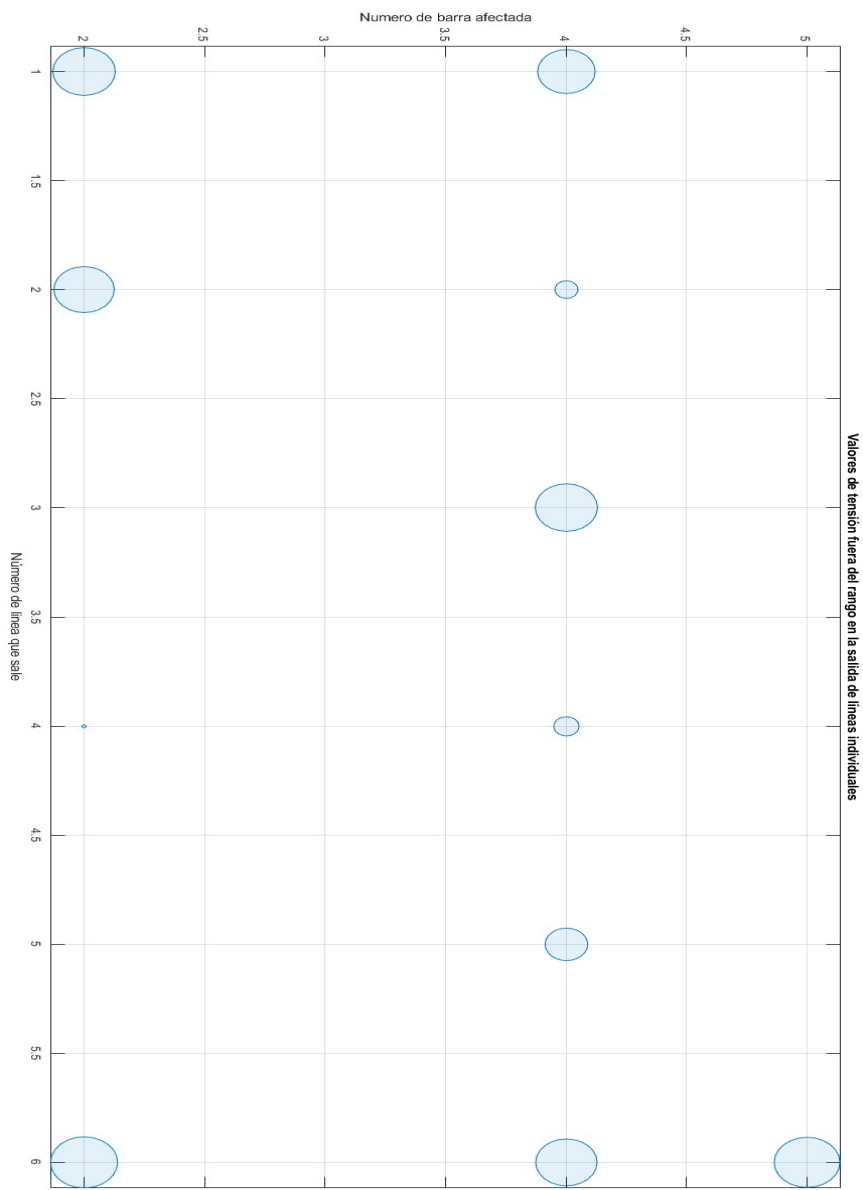


Figura 3.3 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 1.

En la gráfica de la figura 3.2 se muestra los resultados del análisis de contingencias simple para el sistema 1 de 5 barras, esta gráfica muestra el conjunto de los resultados. En el eje de las ordenadas se muestra el número de barra que sale del rango establecido, mientras que en el eje de las abscisas se muestra el número de la barra que es retirada simulando la contingencia. En esta gráfica se hace evidente que las barras dos y cuatro son las más probables a salir de rango por una contingencia en el sistema, en estas barras solo se tienen cargas conectadas sin generación.

Otra observación que se puede hacer sobre esta gráfica es el hecho de que la contingencia más severa es la salida de la línea 6, de barra 3 a barra 5 (3-5), y otras un poco menos severas son las salidas de las líneas 1 (1-2), 2 (1-4) y 4 (2-3).

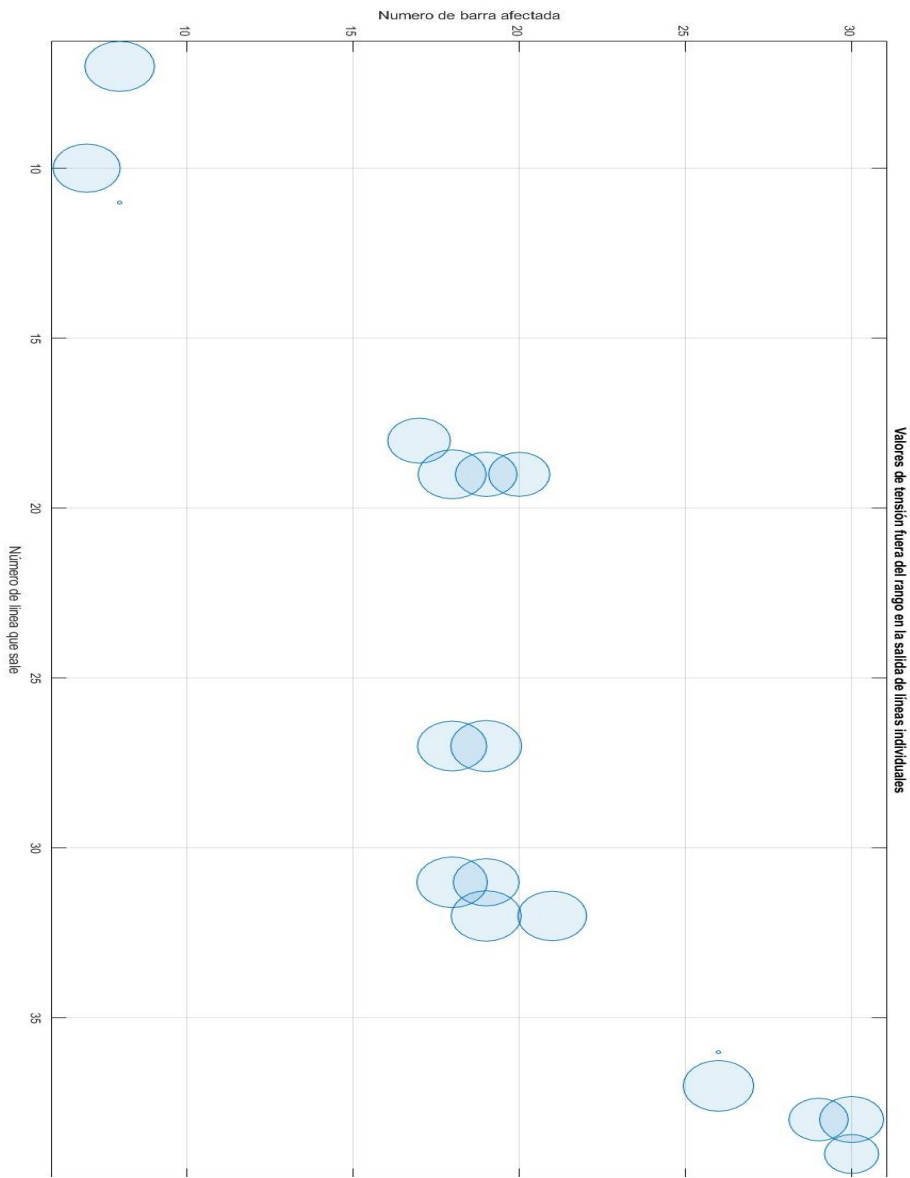


Figura 3.4 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 2.

En la gráfica de la figura 3.3 se muestra los resultados del análisis de contingencias simple para el sistema 2 de 30 barras, esta gráfica muestra el conjunto de los resultados. En esta gráfica se hace evidente que las barras 18, 19 y 30 son las más probables a salir de rango por una contingencia en el sistema, en estas barras solo se tienen cargas conectadas sin generación.

En esta gráfica también nos da la información de la contingencia más severa, la cual es la salida de la línea 19 (10-20), y otras un poco menos severas son las salidas de las líneas 27 (15-18), 31 (19-20), 38 (27-29) y 32 (21-22).

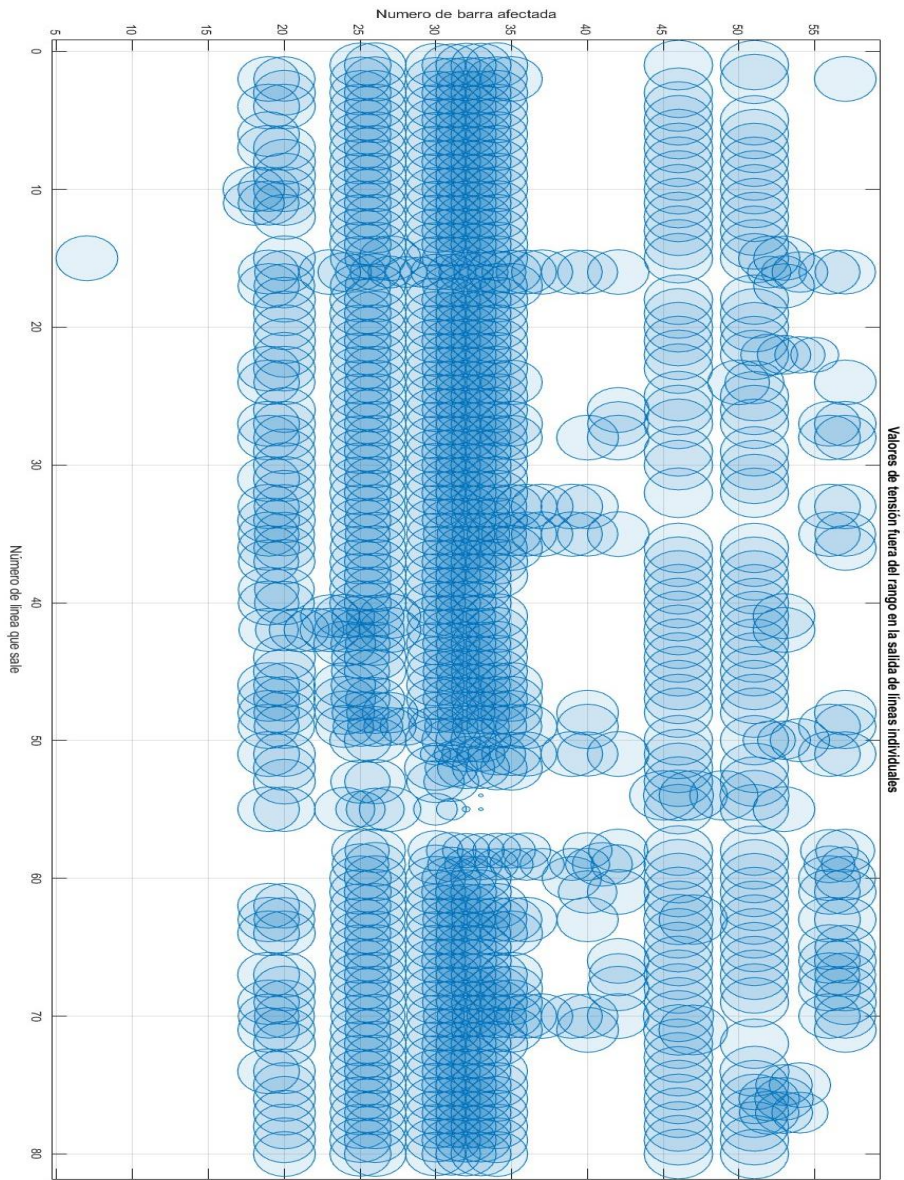


Figura 3.5 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 3.

