



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

**COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN UN SISTEMA CON  
MÚLTIPLES MÁQUINAS.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO**

**PRESENTA:**

**EDUARDO NAVARRETE CASIMIRO**

**ASESOR:**

**M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA**

**PUEBLA, PUE.**

**OCTUBRE DE 2021**







## **Dedicatoria**

A mis padres, Blanca y Florencio, quienes pasaron noches de desvelo por mí y por fin puedo rendir el honor que se merecen. Gracias por todo su esfuerzo y apoyo, nunca terminaré de recompensarlos.

A mis hermanos, por tantos buenos momentos que me han hecho pasar.

A mis amigos, por su amistad y confianza; por tantas risas compartidas, por sus palabras de aliento y por estar ahí siempre que los necesito.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Ismael Albino Padilla, por su guía, apoyo y su tiempo dedicado a la realización de esta tesis, la cual sin su ayuda no sería posible.

A los catedráticos del colegio de Ingeniería mecánica y eléctrica de la BUAP, por todo el conocimiento transmitido durante la carrera.



## Contenido

1	Protocolo De Tesis.....	7
1.1	Introducción .....	7
1.2	Planteamiento del Problema .....	7
1.3	Justificación .....	8
1.4	Objetivo General .....	8
1.5	Objetivos particulares .....	8
1.6	Hipótesis.....	9
1.7	Limitaciones .....	9
2	Introducción a los estudios de estabilidad transitoria .....	10
2.1	Introducción .....	10
2.2	¿Qué es un estudio de estabilidad transitoria? .....	11
2.3	¿Qué es un estudio de flujos de potencia? .....	15
2.4	¿Qué es un método de solución de ecuaciones algebraicas no lineales?.....	16
2.5	¿Qué es un método de integración numérica?.....	16
2.6	¿Qué es Matlab? .....	17
	• Funciones.....	21
	• Programación modular .....	22
3	Metodología para la implementación numérica.....	24
3.1	Introducción .....	24
3.2	Ecuación de Oscilación .....	24
3.3	Ecuaciones de las máquinas rotatorias .....	26
3.4	Ecuaciones del sistema de potencia.....	30
3.5	Técnicas de Solución .....	34
3.6	Descripción del programa desarrollado .....	39
	• Descripción general .....	39
4	Resultados .....	40
4.1	Introducción .....	40
4.2	Descripción del sistema de prueba .....	40
4.3	Simulaciones.....	44
	• Caso 1 condición 001 .....	44
	• Caso 2 condición 002 .....	55
	• Caso 3 condición 003 .....	56



- Caso 4 condición 004 .....57
- 4.4 Observaciones y análisis de resultados .....58
- 5 Conclusiones.....60
- 5.1 Conclusiones.....60
- 5.2 Áreas de oportunidad para trabajos futuros .....61
- 6 Bibliografía .....62
- 7 Anexos .....63



# 1 Protocolo De Tesis

## 1.1 Introducción

Dentro de las muchas áreas de la ingeniería en las cuales se puede especializar un ingeniero mecánico y eléctrico, electromecánico o eléctrico la transmisión de energía eléctrica es muy importante, debido a su amplio campo laboral, dentro de este campo, el área de protecciones de sistemas es de suma importancia y esto no solo debido a la necesidad de un constante monitoreo ante la aparición de fallas, sino a la rápida acción que se debe de tomar para prevenir que la falla afecte el menor número de elementos. Para estos casos, el diseño de sistemas de protecciones es de vital importancia, por lo que la especialización en análisis de fallas, flujos de potencia y estabilidad transitoria son siempre una buena opción para el ingeniero.

Aunque los temas de análisis de flujos y estabilidad transitoria son considerados temas de apertura para los niveles de posgrado, el aprenderlos y manejarlos durante el pregrado es vital debido a la alta demanda de personal capacitado que se requiere en la industria hoy en día. El constante cambio que presenta la red nacional y su marcado rumbo hacia la flexibilidad del sistema por la inclusión de medios alternos para la generación de energía requiere el uso de programas computacionales para su estudio.

Dentro del monitoreo de los sistemas eléctricos de potencia (SEPs), los estudios de flujos de potencia y estabilidad transitoria son los que mayor tiempo y dedicación demandan, debido al alto grado de complejidad que puede llegar a tener la estructura de un SEP, ya sea por la gran cantidad de nodos, o máquinas que puedan estar conectados al sistema; es por ello que la mayoría de los programas comerciales utilizados para estos estudios se consideran de un alto grado de profesionalidad o “industrialización”, lo cual hace que las licencias de uso tengan un costo elevado, por lo que la capacidad de la mayoría de las universidades y de los estudiantes de conseguir el uso de estos es a veces nula.