En la gráfica de la figura 3.4 se muestra los resultados del análisis de contingencias simple para el sistema 3 de 57 barras, esta gráfica muestra el conjunto de los resultados. En esta gráfica se hace evidente que las barras 19, 20, 25, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 46, 51, 56 y 57 son las más probables a salir de rango por una contingencia en el sistema, en las barras 19, 20, 25, 30, 31, 32, 35, 51, 56 y 57, solo se tienen cargas conectadas, en las barras 26, 34 y 46, no se tiene nada conectado.

Además, cuando salen las líneas 16, de barra 7 a barra 26 (7-26), 33 (13-49), 35 (14-46), 51 (25-30), 58 (36-37), 59 (37-38), 63 (38-48) y 70 (46-47), se pueden considerar como las contingencias más severas, puesto que en esta contingencia salen la mayor cantidad de barras fuera del rango.

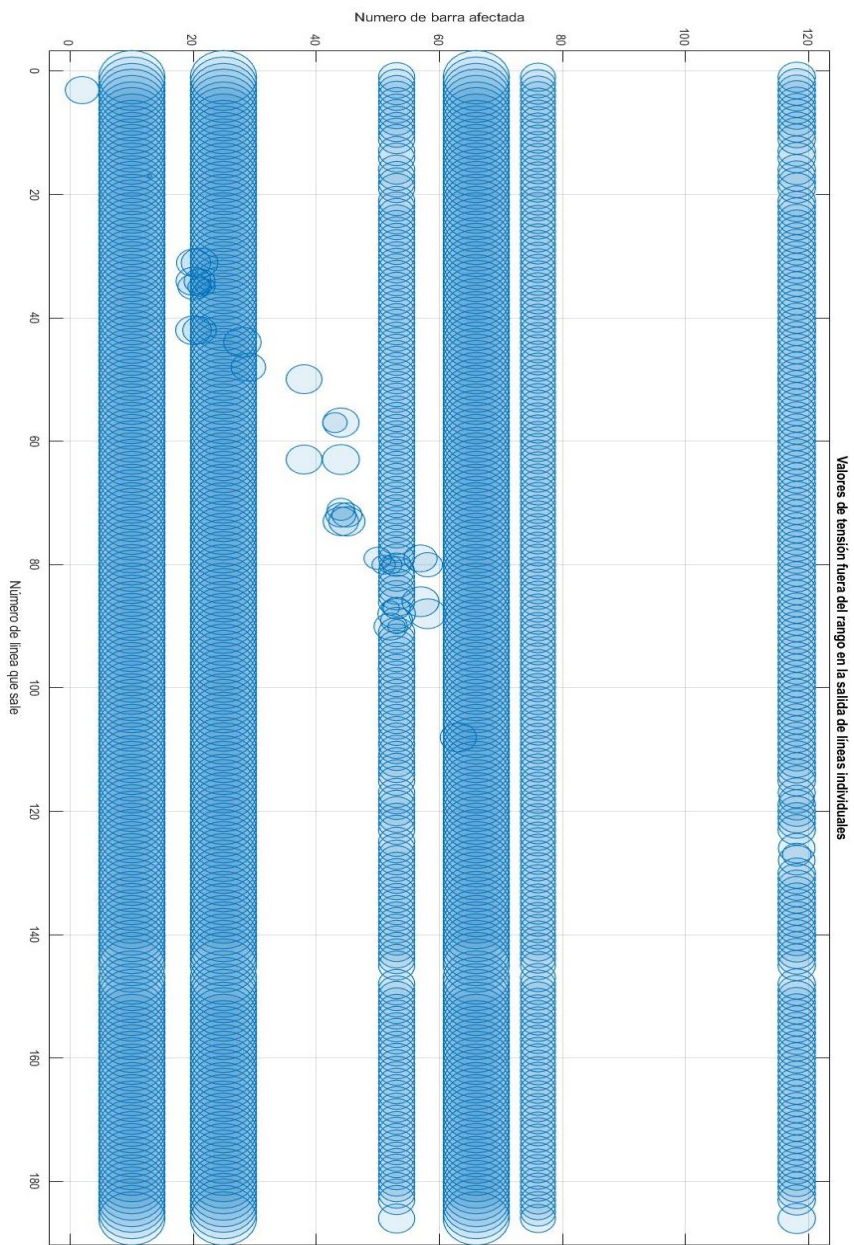


Figura 3.6 Gráfica del análisis de contingencias simple completo del sistema 4.

En la gráfica de la figura 3.5 se muestra los resultados del análisis de contingencias simple para el sistema 4 de 118 barras, esta gráfica muestra el conjunto de los resultados del estudio. En la figura se hace evidente que las barras 10, 25, 53, 66, 76 y 118 son las más probables a salir de rango por una contingencia en el sistema, en las barras 10, 25, 66 se tiene conectado un generador y en las barras 53, 76 y 118 solo se tiene conectada una carga.

En esta gráfica también nos da la información de la contingencia más severa, la cual es la salida de la línea 12 (8-9), y otras un poco menos severas son las salidas de las líneas 31 (19-20), 34 (21-22), 35 (22-23), 42 (26-30), 57 (34-43), 63 (38-65), 72 (44-45), 73 (45-49) y 80 (49-51).

3.5.3 Salida de las líneas por nivel de tensión.

En la cuarta característica, se divide el sistema por niveles de tensión, de acuerdo a que parte del sistema se desea analizar, se realiza un estudio de análisis de contingencias en esa parte específica del sistema, se identifica cada línea por el nivel de tensión en el que se encuentra la barra a la que está conectada y se saca la línea de manera individual, para después pasar a mostrar los resultados de las barras que salieron del rango establecido. Para la comprobación de dicha característica, se utiliza el programa MATPOWER3.2 identificando las líneas que salieron de acuerdo al nivel de tensión y sacando cada una de manera individual, obteniendo el estudio completo de flujos de potencia.

Dependiendo del sistema que se desee probar, se obtendrán muchos resultados, en este caso se utilizó el sistema 2 de 30 barras, puesto que no cuenta con muchas líneas, además que tiene especificado varios niveles de tensión a diferencia del sistema de 57 barras, el nivel de tensión que se probara es de 132 kV.

Tabla 3.17 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando MATPOWER.

Barra	Voltaje	
	Mag(pu)	#
Sale línea 4 - 6		
8	0.948	-4.179
Sale línea 6 - 7		
7	0.941	-4.346
Sale línea 6 - 8		
8	0.864	-5.943

En la tabla 3.17 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez de acuerdo al nivel de tensión seleccionado en el sistema 2 de 30 barras, utilizando el programa MATPOWER3.2.

En esta tabla solo se muestran algunos de los resultados del estudio de manera ilustrativa, para no colocar todos los resultados del estudio y llenar demasiado de información esta sección, por lo que en este muestreo solo se tomaron las salidas que muestran barras que se salen del rango.

Tabla 3.18 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Newton-Raphson.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 4 - 6		
8	0.947	-4.179
Sale línea 6 - 7		
7	0.941	-4.343
Sale línea 6 - 8		
8	0.864	-5.943

En la tabla 3.18 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 2 de 30 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Newton-Raphson, con una precisión de 1×10^{-5} , el primer resultado de la salida de la línea 4-6 es dado en 3 iteraciones, el segundo resultado de la salida de la línea 6-7 es dado en 3 iteraciones, el tercer resultado de la salida de la línea 6-8 es dado en 3 iteraciones y le tomo al programa 1.216 segundos.

Tabla 3.19 Resultados del sistema 1, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Gauss-Seidel.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 4 - 6		
8	0.947	-4.179
Sale línea 6 - 7		
7	0.941	-4.343
Sale línea 6 - 8		
8	0.864	-5.943

En la tabla 3.19 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 2 de 30 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Gauss-Seidel, con una precisión de 1×10^{-5} , el primer resultado de la salida de la línea 4-6 es dado en 191 iteraciones, el segundo resultado de la salida de la línea 6-7 es dado en 173 iteraciones, el tercer resultado de la salida de la línea 6-8 es dado en 170 iteraciones y le tomo al programa 4.82 segundos.

Tabla 3.20 Resultados del sistema 2, Análisis de contingencias por nivel de tensión utilizando el método Newton-Raphson Desacoplado Rápido XB.

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	#
Sale línea 4 - 6		
8	0.947	-4.179
Sale línea 6 - 7		
7	0.941	-4.343
Sale línea 6 - 8		
8	0.864	-5.943

En la tabla 3.19 se muestra los valores de magnitud de tensión que salen del rango establecido al sacar cada una de las líneas por vez del sistema 2 de 30 barras utilizando el programa Análisis de contingencias Gauss-Seidel, con una precisión de 1×10^{-5} , el primer resultado de la salida de la línea 4-6 es dado en 11 iteraciones, el segundo resultado de la salida de la línea 6-7 es dado en 12 iteraciones, el tercer resultado de la salida de la línea 6-8 es dado en 12 iteraciones y le tomo al programa 1.54 segundos.

Capítulo 4 Conclusiones y trabajos futuros.

4.1 Conclusiones.

Resumiendo, en los capítulos anteriores se mostraron los métodos de solución para flujos de potencia, con los cuales se puede realizar los análisis de contingencias al simular la salida de una línea modificando la matriz de admitancias, a partir de esta consideración se utiliza alguno de los métodos de solución iterativo de flujos de potencia para obtener la solución. Existen métodos no iterativos para los estudios de análisis de contingencias, en los que utilizando el caso base de flujos de potencia, en el que se asume que todos los elementos están conectados y en servicio, para simular en estas condiciones los cambios provocados por las salidas de algún elemento del sistema sin tener que cambiar la matriz de admitancias, lo que provoca un menor uso de los recursos computacionales, esto que antes era una restricción por las pocas capacidades computacionales, perdiendo precisión para ganar rapidez. Esto ya no es un problema con las capacidades computacionales actuales, por lo que se optó por el método más preciso.

Para continuar, se crearon varios programas, uno por cada método seleccionado, comparando los tres métodos seleccionados se puede decir que los tres tienen precisiones comparables con la de la referencia, el cual es por el programa MATPOWER3.2 con el método de Newton Raphson. En cuestión del tiempo, el método de Gauss-Seidel se queda muy por detrás siendo con diferencia el método más lento, mientras que entre el método de Newton-Raphson y el método Newton-Raphson Desacoplado Rápido no existe una diferencia significativa para los sistemas que se probaron, se esperaba que el segundo fuera significativamente más rápido, además tiene el problema de que no resuelve de manera efectiva todos los sistemas en su versión XB la cual es la estándar para resolver flujos de potencia, en el caso de 118 barras se utilizó la versión BX que es más apta para solucionar sistemas con relaciones X/R más grandes, lo anterior se realizó sin el uso de técnicas para matrices dispersas.

Las características mostradas del programa, y ya mencionadas anteriormente, son las siguientes:

- Flujos de potencia en su caso base. Para poder tener la referencia del sistema en su caso base, de tal forma que se puede comparar el comportamiento del mismo sistema.
- Salida de una línea seleccionada. Esta característica se realizó para observar el comportamiento de un sistema al sacar una línea específica, ya sea porque se identificó como un punto débil del sistema o por una salida programada, por mantenimiento.
- Salida de todas las líneas en contingencias sencillas. Esta es la característica que más información sobre contingencias nos podrá dar, puesto que prueba todas las líneas del sistema y nos da los valores que salen del rango aceptable, además nos imprime la gráfica de los resultados para tener una forma más resumida de los resultados, imprimiendo los resultados en un archivo previamente nombrado como Impresion1.m en el que se nombran las líneas por orden de salida, para

finalmente imprimir el resultado sobre la salida de la línea que causo que más barras salieran de su rango aceptable.

- Salida de todas las líneas en contingencias sencillas en un rango de tensión específico. Con esta característica se puede seccionar el sistema en sus diferentes niveles de tensión y poder solo hacer en el análisis de contingencias en una sola sección, en caso de sistemas muy grandes se puede dividir en sus niveles de tensión y analizarlos de manera más sencilla y separada.

Finalmente se puede afirmar que este programa logra su objetivo, se logra hacer análisis de contingencias con cierta rapidez, al tener múltiples características y formas diferentes de realizar un análisis de contingencias sencillo es más didáctico, además que se pueden comprobar resultados con las diferentes funciones, otra de las características que los hace útil para los estudiantes es la gráfica de resultados al hacer un análisis de contingencias completo, y al usar los métodos iterativos para resolver el problema de flujos de potencia es útil para analizar estos diferentes métodos de solución, observando el impacto que tienen las salidas de las líneas en todo el sistema. Además, al no existir programas gratuitos con estas características, este programa logra ser una buena alternativa.

4.2 Trabajos futuros.

Como todos los trabajos de investigación y tesis, este proviene de un trabajo más grande, por lo que aún queda mucho por lograr. Dentro de este tema quedaron muchas posibilidades de mejora, que a pesar de conocerse no se pudieron implementar por la falta de tiempo o porque se salía del objetivo principal de este tema, algunas de estas partes se pudieron implementar para hacer el programa más completo, y algunas para adaptar más funciones que den información relevante.

Algunos de los trabajos futuros que se pueden realizar para complementar este trabajo se presentaran a continuación:

- Juntar todos los métodos aquí presentados en un solo programa con la posibilidad de utilizar cualquiera de ellos para realizar los análisis de contingencias, o en el caso del método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, pueda cambiar entre las tres variantes para resolver de mejor manera el sistema.
- Agregar más funciones para discriminar partes del sistema en las que se quiere realizar el análisis, como por zona o área.
- Hacer un método no iterativo, con el propósito de una mejor comparativa entre los dos métodos, además de considerarse de menor tiempo de ejecución, aunque menor precisión, aun puede ser una alternativa adecuada para agregar a un programa general.
- Análisis de los sistemas con criterios de salidas múltiples de líneas (con dos o más salidas de líneas).
- Introducir un algoritmo de clasificación de contingencias, en las que por diferentes criterios se clasifique las contingencias de más crítica a menos crítica para la estabilidad del sistema.

Además, algunos de los temas que aún se pueden implementar para mejorar este trabajo, más relacionados a trabajos previos, pero que potencialmente mejorarían también este tema, son los que se presentan a continuación:

- Agregar el efecto de elementos como bancos de capacitores y de reactores para resolver flujos de potencia.
- Implementar una subrutina que permita que los límites operativos de los generadores se consideren.

Referencias

- [1] SENER, Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional, Ciudad de México: SENER, 2022.
- [2] A. Degl'Innocenti, J. Salcedo, E. Hollman, P. Britos, R. García-Martínez y B. Rossi, «SISTEMA EXPERTO EN ANÁLISIS DE FALLAS EN LÍNEAS ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN,» 17 septiembre 2008. [En línea]. Available: <http://laboratorios.fi.uba.ar/lisi/rgm/articulos/R-ITBA-29-sistemaselectricos.pdf>. [Último acceso: mayo 24 2022].
- [3] K. Nara, K. Tanaka, H. Kodama, R. R. Shoultz, M. S. Chen, P. Van Olinda y D. Bertagnolli, «ON-LINE CONTINGENCY SELECTION ALGORITHM FOR VOLTAGE SECURITY ANALYSIS,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. %1 de %2PAS-104, nº 4, pp. 847-856, 1985.
- [4] J. J. Grainger y William D. Stevenson Jr., Análisis de sistemas de potencia, Estado de México: McGRAW-HILL, 1996.
- [5] G. W. Stagg y A. H. El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis, New York: McGraw-Hill Kogakusha, 1986.
- [6] E. R. Telenema Yanez, SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MÉTODOS COMPLETOS, DESACOPLADOS Y LINEALIZADOS, Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, 2019.
- [7] M. A. MIRABAL GARCIA, ANALISIS DE SEGURIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA EN ESTADO ESTABLE, MEXICO, D. F.: INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL DIRECCIÓN DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA ESIME, 1985.
- [8] F. Aboytes, STOCHASTIC CONTINGENCY ANALYSIS, México D. F.: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978.
- [9] B. F. Wollenberg y G. C. Ejebe, AUTOMATIC CONTINGENCY SELECTION, New York: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979.
- [10] W. F. Tinney, «COMPENSATION METHODS FOR NETWORK SOLUTIONS BY OPTIMALLY ORDERED TRIANGULAR FACTORIZATION,» *PICA Conference*, vol. I, nº 71, pp. 123-127, 1971.
- [11] J. E. VILLA MOYA, UBICACION ÓPTIMA DE LOS PMU EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA., Quito, Ecuador: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO, 2015.
- [12] T. A. Mikolinnas y B. F. Wollenberg, AN ADVANCED CONTINGENCY SELECTION ALGORITHM, New York: IEEE, 1981.

[13] J. IZQUIERDO FRANCO, ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA Y ANALISIS DE FALLAS EN, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA DIVISION ESTUDIOS DE POSTGRADO, 2002.

[14] P. VALERO ESPARZA, COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA ANTE COLAPSO DE VOLTAJE, SAN NICOLAS DE LAS GARZAS, N. L.: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO, 2001.

Anexo A Descripción de los sistemas de prueba.

Sistema de pruebas de 5 barras [7]

Sistema de Prueba de libro Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Dr. Stevenson, 5 barras-caso, incluye transformador.

Comentado [IAP2]: Mejorar la figura

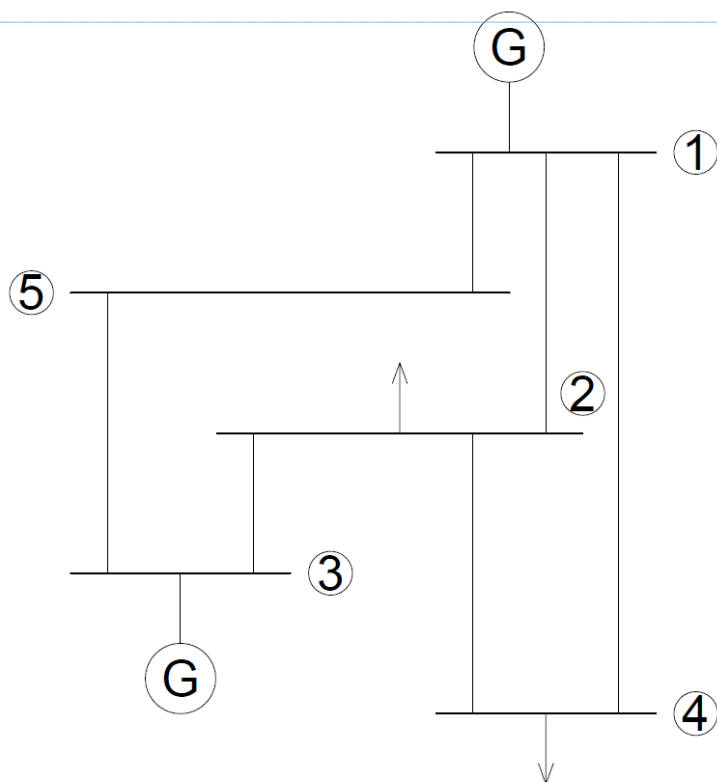


Figura 10 Diagrama unifilar sistema 1.

```

function [op,z] = caso5nodosT
%Bus tipo Ein PG QG PD QD kVbase
op =
[ 1 3 1.02 0 0 0 0 1
 2 1 1 0 0 60 30 1
 3 2 1.04 100 0 0 0 1
 4 1 1 0 0 40 10 1
 5 1 1 0 0 60 20 1];
%Desde hacia R X Ypq a estado
Z =
[ 1 2 0.10 0.40 0 0 1
 1 4 0.15 0.60 0 0 1
 1 5 0.05 0.20 0 0 1
 2 3 0.05 0.20 0 0 1
 2 4 0.10 0.40 0 0 1
 3 5 0.05 0.20 0 0 1];
return

```

Sistema de prueba de 30 barras IEEE [11]

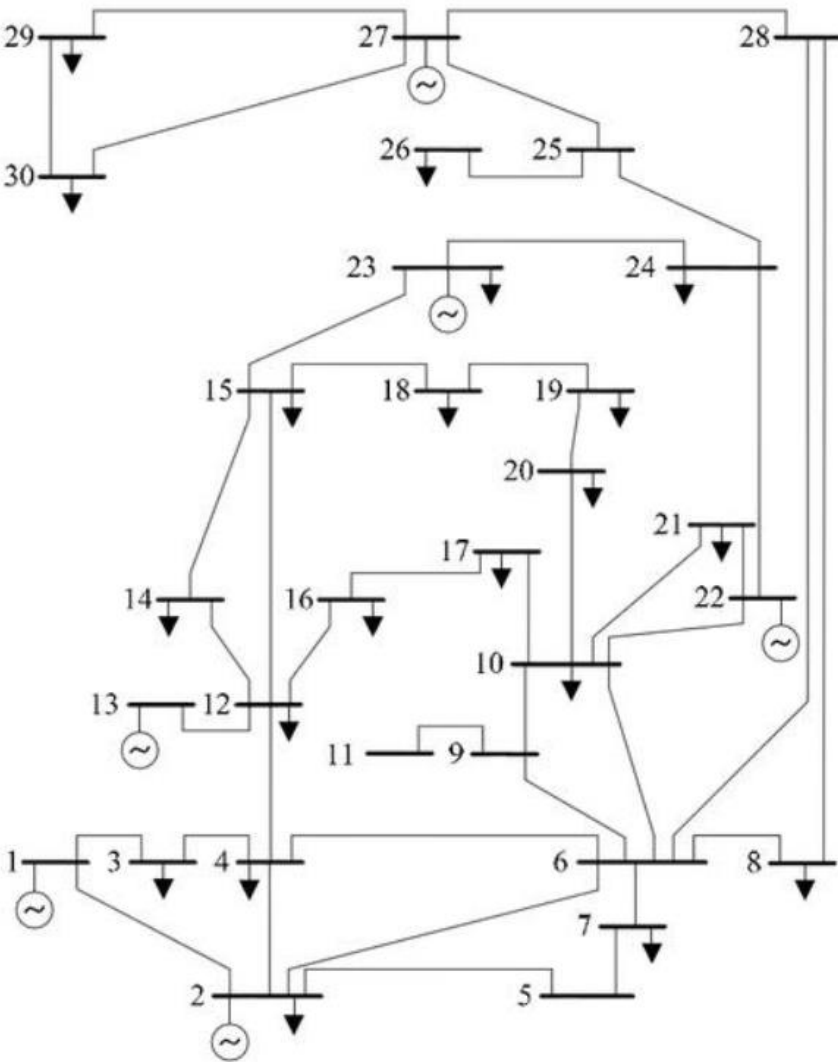


Figura 11 Diagrama unifilar sistema 2.