## 1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente el estudio o análisis de flujos de potencia, así como de estabilidad transitoria son temas de suma importancia para un ingeniero mecánico y eléctrico que desea especializarse en la rama eléctrica y más específicamente, en el área de potencia. Estos tipos de análisis, debido a su complejidad, se realizan por medio de programas digitales que utilizan métodos numéricos los cuales, si bien no representan una gran dificultad en su estructura, sí presentan una enorme carga en lo que es el planteamiento de ecuaciones y la obtención de las soluciones, debido al gran número de repeticiones de las ecuaciones, así como del número de elementos que deben integrar.

Es por lo que el aprender a emplear más métodos para conocer el comportamiento del SEP es de suma importancia, así como el encontrar métodos o recursos que ayuden y posibiliten el



poder solucionar estos problemas de manera rápida y concisa. El empleo de herramientas de programación como lo son Matlab y Python representa una amplia oportunidad para acelerar estos cálculos y reducir el esfuerzo en la obtención de los datos finales, así como el obtener una mayor precisión y una mejor interpretación de estos.

Algunos de los programas comerciales que realizan los estudios de Estabilidad transitoria son, por ejemplo, POWER WORLD, PSSE, PSCAD, DSA TOOLS entre otros.

### 1.3 Justificación

Por medio de esta tesis se busca comprobar la utilidad del método numérico de Euler modificado para la solución de ecuaciones electromecánicas de los generadores síncronos, así como la utilidad del método de Gauss Seidel en la solución de flujos de potencia, y el uso simultáneo de ambos métodos en la determinación del comportamiento transitorio del SEP, así como la importancia de emplear herramientas tales como Matlab para programación, de tal manera se pone en evidencia la necesidad fortalecer los campos de métodos numéricos y programación en la formación de los Ingenieros.

Hoy en día, en la industria de control y monitoreo de los sistemas eléctricos de potencia existen una gran cantidad de programas que permiten llevar a cabo simulaciones de posibles problemas en cantidades de tiempo relativamente corto, permitiendo así obtener un buen diseño de protecciones en periodos de tiempo más cortos; sin embargo, las licencias de estos softwares, al ser de uso industrial, son extremadamente costosas, lo que dificulta en gran medida el estudio de los métodos de cálculo por parte de los estudiantes de escuelas públicas de ingeniería tal como se comentó en la sección anterior. Es por esto que el uso de herramientas de programación, tales como Matlab, son una buena opción para que los estudiantes puedan conocer los procesos que se llevan a cabo en estas simulaciones y como trabajan los mismos. Así mismo, el uso de los softwares de programación permite a los estudiantes el expandir sus áreas de conocimiento e identificar campos de aplicación que son valiosos en la rama de ingeniería.

### 1.4 Objetivo General

Crear/Desarrollar un programa intuitivo en Matlab para la solución de problemas de estabilidad transitoria por medio del método de Euler modificado.

### 1.5 Objetivos particulares

- Comprobar la funcionalidad del método numérico de Euler modificado para el análisis de problemas de estabilidad transitoria.



- Crear un programa en Matlab para aplicar el método de Euler modificado en la solución de casos de estabilidad transitoria, que sea modificable para su aplicación en más casos.
- Realizar la solución de un caso de estabilidad transitoria presentado y comprobar la eficiencia del programa, así como comprobar la veracidad de los resultados.

## 1.6 Hipótesis

La programación de métodos numéricos para el estudio de estabilidad transitoria en el programa desarrollado por el usuario permitirá una eficaz y mejor interpretación de los datos por parte del usuario en comparación a que si se hiciera todo manualmente, haciendo así un mejor entendimiento del tema.

La solución de casos de estabilidad transitoria por medio de programas elaborados en programas como Matlab tienden a tener la misma precisión que algunos programas de análisis profesional, por lo que el empleo de estos para el aprendizaje del usuario tiene una mejor eficiencia.

## 1.7 Limitaciones

Si bien la base de la aplicación del método numérico de Euler modificado es un tanto sencilla, la teoría detrás de la aplicación de este método a la solución de casos de estabilidad transitoria representa una gran dificultad para los estudiantes de licenciatura, debido a la gran cantidad de parámetros y variables a establecer para realizar la solución, por lo que la programación de estos en Matlab presentan una gran rigidez toda vez que se necesiten modificar para un caso con mayor número de buses o máquinas.

Por tal razón el estudio se verá limitado a la aplicación de un sistema de prueba que contiene:

- Plantas generadoras con máquina síncronas, utilizando el modelo clásico del generador para estudios de estabilidad transitoria.
- 6 buses, de los cuales, se tienen 1 bus de compensación, 1 bus de generación y 4 buses de carga.
- 7 líneas de transmisión, utilizando el modelo de parámetros concentrados, tomando en cuenta el efecto capacitivo de la línea respecto a la tierra.

El programa será capaz de analizar el comportamiento transitorio del sistema para una falla trifásica sólida y balanceada en el bus.