function [op,z] = caso7

op =

```
[ 1 3 1 0 0 0 0 132
 2 2 1 60.97 0 21.7 12.7 132
 3 1 1 0 0 2.4 1.2 132
 4 1 1 0 0 7.6 1.6 132
 5 1 1 0 0 0 0 132
 6 1 1 0 0 0 0 132
 7 1 1 0 0 22.8 10.9 132
 8 1 1 0 0 30 30 132
 9 1 1 0 0 0 0 1
10 1 1 0 0 5.8 2 33
11 1 1 0 0 0 0 11
12 1 1 0 0 11.2 7.5 33
13 2 1 37 0 0 0 11
14 1 1 0 0 6.2 1.6 33
15 1 1 0 0 8.2 2.5 33
16 1 1 0 0 3.5 1.8 33
17 1 1 0 0 9 5.8 33
18 1 1 0 0 3.2 0.9 33
19 1 1 0 0 9.5 3.4 33
20 1 1 0 0 2.2 0.7 33
21 1 1 0 0 17.5 11.2 33
22 2 1 21.59 0 0 0 33
23 2 1 19.2 0 3.2 1.6 33
24 1 1 0 0 8.7 6.7 33
25 1 1 0 0 0 0 33
26 1 1 0 0 3.5 2.3 33
27 2 1 26.91 0 0 0 33
28 1 1 0 0 0 0 132
29 1 1 0 0 2.4 0.9 33
30 1 1 0 0 10.6 1.9 33];
```

z =

```
[ 1 2 0.02 0.06 0.03 0 1
 1 3 0.05 0.19 0.02 0 1
 2 4 0.06 0.17 0.02 0 1
 2 5 0.05 0.2 0.02 0 1
 2 6 0.06 0.18 0.02 0 1
 3 4 0.01 0.04 0 0 1
 4 6 0.01 0.04 0 0 1
 4 12 0 0.26 0 0 1
 5 7 0.05 0.12 0.01 0 1
 6 7 0.03 0.08 0.01 0 1
 6 8 0.01 0.04 0 0 1
 6 9 0 0.21 0 0 1
 6 10 0 0.56 0 0 1
 6 28 0.02 0.06 0.01 0 1
 8 28 0.06 0.2 0.02 0 1
 9 10 0 0.11 0 0 1
 9 11 0 0.21 0 0 1
```

10	17	0.03	0.08	0	0	1
10	20	0.09	0.21	0	0	1
10	21	0.03	0.07	0	0	1
10	22	0.07	0.15	0	0	1
12	13	0	0.14	0	0	1
12	14	0.12	0.26	0	0	1
12	15	0.07	0.13	0	0	1
12	16	0.09	0.2	0	0	1
14	15	0.22	0.2	0	0	1
15	18	0.11	0.22	0	0	1
15	23	0.1	0.2	0	0	1
16	17	0.08	0.19	0	0	1
18	19	0.06	0.13	0	0	1
19	20	0.03	0.07	0	0	1
21	22	0.01	0.02	0	0	1
22	24	0.12	0.18	0	0	1
23	24	0.13	0.27	0	0	1
24	25	0.19	0.33	0	0	1
25	26	0.25	0.38	0	0	1
25	27	0.11	0.21	0	0	1
27	29	0.22	0.42	0	0	1
27	30	0.32	0.6	0	0	1
28	27	0	0.4	0	0	1
29	30	0.24	0.45	0	0	1];

return;

Sistema de prueba de 57 barras IEEE [11]

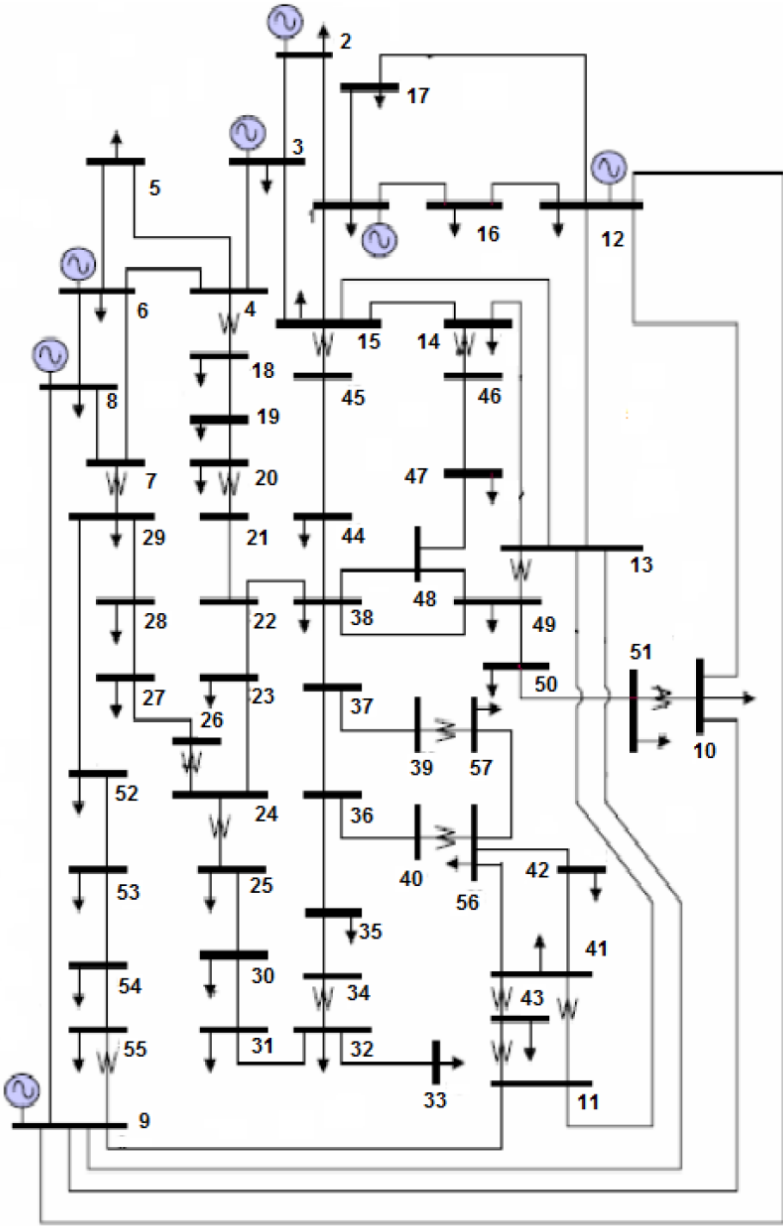


Figura 12 Diagrama unifilar sistema 3.

function [op,z] = caso10

op =

[	1	3	1.04	0	0	55	17	1
	2	2	1.01	0	0	3	88	1
	3	2	0.985	40	0	41	21	1
	4	1	1	0	0	0	0	1
	5	1	1	0	0	13	4	1
	6	2	0.98	0	0	75	2	1
	7	1	1	0	0	0	0	1
	8	2	1.005	450	0	150	22	1
	9	2	0.98	0	0	121	26	1
	10	1	1	0	0	5	2	1
	11	1	1	0	0	0	0	1
	12	2	1.015	310	0	377	24	1
	13	1	1	0	0	18	2.3	1
	14	1	1	0	0	10.5	5.3	1
	15	1	1	0	0	22	5	1
	16	1	1	0	0	43	3	1
	17	1	1	0	0	42	8	1
	18	1	1	0	0	27.2	9.8	1
	19	1	1	0	0	3.3	0.6	1
	20	1	1	0	0	2.3	1	1
	21	1	1	0	0	0	0	1
	22	1	1	0	0	0	0	1
	23	1	1	0	0	6.3	2.1	1
	24	1	1	0	0	0	0	1
	25	1	1	0	0	6.3	3.2	1
	26	1	1	0	0	0	0	1
	27	1	1	0	0	9.3	0.5	1
	28	1	1	0	0	4.6	2.3	1
	29	1	1	0	0	17	2.6	1
	30	1	1	0	0	3.6	1.8	1
	31	1	1	0	0	5.8	2.9	1
	32	1	1	0	0	1.6	0.8	1
	33	1	1	0	0	3.8	1.9	1
	34	1	1	0	0	0	0	1
	35	1	1	0	0	6	3	1
	36	1	1	0	0	0	0	1
	37	1	1	0	0	0	0	1
	38	1	1	0	0	14	7	1
	39	1	1	0	0	0	0	1
	40	1	1	0	0	0	0	1
	41	1	1	0	0	6.3	3	1
	42	1	1	0	0	7.1	4.4	1
	43	1	1	0	0	2	1	1
	44	1	1	0	0	12	1.8	1
	45	1	1	0	0	0	0	1
	46	1	1	0	0	0	0	1
	47	1	1	0	0	29.7	11.6	1
	48	1	1	0	0	0	0	1

49	1	1	0	0	18	8.5	1
50	1	1	0	0	21	10.5	1
51	1	1	0	0	18	5.3	1
52	1	1	0	0	4.9	2.2	1
53	1	1	0	0	20	10	1
54	1	1	0	0	4.1	1.4	1
55	1	1	0	0	6.8	3.4	1
56	1	1	0	0	7.6	2.2	1
57	1	1	0	0	6.7	2	1];

z =

[	1	2	0.0083	0.028	0.129	0	1
	1	15	0.0178	0.091	0.0988	0	1
	1	16	0.0454	0.206	0.0546	0	1
	1	17	0.0238	0.108	0.0286	0	1
	2	3	0.0298	0.085	0.0818	0	1
	3	4	0.0112	0.0366	0.038	0	1
	3	15	0.0162	0.053	0.0544	0	1
	4	5	0.0625	0.132	0.0258	0	1
	4	6	0.043	0.148	0.0348	0	1
	4	18	0	0.555	0	0.97	1
	4	18	0	0.43	0	0.978	1
	5	6	0.0302	0.0641	0.0124	0	1
	6	7	0.02	0.102	0.0276	0	1
	6	8	0.0339	0.173	0.047	0	1
	7	8	0.0139	0.0712	0.0194	0	1
	7	29	0	0.0648	0	0.967	1
	8	9	0.0099	0.0505	0.0548	0	1
	9	10	0.0369	0.1679	0.044	0	1
	9	11	0.0258	0.0848	0.0218	0	1
	9	12	0.0648	0.295	0.0772	0	1
	9	13	0.0481	0.158	0.0406	0	1
	9	55	0	0.1205	0	0.94	1
	10	12	0.0277	0.1262	0.0328	0	1
	10	51	0	0.0712	0	0.93	1
	11	13	0.0223	0.0732	0.0188	0	1
	11	41	0	0.749	0	0.955	1
	11	43	0	0.153	0	0.958	1
	12	13	0.0178	0.058	0.0604	0	1
	12	16	0.018	0.0813	0.0216	0	1
	12	17	0.0397	0.179	0.0476	0	1
	13	14	0.0132	0.0434	0.011	0	1
	13	15	0.0269	0.0869	0.023	0	1
	13	49	0	0.191	0	0.895	1
	14	15	0.0171	0.0547	0.0148	0	1
	14	46	0	0.0735	0	0.9	1
	15	45	0	0.1042	0	0.955	1
	18	19	0.461	0.685	0	0	1
	19	20	0.283	0.434	0	0	1
	21	20	0	0.7767	0	1.043	1
	21	22	0.0736	0.117	0	0	1

Comentado [IAP3]: Los números no tienen espacio.....

22	23	0.0099	0.0152	0	0	1	
22	38	0.0192	0.0295	0	0	1	
23	24	0.166	0.256	0.0084	0	1	
24	25	0	1.182	0	0	1	
24	25	0	1.23	0	0	1	
24	26	0	0.0473	0	1.043	1	
26	27	0.165	0.254	0	0	1	
27	28	0.0618	0.0954	0	0	1	
28	29	0.0418	0.0587	0	0	1	
29	52	0.1442	0.187	0	0	1	
25	30	0.135	0.202	0	0	1	
30	31	0.326	0.497	0	0	1	
31	32	0.507	0.755	0	0	1	
32	33	0.0392	0.036	0	0	1	
34	32	0	0.953	0	0.975	1	
34	35	0.052	0.078	0	.0032	0	1
35	36	0.043	0.0537	0.0016	0	1	
36	37	0.029	0.0366	0	0	1	
37	38	0.0651	0.1009	0.002	0	1	
37	39	0.0239	0.0379	0	0	1	
36	40	0.03	0.0466	0	0	1	
38	44	0.0289	0.0585	0.002	0	1	
38	48	0.0312	0.0482	0	0	1	
38	49	0.115	0.177	0.003	0	1	
39	57	0	1.355	0	0.98	1	
40	56	0	1.195	0	0.958	1	
41	42	0.207	0.352	0	0	1	
41	43	0	0.412	0	0	1	
44	45	0.0624	0.1242	0.004	0	1	
46	47	0.023	0.068	0.0032	0	1	
47	48	0.0182	0.0233	0	0	1	
48	49	0.0834	0.129	0.0048	0	1	
49	50	0.0801	0.128	0	0	1	
50	51	0.1386	0.22	0	0	1	
52	53	0.0762	0.0984	0	0	1	
53	54	0.1878	0.232	0	0	1	
54	55	0.1732	0.2265	0	0	1	
56	41	0.553	0.549	0	0	1	
56	42	0.2125	0.354	0	0	1	
56	57	0.174	0.26	0	0	1];	

return

Sistema de prueba de 118 barras IEEE [11]

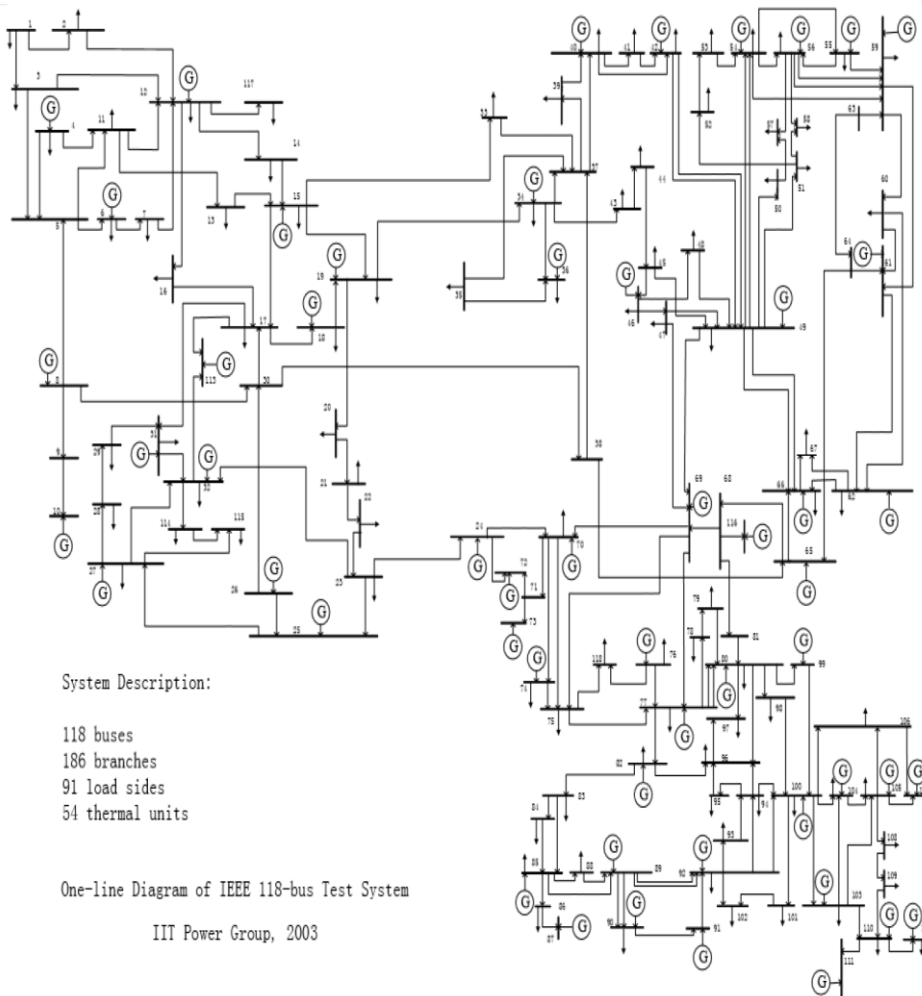


Figura 13 Diagrama unifilar sistema 4.

function [op,z] = caso11

op =

1	2	0.955	0	0	51	27	138
2	1	1	0	0	20	9	138
3	1	1	0	0	39	10	138
4	2	0.998	0	0	39	12	138

5	1	1	0	0	0	0	138
6	2	0.99	0	0	52	22	138
7	1	1	0	0	19	2	138
8	2	1.015	0	0	28	0	345
9	1	1	0	0	0	0	345
10	2	1.05	450	0	0	0	345
11	1	1	0	0	70	23	138
12	2	0.99	85	0	47	10	138
13	1	1	0	0	34	16	138
14	1	1	0	0	14	1	138
15	2	0.97	0	0	90	30	138
16	1	1	0	0	25	10	138
17	1	1	0	0	11	3	138
18	2	0.973	0	0	60	34	138
19	2	0.962	0	0	45	25	138
20	1	1	0	0	18	3	138
21	1	1	0	0	14	8	138
22	1	1	0	0	10	5	138
23	1	1	0	0	7	3	138
24	2	0.992	0	0	13	0	138
25	2	1.05	220	0	0	0	138
26	2	1.015	314	0	0	0	345
27	2	0.968	0	0	71	13	138
28	1	1	0	0	17	7	138
29	1	1	0	0	24	4	138
30	1	1	0	0	0	0	345
31	2	0.967	7	0	43	27	138
32	2	0.964	0	0	59	23	138
33	1	1	0	0	23	9	138
34	2	0.984	0	0	59	26	138
35	1	1	0	0	33	9	138
36	2	0.98	0	0	31	17	138
37	1	1	0	0	0	0	138
38	1	1	0	0	0	0	345
39	1	1	0	0	27	11	138
40	2	0.97	0	0	66	23	138
41	1	1	0	0	37	10	138
42	2	0.985	0	0	96	23	138
43	1	1	0	0	18	7	138
44	1	1	0	0	16	8	138
45	1	1	0	0	53	22	138
46	2	1.005	19	0	28	10	138
47	1	1	0	0	34	0	138
48	1	1	0	0	20	11	138
49	2	1.025	204	0	87	30	138
50	1	1	0	0	17	4	138
51	1	1	0	0	17	8	138
52	1	1	0	0	18	5	138
53	1	1	0	0	23	11	138
54	2	0.955	48	0	113	32	138
55	2	0.952	0	0	63	22	138

56	2	0.954	0	0	84	18	138
57	1	1	0	0	12	3	138
58	1	1	0	0	12	3	138
59	2	0.985	155	0	277	113	138
60	1	1	0	0	78	3	138
61	2	0.995	160	0	0	0	138
62	2	0.998	0	0	77	14	138
63	1	1	0	0	0	0	345
64	1	1	0	0	0	0	345
65	2	1.005	391	0	0	0	345
66	2	1.05	392	0	39	18	138
67	1	1	0	0	28	7	138
68	1	1	0	0	0	0	345
69	3	1.035	0	0	0	0	138
70	2	0.984	0	0	66	20	138
71	1	1	0	0	0	0	138
72	2	0.98	0	0	12	0	138
73	2	0.991	0	0	6	0	138
74	2	0.958	0	0	68	27	138
75	1	1	0	0	47	11	138
76	2	0.943	0	0	68	36	138
77	2	1.006	0	0	61	28	138
78	1	1	0	0	71	26	138
79	1	1	0	0	39	32	138
80	2	1.04	477	0	130	26	138
81	1	1	0	0	0	0	345
82	1	1	0	0	54	27	138
83	1	1	0	0	20	10	138
84	1	1	0	0	11	7	138
85	2	0.985	0	0	24	15	138
86	1	1	0	0	21	10	138
87	2	1.015	4	0	0	0	161
88	1	1	0	0	48	10	138
89	2	1.005	607	0	0	0	138
90	2	0.985	0	0	163	42	138
91	2	0.98	0	0	10	0	138
92	2	0.993	0	0	65	10	138
93	1	1	0	0	12	7	138
94	1	1	0	0	30	16	138
95	1	1	0	0	42	31	138
96	1	1	0	0	38	15	138
97	1	1	0	0	15	9	138
98	1	1	0	0	34	8	138
99	2	1.01	0	0	42	0	138
100	2	1.017	252	0	37	18	138
101	1	1	0	0	22	15	138
102	1	1	0	0	5	3	138
103	2	1.01	40	0	23	16	138
104	2	0.971	0	0	38	25	138
105	2	0.965	0	0	31	26	138
106	1	1	0	0	43	16	138

107	2	0.952	0	0	50	12	138
108	1	1	0	0	2	1	138
109	1	1	0	0	8	3	138
110	2	0.973	0	0	39	30	138
111	2	0.98	36	0	0	0	138
112	2	0.975	0	0	68	13	138
113	2	0.993	0	0	6	0	138
114	1	1	0	0	8	3	138
115	1	1	0	0	22	7	138
116	2	1.005	0	0	184	0	138
117	1	1	0	0	20	8	138
118	1	1	0	0	33	15	138];

z =							
[	1	2	0.0303	0.0999	0.0254	0	1
	1	3	0.0129	0.0424	0.01082	0	1
	2	12	0.0187	0.0616	0.01572	0	1
	3	5	0.0241	0.108	0.0284	0	1
	3	12	0.0484	0.16	0.0406	0	1
	4	5	0.00176	0.00798	0.0021	0	1
	4	11	0.0209	0.0688	0.01748	0	1
	5	6	0.0119	0.054	0.01426	0	1
	5	11	0.0203	0.0682	0.01738	0	1
	6	7	0.00459	0.0208	0.0055	0	1
	7	12	0.00862	0.034	0.00874	0	1
	8	9	0.00244	0.0305	1.162	0	1
	8	5	0	0.0267	0	0.985	1
	8	30	0.00431	0.0504	0.514	0	1
	9	10	0.00258	0.0322	1.23	0	1
	11	12	0.00595	0.0196	0.00502	0	1
	11	13	0.02225	0.0731	0.01876	0	1
	12	14	0.0215	0.0707	0.01816	0	1
	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	0	1
	12	117	0.0329	0.14	0.0358	0	1
	13	15	0.0744	0.2444	0.06268	0	1
	14	15	0.0595	0.195	0.0502	0	1
	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	0	1
	15	19	0.012	0.0394	0.0101	0	1
	15	33	0.038	0.1244	0.03194	0	1
	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	0	1
	17	18	0.0123	0.0505	0.01298	0	1
	17	31	0.0474	0.1563	0.0399	0	1
	17	113	0.00913	0.0301	0.00768	0	1
	18	19	0.01119	0.0493	0.01142	0	1
	19	20	0.0252	0.117	0.0298	0	1
	19	34	0.0752	0.247	0.0632	0	1
	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	0	1
	21	22	0.0209	0.097	0.0246	0	1
	22	23	0.0342	0.159	0.0404	0	1
	23	24	0.0135	0.0492	0.0498	0	1
	23	25	0.0156	0.08	0.0864	0	1

23	32	0.0317	0.1153	0.1173	0	1
24	70	0.00221	0.4115	0.10198	0	1
24	72	0.0488	0.196	0.0488	0	1
26	25	0	0.0382	0	0.96	1
26	30	0.00799	0.086	0.908	0	1
25	27	0.0318	0.163	0.1764	0	1
27	28	0.01913	0.0855	0.0216	0	1
27	32	0.0229	0.0755	0.01926	0	1
27	115	0.0164	0.0741	0.01972	0	1
28	29	0.0237	0.0943	0.0238	0	1
29	31	0.0108	0.0331	0.0083	0	1
30	17	0	0.0388	0	0.96	1
30	38	0.00464	0.054	0.422	0	1
31	32	0.0298	0.0985	0.0251	0	1
32	113	0.0615	0.203	0.0518	0	1
32	114	0.0135	0.0612	0.01628	0	1
33	37	0.0415	0.142	0.0366	0	1
34	36	0.00871	0.0268	0.00568	0	1
34	37	0.00256	0.0094	0.00984	0	1
34	43	0.0413	0.1681	0.04226	0	1
35	36	0.00224	0.0102	0.00268	0	1
35	37	0.011	0.0497	0.01318	0	1
37	39	0.0321	0.106	0.027	0	1
37	40	0.0593	0.168	0.042	0	1
38	37	0	0.0375	0	0.935	1
38	65	0.00901	0.0986	1.046	0	1
39	40	0.0184	0.0605	0.01552	0	1
40	41	0.0145	0.0487	0.01222	0	1
40	42	0.0555	0.183	0.0466	0	1
41	42	0.041	0.135	0.0344	0	1
42	49	0.0715	0.323	0.086	0	1
42	49	0.0715	0.323	0.086	0	1
43	44	0.0608	0.2454	0.06068	0	1
44	45	0.0224	0.0901	0.0224	0	1
45	46	0.04	0.1356	0.0332	0	1
45	49	0.0684	0.186	0.0444	0	1
46	47	0.038	0.127	0.0316	0	1
46	48	0.0601	0.189	0.0472	0	1
47	49	0.0191	0.0625	0.01604	0	1
47	69	0.0844	0.2778	0.07092	0	1
48	49	0.0179	0.0505	0.01258	0	1
49	50	0.0267	0.0752	0.01874	0	1
49	51	0.0486	0.137	0.0342	0	1
49	54	0.073	0.289	0.0738	0	1
49	54	0.0869	0.291	0.073	0	1
49	66	0.018	0.0919	0.0248	0	1
49	66	0.018	0.0919	0.0248	0	1
49	69	0.0985	0.324	0.0828	0	1
50	57	0.0474	0.134	0.0332	0	1
51	52	0.0203	0.0588	0.01396	0	1
51	58	0.0255	0.0719	0.01788	0	1

52	53	0.0405	0.1635	0.04058	0	1
53	54	0.0263	0.122	0.031	0	1
54	55	0.0169	0.0707	0.0202	0	1
54	56	0.00275	0.00955	0.00732	0	1
54	59	0.0503	0.2293	0.0598	0	1
55	56	0.00488	0.0151	0.00374	0	1
55	59	0.04739	0.2158	0.05646	0	1
56	57	0.0343	0.0966	0.0242	0	1
56	58	0.0343	0.0966	0.0242	0	1
56	59	0.0825	0.251	0.0569	0	1
56	59	0.0803	0.239	0.0536	0	1
59	60	0.0317	0.145	0.0376	0	1
59	61	0.0328	0.15	0.0388	0	1
60	61	0.00264	0.0135	0.01456	0	1
60	62	0.0123	0.0561	0.01468	0	1
61	62	0.00824	0.0376	0.0098	0	1
62	66	0.0482	0.218	0.0578	0	1
62	67	0.0258	0.117	0.031	0	1
63	59	0	0.0386	0	0.96	1
63	64	0.00172	0.02	0.216	0	1
64	61	0	0.0268	0	0.985	1
64	65	0.00269	0.0302	0.38	0	1
65	66	0	0.037	0	0.935	1
65	68	0.00138	0.016	0.638	0	1
66	67	0.0224	0.1015	0.02682	0	1
68	81	0.00175	0.0202	0.808	0	1
68	69	0	0.037	0	0.935	1
68	116	0.00034	0.00405	0.164	0	1
69	70	0.03	0.127	0.122	0	1
69	75	0.0405	0.122	0.124	0	1
69	77	0.0309	0.101	0.1038	0	1
70	71	0.00882	0.0355	0.00878	0	1
70	74	0.0401	0.1323	0.03368	0	1
70	75	0.0428	0.141	0.036	0	1
71	72	0.0446	0.18	0.04444	0	1
71	73	0.00866	0.0454	0.01178	0	1
74	75	0.0123	0.0406	0.01034	0	1
75	77	0.0601	0.1999	0.04978	0	1
75	118	0.0145	0.0481	0.01198	0	1
76	77	0.0444	0.148	0.0368	0	1
76	118	0.0164	0.0544	0.01356	0	1
77	78	0.00376	0.0124	0.01264	0	1
77	80	0.017	0.0485	0.0472	0	1
77	80	0.0294	0.105	0.0228	0	1
77	82	0.0298	0.0853	0.08174	0	1
78	79	0.00546	0.0244	0.00648	0	1
79	80	0.0156	0.0704	0.0187	0	1
80	96	0.0356	0.182	0.0494	0	1
80	97	0.0183	0.0934	0.0254	0	1
80	98	0.0238	0.108	0.0286	0	1
80	99	0.0454	0.206	0.0546	0	1

81	80	0	0.037	0	0.935	1
82	83	0.0112	0.03665	0.03796	0	1
82	96	0.0162	0.053	0.0544	0	1
83	84	0.0625	0.132	0.0258	0	1
83	85	0.043	0.148	0.0348	0	1
84	85	0.0302	0.0641	0.01234	0	1
85	86	0.035	0.123	0.0276	0	1
86	87	0.02828	0.2074	0.0445	0	1
85	88	0.02	0.102	0.0276	0	1
85	89	0.0239	0.173	0.047	0	1
88	89	0.0139	0.0712	0.01934	0	1
89	90	0.0518	0.188	0.0528	0	1
89	90	0.0238	0.0997	0.106	0	1
89	92	0.0099	0.0505	0.0548	0	1
89	92	0.0393	0.1581	0.0414	0	1
90	91	0.0254	0.0836	0.0214	0	1
91	92	0.0387	0.1272	0.03268	0	1
92	93	0.0258	0.0848	0.0218	0	1
92	94	0.0481	0.158	0.0406	0	1
92	100	0.0648	0.295	0.0472	0	1
92	102	0.0123	0.0559	0.01464	0	1
93	94	0.0223	0.0732	0.01876	0	1
94	95	0.0132	0.0434	0.0111	0	1
94	96	0.0269	0.0869	0.023	0	1
94	100	0.0178	0.058	0.0604	0	1
95	96	0.0171	0.0547	0.01474	0	1
96	97	0.0173	0.0885	0.024	0	1
98	100	0.0397	0.179	0.0476	0	1
99	100	0.018	0.0813	0.0216	0	1
100	101	0.0277	0.1262	0.0328	0	1
101	102	0.0246	0.112	0.0294	0	1
100	103	0.016	0.0525	0.0536	0	1
100	104	0.0451	0.204	0.0541	0	1
103	104	0.0466	0.1584	0.0407	0	1
103	105	0.0535	0.1625	0.0408	0	1
103	110	0.03906	0.1813	0.0461	0	1
100	106	0.0605	0.229	0.062	0	1
104	105	0.00994	0.0378	0.00986	0	1
105	106	0.014	0.0547	0.01434	0	1
105	107	0.053	0.183	0.0472	0	1
105	108	0.0261	0.0703	0.01844	0	1
106	107	0.053	0.183	0.0472	0	1
108	109	0.0105	0.0288	0.0076	0	1
109	110	0.0278	0.0762	0.0202	0	1
110	111	0.022	0.0755	0.02	0	1
110	112	0.0247	0.064	0.062	0	1
114	115	0.0023	0.0104	0.00276	0	1];

return;

Anexo B Resultados completos de los estudios.

Análisis de contingencias por el método de Newton-Raphson.

Sistema 2, análisis completo.

Sale línea 1 - 2
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 1 - 3
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 2 - 4
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 2 - 5
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 2 - 6
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 3 - 4
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 4 - 6
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |
=====

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

8 0.947 -4.179

Sale línea 4 - 12
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 5 - 7
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 6 - 7
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

| Datos de las barras |

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

7 0.941 -4.343

Sale línea 6 - 8

Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

8 0.864 -5.943

Sale línea 6 - 9

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 6 - 10

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 6 - 28

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 8 - 28

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 9 - 10

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 9 - 11

Warning: Matrix is singular to working precision.

> In NewtonRaphson (line 47)

In AnalisisContingencias (line 74)

No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 10 - 17

Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |

```
=====
=====
Barra Voltaje
# Mag(pu) Ang(deg)
-----
```

```
17 0.931 -3.687
```

```
Sale línea 10 - 20
```

```
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.
```

```
=====
| Datos de las barras |
=====
```

```
=====
Barra Voltaje
# Mag(pu) Ang(deg)
-----
```

```
18 0.943 -4.538
```

```
19 0.929 -5.372
```

```
20 0.928 -5.460
```

```
Sale línea 10 - 21
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 10 - 22
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 12 - 13
```

```
Warning: Matrix is singular to working precision.
```

```
> In NewtonRaphson (line 47)
```

```
In AnalisisContingencias (line 74)
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 12 - 14
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 12 - 15
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 12 - 16
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 14 - 15
```

```
No se encontró valores de tensión fuera de rango.
```

```
Sale línea 15 - 18
```

Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |
=====

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

18 0.946 -6.201
19 0.950 -5.970

Sale línea 15 - 23
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 16 - 17
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 18 - 19
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 19 - 20
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |
=====

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

18 0.949 -4.044
19 0.938 -4.707

Sale línea 21 - 22
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====
| Datos de las barras |
=====

=====
Barra Voltaje
Mag(pu) Ang(deg)

19 0.948 -4.003
21 0.945 -4.004

Sale línea 22 - 24
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 23 - 24
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 24 - 25
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 25 - 26
Warning: Matrix is singular to working precision.
> In NewtonRaphson (line 47)
In AnalisisContingencias (line 74)

Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 1 iteraciones.

=====

=====

Datos de las barras

=====

=====

Barra	Voltaje
#	Mag(pu) Ang(deg)
26	-Inf NaN

Sale línea 25 - 27
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====

=====

Datos de las barras

=====

=====

Barra	Voltaje
#	Mag(pu) Ang(deg)
26	0.949 -4.799

Sale línea 27 - 29
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====

=====

Datos de las barras

=====

=====

Barra	Voltaje
#	Mag(pu) Ang(deg)

29 0.924 -5.728
30 0.934 -5.155

Sale línea 27 - 30
Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en 3 iteraciones.

=====

Datos de las barras		
---------------------	--	--

=====

=====

Barra	Voltaje	
#	Mag(pu)	Ang(deg)

30 0.914 -6.701

Sale línea 28 - 27
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Sale línea 29 - 30
No se encontró valores de tensión fuera de rango.

Elapsed time is 0.124172 seconds.
La contingencia más severa es cuando sale la línea 19

Anexo C Código de los programas.

Método Newton Raphson.

AnalisisContingencias.m

```
item = 100;
epsilon = 1e-5;
MVAbase = 100;
Vbase = 230;
DeIV = 100;
Zbase = Vbase^2/MVAbase;
[op,z] = caso11;

fprintf ("Escriba el número del estudio que requiere realizar\n");
fprintf ("Flujos de potencia caso base: 1\n");
fprintf ("Análisis de contingencias seleccionando una línea: 2\n");
fprintf ("Análisis de contingencias simple completo: 3\n");
fprintf ("Análisis de contingencias simple por tensión: 4\n");

n1=z(:,1);nr=z(:,2);R=z(:,3);X=z(:,4);YPQ=z(:,5)/2;
nbr=length(z(:,1)); nbus=max(max(n1),max(nr));
estudio = input("");

switch (estudio)

case 1
    tic
    [Va,V,Zbase,SC,SC1,iter] = NewtonRaphson(op,z,...
        ,item,epsilon,MVAbase,Vbase);
    if iter ~= item
        Resumen(z,op,Va,V,MVAbase,Zbase,Vbase,SC,SC1,iter)
    else
        fprintf("Se alcanzó el número máximo de iteraciones\n")
    end
    toc

case 2
    tic
    fprintf("Introduce el número del primer bus " + ...
        "conectado a la línea\n")
    lf1 = input("");
    fprintf("Introduce el número del segundo bus " + ...
        "conectado a la línea\n")
    lf2 = input("");
```

```

for k = 1:1:nbr
    if z(k,1) == lf1 && z(k,2) == lf2
        z(k,7) = 0;
    elseif z(k,2) == lf1 && z(k,1) == lf2
        z(k,7) = 0;
    end
end
end

[Va,V,Zbase,SC,SC1,iter] = NewtonRaphson(op,z,...
    iterm,epsilon,MVAbase,Vbase);
if iter ~= iterm
    AlertaLinea(V,Va,z,iter)
end
toc
case 3
    tic
    filename = 'Impresion1.m';
    u = fopen(filename,'w');
    %Prueba
    for k = 1:1:nbr
        if k > 1
            z((k-1),7) = 1;
        end
        z(k,7) = 0;
        fprintf("Sale línea %4.0f - %4.0f\n",z(k,1),z(k,2))
        [Va,V,Zbase,SC,SC1,iter] = NewtonRaphson(op,z,...
            iterm,epsilon,MVAbase,Vbase);
        if iter ~= iterm
            AlertaLinea(V,Va,z,iter)
            Vag = Va.*(180/pi);
            Vmax = max(abs(V));
            Vmin = min(abs(V));
            if Vmax >= 1.05 || Vmin <= 0.95
                for h = 1:1:nbus
                    if V(h,1) >= 1.05 || V(h,1) <= 0.95
                        fprintf(u,' %4.0f %4.0f %4.0f %4.0f %1.3f %7.3f\r',...
                            k,z(k,1),z(k,2),h,V(h,1),Vag(h,1));
                    end
                end
            end
        end
    end
end
toc
Grafica
case 4
    tic

```

```

b(nbus,1) = zeros;
fprintf("Introduzca el nivel de tension que se quiere probar.\n")
vdl = input("");
if vdl ~= op(:,8)
    fprintf("Valor de tensión no encontrado\n")
else
    a = 0;
    for k = 1:1:nbr
        if (op(z(k,1),8) == vdl) && (op(z(k,2),8) == vdl)
            if a > 0
                z((a),7) = 1;
            end
            z(k,7) = 0;
            fprintf("Sale linea %4.0f - %4.0f\n",z(k,1),z(k,2))
            [Va,V,Zbase,SC,SC1,iter] = NewtonRaphson(op,z,...
                iterm,epsilon,MVAbase,Vbase);
            if iter ~= iterm
                AlertaLinea(V,Va,z,iter)
            end
            a = k;
        end
    end
end
end
toc

otherwise
fprintf("Entrada incorrecta\n");
fprintf("Vuelva a iniciar\n");

end

```

NewtonRaphson.m

```

function [Va,V,Zbase,SC,SC1,iter]
NewtonRaphson(op,z,iterm,epsilon,MVAbase,Vbase)
Zbase = Vbase^2/MVAbase;
[V,Va,Pprog,Qprog] = iniciales (op,MVAbase);
[Yi,Yr,Ym,Ya,nbus,nbr,Y] = ybus(z);
for iter = 0:1:iterm
[P,Q] = cpotencia(nbus,V,Va,Ym,Ya,Yr,Yi);
[DelP,DelQ] = DelPyQ(P,Q,nbus,op,Pprog,Qprog);
DeltaPmax = max(abs(DelP));
DeltaQmax = max(abs(DelQ));
if DeltaPmax >= epsilon && DeltaQmax >= epsilon
[J1,J2,J3,J4] = jacobiana(nbus,V,Va,Ym,Ya,Yr,Yi,Q,P);
[J] = ReduccionJ(J1,J2,J3,J4,nbus,op);
DelPQ = [DelP;DelQ];

```

=

```

DelV = J\DelPQ;
[nVa,nV] = SeparaV(nbus,op,DelV);
Va = Va+nVa;
V = V.*(1+nV);
if iter == iterm
    fprintf('Se alcanzó el número máximo de iteraciones\n')
    SC = 0;
    SC1 = 0;
    return
end
else
[Ep] = VPolarCart(V,Va,nbus);
[SC,SC1,nbr,n1,nr] = lineafujo(z,Ep);
    return
end
end
end

```

viniciales.m

```

function [V,Va,Pprog,Qprog] = iniciales (op,MVAbase)
    V(:,1) = op(:,3);
    Va(:,1) = angle(V);
    Pg = op(:,4)/MVAbase;
    Qg = op(:,5)/MVAbase;
    Pd = op(:,6)/MVAbase;
    Qd = op(:,7)/MVAbase;
    Pprog = Pg(:,1)-Pd(:,1);
    Qprog = Qg(:,1)-Qd(:,1);
end

```

ybus.m

```

function [Yi,Yr,Ym,Ya,nbus,nbr,Y] = ybus(z)
    n1=z(:,1);nr=z(:,2);R=z(:,3);X=z(:,4);YPQ=z(:,5)/2;
    nbr=length(z(:,1)); nbus=max(max(n1),max(nr));

    Z=R+1i*X;
    YPQp=1i*YPQ;
    y=ones(nbr,1)./Z;
    Y=zeros(nbus,nbus);

    for k = 1:1:nbr
        if z(k,7) == 1
            if z(k,6) == 0 && (n1(k) > 0 && nr(k) >0)
                Y(n1(k),nr(k)) = Y(n1(k),nr(k)) - y(k);
                Y(nr(k),n1(k)) = Y(n1(k),nr(k));
            end
        end
    end

```

```

elseif z(k,6)~=0 && (n1(k)>0 && nr(k)>0)
    Y(n1(k),nr(k)) = Y(n1(k),nr(k)) - y(k) * (1/z(k,6));
    Y(nr(k),n1(k)) = Y(n1(k),nr(k));

else
end
else
continue
end
end

for n = 1:1:nbus
for k = 1:1:nbr
if z(k,7) == 1
if z(k,6)==0 && (n1(k)==n || nr(k)==n)
Y(n,n) = Y(n,n) + y(k) + YPQp(k);
elseif (z(k,6)~=0) && n1(k)==n
Y(n,n) = Y(n,n) + y(k) * (1/z(k,6))^2;
elseif z(k,6)~=0 && nr(k) == n
Y(n,n)=Y(n,n) + y(k);
else
end
else
continue
end
end
end
end
[Ya, Ym] = cart2pol(real(Y), imag(Y));
Yr = real(Y);
Yi = imag(Y);
end

                                cpotencia.m

function [P,Q] = cpotencia(nbus,V,Va,Ym,Ya,Yr,Yi)
P(nbus,1) = zeros;
Q(nbus,1) = zeros;

for p = 1:1:nbus
AuxP = 0;
for q = 1:1:nbus
if p ~= q
Aux1P = V(p,1)*V(q,1)*Ym(p,q)*cos(Ya(p,q)+Va(q,1)-Va(p,1));
AuxP = AuxP + Aux1P;
end
end
P(p,1) = (V(p,1)^2)*Yr(p,p)+AuxP;

```

```

end
for p = 1:1:nbus
    AuxQ = 0;
    for q = 1:1:nbus
        if p ~= q
            Aux1Q = V(p,1)*V(q,1)*Ym(p,q)*sin(Ya(p,q)+Va(q,1)-Va(p,1));
            AuxQ = AuxQ + Aux1Q;
        end
    end
    end
    Q(p,1) = -(V(p,1)^2)*Yi(p,p)-AuxQ;
end

```

end

DelPyQ,m

```

function [DelP,DelQ] = DelPyQ(P,Q,nbus,op,Pprog,Qprog)
DelP(:,1) = Pprog(:,1)-P(:,1);
DelQ(:,1) = Qprog(:,1)-Q(:,1);
a = 1;
n = 0;
while a <= nbus
    if op(a,2) == 3
        DelP(a-n,:) = [];
        n = n + 1;
    end
    a = a + 1;
end
a = 1;
n = 0;
while a <= nbus
    if op(a,2) == 3 || op(a,2) == 2
        DelQ(a-n,:) = [];
        n = n + 1;
    end
    a = a + 1;
end
end

```

jacobiana.m

```

function [J1,J2,J3,J4] = jacobiana(nbus,V,Va,Ym,Ya,Yr,Yi,Q,P)

```

```

J1(nbus,nbus) = zeros;
J2(nbus,nbus) = zeros;
J3(nbus,nbus) = zeros;
J4(nbus,nbus) = zeros;
for q = 1:1:nbus
    for p = 1:1:nbus
        if p == q

```

```

        J1(p,q) = -Q(p,1)-((V(p,1)^2)*Yi(p,p));
    else
        J1(p,q) = -V(p,1)*V(q,1)*Ym(p,q)*sin(Ya(p,q)+Va(q,1)-Va(p,1));
    end
end
end
for q = 1:1:nbus
    for p = 1:1:nbus
        if p == q
            J3(p,q) = P(p,1)-((V(p,1)^2)*Yr(p,p));
        else
            J3(p,q) = -V(p,1)*V(q,1)*Ym(p,q)*cos(Ya(p,q)+Va(q,1)-Va(p,1));
        end
    end
end
end
for q = 1:1:nbus
    for p = 1:1:nbus
        if p == q
            J2(p,q) = P(p,1)+((V(p,1)^2)*Yr(p,p));
        else
            J2(p,q) = -J3(p,q);
        end
    end
end
end
for q = 1:1:nbus
    for p = 1:1:nbus
        if p == q
            J4(p,q) = Q(p,1)-(V(p,1)^2)*Yi(p,p);
        else
            J4(p,q) = J1(p,q);
        end
    end
end
end
end
end

```

ReduccionJ.m

```

function [J] = ReduccionJ(J1,J2,J3,J4,nbus,op)
    a = 1;
    n = 0;
    while a <= nbus
        if op(a,2) == 3
            J1(a-n,:) = [];
            J1(:,a-n) = [];
            n = n + 1;
        end
        a = a + 1;
    end
end

```

```

a = 1;
n = 0;
while a <= nbus
    if op(a,2) == 3
        J2(a-n,:) = [];
        J2(:,a-n) = [];
        n = n + 1;
    end
    if op(a,2) == 2
        J2(:,a-n) = [];
        n = n + 1;
    end
    a = a + 1;
end
a = 1;
n = 0;
while a <= nbus
    if op(a,2) == 3
        J3(a-n,:) = [];
        J3(:,a-n) = [];
        n = n + 1;
    end
    if op(a,2) == 2
        J3(a-n,:) = [];
        n = n + 1;
    end
    a = a + 1;
end
a = 1;
n = 0;
while a <= nbus
    if op(a,2) == 3
        J4(a-n,:) = [];
        J4(:,a-n) = [];
        n = n + 1;
    end
    if op(a,2) == 2
        J4(a-n,:) = [];
        J4(:,a-n) = [];
        n = n + 1;
    end
    a = a + 1;
end
J = [J1,J2;J3,J4];
end

```

SeparaV.m

```
function [nVa,nV] = SeparaV(nbus,op,DelV)
nVa(nbus,1) = 0;
nV(nbus,1) = 0;
nV1(nbus,1) = 0;
a = 1;
for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 3
        nVa(k,1) = 0;
    else
        nVa(k,1) = DelV(a,1);
        a = a+1;
    end
end
end

for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 2 || op(k,2) == 3
        nV1(k,1) = 0;
    else
        nV1(k,1) = DelV(a,1);
        a = a+1;
    end
end
end
for k = 1:1:nbus
    nV(k,1) = nV1(k,1);
end
end
```

end

VPolarCart.m

```
function [Ep] = VPolarCart(V,Va,nbus)
Ep(1,nbus) = 0;
[Er,Ei] = pol2cart(Va,V);
for k = 1:1:nbus
    Ep(1,k) = Er(k,1)+(Ei(k,1)*1i);
end
end
```

lineaflujo.m

```
function [SC,SC1,nbr,n1,nr] = lineaflujo(z,Ep)
n1=z(:,1);nr=z(:,2);R=z(:,3);X=z(:,4);YPQ=z(:,5)/2;
nbr=length(z(:,1)); nbus=max(max(n1),max(nr));
SC(nbus) = 0;
SC1(nbus) = 0;
Z=R+1i*X;
YPQp=1i*YPQ;
y=ones(nbr,1)./Z;
```

```

for k = 1:1:nbr
    if z(k,6) == 0
        SC(k) = conj(conj(Ep(n1(k)))*(Ep(n1(k))-Ep(nr(k)))*y(k)+...
                    conj(Ep(n1(k)))*(Ep(n1(k)))*YPQp(k));
    else
        SC(k) = conj(conj(1/z(k,6)*Ep(n1(k)))*...
                    ((1/z(k,6))*Ep(n1(k))-Ep(nr(k)))*y(k));
    end
end

for k = 1:1:nbr
    if z(k,6) == 0
        SC1(k) = conj(conj(Ep(nr(k)))*(Ep(nr(k))-Ep(n1(k)))*y(k)+...
                    conj(Ep(nr(k)))*(Ep(nr(k)))*YPQp(k));
    else
        SC1(k) = conj(conj(Ep(nr(k)))*(Ep(nr(k))-(1/z(k,6))*Ep(n1(k)))*y(k));
    end
end
end

```

Resumen.m

```

function Resumen(z,op,Va,V,MVAbase,Zbase,Vbase,SC,SC1,iter)
n1=z(:,1);nr=z(:,2);R=z(:,3);X=z(:,4);YPQ=z(:,5)/2;
nbr=length(z(:,1)); nbus=max(max(n1),max(nr));
Qd = op(:,7);
aql1(nbr) = 0;
aql2(nbr) = 0;
aS(nbr) = 0;
S(nbr) = 0;
l(nbr) = 0;
Ppl(nbr) = 0;
Pql(nbr) = 0;
aSC(nbr) = 0;
aSC1(nbr) = 0;
Pg(nbr,1) = 0;
Qg(nbr,1) = 0;
YPQp=1i*YPQ;
Vag = Va.*(180/pi);
TPc1(:,1) = op(:,6);
TPc = sum(TPc1,"all");
TQc1 = op(:,7);
TQc(:,1) = sum(TQc1,"all");
for k = 1:1:nbr
    aql1(k) = (V(nr(k))^2)*z(k,5)/2;
    aql2(k) = (V(n1(k))^2)*z(k,5)/2;
end

```

```

for k = 1:1:nbr
    aS(k) = V(n1(k,1),1)^2*(YPQp(k,1)*MVAbase);
    S(k) = (SC(k)*MVAbase)+aS(k);
end
[~, Sm] = cart2pol(real(S), imag(S));
for k = 1:1:nbr
    if z(k,6) == 0
        l(k) = (Sm(k)*1000)/(sqrt(3)*Vbase*V(n1(k,1),1));
        Ppl(k) = 3*(l(k)^2)*R(k,1)*Zbase*10^-6;
        Pql(k) = 3*(l(k)^2)*X(k,1)*Zbase*10^-6;
    else
        l(k) = (Sm(k)*1000)/(sqrt(3)*Vbase*V(n1(k,1),1));
        Ppl(k) = 3*(l(k)^2)*R(k,1)*Zbase*10^-6;
        Pql(k) = 3*(l(k)^2)*X(k,1)*z(k,6)^2*Zbase*10^-6;
    end
end
end
Tpl = sum(Ppl,"all");
Tql = sum(Pql,"all");
apg = 0;
for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 2
        Pg(k,1) = op(k,4);
        apg = apg + Pg(k,1);
    else
        Pg(k,1) = 0;
    end
end
end
for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 3
        Pg(k,1) = TPC-apg+Tpl;
        apg = apg + Pg(k,1);
    end
end
end
TPg = sum(Pg,"all");
for k = 1:1:nbr
    aSC(k)=SC(k)*MVAbase;
    aSC1(k)=SC1(k)*MVAbase;
    Ppl(k) = abs((abs(real(SC(k))) - abs(real(SC1(k))))*MVAbase);
end
end
Tpl = sum(Ppl,"all");
for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 2
        agq = op(k,7);
        fpq = 0;
        for m = 1:1:nbr
            if n1(m,1) == k
                afpq = imag(aSC(m));
            end
        end
    end
end

```

```

        elseif nr(m,1) == k
            afpq = imag(aSC1(m));
        else
            afpq = 0;
        end
        fpq = fpq + afpq;
    end
    Qg(k,1) = fpq+agq;
else
    Qg(k,1) = 0;
end
end
atfpq = 0;
for k = 1:1:nbr
    atpq = imag(aSC(k));
    btpq = imag(aSC1(k));
    atfpq = atfpq + atpq + btpq;
end
TQg = sum(Qd,"all") + atfpq;
for k = 1:1:nbus
    if op(k,2) == 3
        Qg(k,1) = TQg - sum(Qg,"all");
    end
end
end
fprintf('Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en %4.0f
iteraciones.\n',iter)

fprintf('=====
=====
fprintf('| Datos de las barras                                |\n')

fprintf('=====
=====
fprintf('Barra Voltaje Generación Carga \n')
fprintf(' # Mag(pu) Ang(deg) P (MW) Q (MVA) P (MW) Q (MVA)\n')
fprintf('-----\n')
for k = 1:1:nbus
    fprintf(' %4.0f %1.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f',k,V(k,1),Vag(k,1)...
        ,Pg(k,1),Qg(k,1),op(k,6),op(k,7))
end
fprintf('
-----\n')
fprintf(' Total: %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n',TPg,TQg,TPc,TQc)
fprintf('\n')

fprintf('=====
=====
fprintf('| Datos de las lineas                                |\n')

```

```

fprintf('=====
=====\\n')
    fprintf('Linea De A Inyección de barra Inyección a barra Pérdidas(I^2 * Z)\\n')
    fprintf(' # Barra Barra P (MW) Q (MVAr) P (MW) Q (MVAr) P (MW) Q
(MVAr)\\n')
    fprintf('----- \\n')
    for k = 1:1:nbr
        fprintf('%4.0f %4.0f %4.0f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.3f %7.2f\\r',k...
,n1(k),nr(k),real(aSC(k)),imag(aSC(k)),real(aSC1(k)),imag(aSC1(k)),Ppl(k),Pql(k))
    end
    fprintf('
----- \\n')
    fprintf('
Total: %2.3f %2.2f\\n',Tpl,Tql)
end
AlertaLinea.m

function AlertaLinea(V,Va,z,iter)

n1=z(:,1);nr=z(:,2);nbus=max(max(n1),max(nr));
Vag = Va.*(180/pi);
Vmax = max(abs(V));
Vmin = min(abs(V));

if Vmax >= 1.05 || Vmin <= 0.95
    fprintf('Flujos de potencia por el método Newton-Raphson converge en %4.0f
iteraciones.\\n',iter)

fprintf('=====
=====\\n')
    fprintf('| Datos de las barras |\\n')

fprintf('=====
=====\\n')
    fprintf('Barra Voltaje \\n')
    fprintf(' # Mag(pu) Ang(deg)\\n')
    fprintf('----- \\n')
    for k = 1:1:nbus
        if V(k,1) >= 1.05 || V(k,1) <=0.95
            fprintf(' %4.0f %1.3f %7.3f\\r',k,V(k,1),Vag(k,1))
        end
    end
    fprintf('\\n')
else
    fprintf('No se encontró valores de tensión fuera de rango.\\n')
    fprintf('\\n')
end

```

end

Grafica.m

```
function Grafica
filename1 = 'Impresion1.m';
n = load(filename1);
Linea = n(:,1);
Bus = n(:,4);
Tension = n(:,5);
L = mode(Linea);
fprintf('La contingencia más severa es cuando sale la linea %4.0f\n',L)
bubblechart(Linea,Bus,Tension,'MarkerFaceAlpha',0.10)
grid
title('Valores de tensión fuera del rango en la salida de líneas individuales')
ylabel('Numero de barra afectada')
xlabel('Número de linea que sale')
end
```