## 2 Introducción a los estudios de estabilidad transitoria

### 2.1 Introducción

La continua y creciente preocupación por el aumento en la contaminación y el cuidado del medio ambiente, al igual que la búsqueda y creación de nuevas tecnologías que permitan una generación eléctrica más limpia y amigable con el medio ambiente, así como la necesidad de satisfacer la constantemente creciente demanda de energía eléctrica por parte del sector público y privado; hacen necesario el diseño y creación de sistemas eléctricos de potencia cada vez más complejos, lo que los vuelve cada vez más difíciles de operar, con una mayor cantidad de variables que afectan su correcto funcionamiento y por consiguiente, más complejos de analizar y planificar.

Los sistemas eléctricos de potencia (SEPs) constantemente son operados a valores cercanos a sus límites de estabilidad, en un intento de las empresas eléctricas de satisfacer la siempre creciente demanda de energía eléctrica por parte del mercado industrial y el sector público, es por este motivo que la mayoría de los sistemas eléctricos corren el riesgo de sufrir alguna falla que llegue a afectar no solo al origen, sino también a las demás partes del sistema conectadas a él, provocando más casos de inestabilidad.

Con el objetivo de prevenir estos desastres, los operadores y supervisores del sistema eléctrico continuamente evalúan estabilidad del sistema con diversos casos de prueba offline. Estos casos de prueba offline son de mucha ayuda, ya que el sistema de potencia debe de estar diseñado para sobrellevar cualquier situación/disturbio que se pueda presentar.

La existencia de fallas en el sistema se considera tan longeva como la creación de los sistemas mismos, por lo que el análisis y prevención de estas siempre ha sido de interés para las organizaciones que las operan. Se considera que muchos de los estudios de las primeras fallas de estabilidad dentro de un sistema datan de 1920, después de la primera guerra mundial, donde debido al rápido incremento las conexiones entre los sistemas eléctricos se presentaron descompensaciones de cargas al conectar nuevos generadores a un sistema, propiciando la inestabilidad de un maquina contigua. Desde entonces los operadores de los sistemas eléctricos se han dedicado a estudiar y diseñar diversos métodos para poder analizar la estabilidad de un sistema y el cómo protegerlo ante estas contingencias. (Stevenson, 1995)

En un análisis de estabilidad transitoria se evalúa el comportamiento dinámico del sistema eléctrico nacional (SEN), observando el perfil de tensión de los buses, los valores de potencias reactivas y activas, los ángulos de las unidades de las centrales generadoras y el comportamiento de sus frecuencias. Con esto se identifica los límites de estabilidad y las magnitudes de depresión de la tensión, el amortiguamiento del sistema y la interacción de los sistemas de protección de líneas con las oscilaciones en los valores del sistema. Así, se estudia el impacto de la incorporación de nuevos proyectos al sistema eléctrico en la estabilidad de este, analizando el efecto de los disturbios N+1 más severos. (PRODESEN, 2019)



## 2.2 ¿Qué es un estudio de estabilidad transitoria?

- Definición del concepto de estabilidad transitoria

Se puede definir a la estabilidad del sistema eléctrico como la capacidad de este de permanecer operando en un estado equilibrado en condiciones normales de operación y de regresar a un punto de funcionamiento estable después de un disturbio en el sistema, sin perder el sincronismo (El-Abiad, 1968). Los estudios de estabilidad se pueden clasificar en dos tipos: estado estable y transitorio. Los autores mencionan que un sistema eléctrico se encuentra en estado estable si todas las magnitudes físicas que se miden se pueden considerar como constantes para efectos del análisis.

Por su parte, se le llama disturbio a un cambio repentino en las condiciones de operación de un sistema eléctrico que se encuentra operando en estado estable. Un disturbio se considera grande cuando las ecuaciones que describen la dinámica del sistema no pueden ser linealizadas para su análisis, tal es el caso de fallas en las líneas de transmisión, pérdidas en generación o descompensación repentina en las cargas al sistema (Grainger & Stevenson, 1996). En cambio, se dice que un disturbio es pequeño cuando el sistema se encuentra en estado estable y el proceso que sufre se puede analizar mediante ecuaciones algebraicas lineales. Un buen ejemplo de pequeño disturbio es el que Stevenson da en su obra, mencionando al cambio en la ganancia de un regulador automático de voltaje.

Por consiguiente, se entiende por estudios de estabilidad transitoria a aquellos que proporcionan información del sistema relacionada a la capacidad de este de mantenerse en sincronismo, más específicamente, cambios de voltaje, corriente, potencias, velocidades y pares de máquinas conectadas al SEP; durante e inmediatamente después de un gran disturbio (J. Duncan Glover, 2008).

El estudio de estabilidad del sistema eléctrico, a pesar de ser un solo problema, abarca una gran cantidad de factores y efectos, que es necesaria su clasificación. Es por lo que se pueden clasificar en diferentes tipos, dependiendo de la magnitud que se esté midiendo y de la naturaleza de los factores que propician la inestabilidad que se esté estudiando; el tamaño del disturbio considerado; los dispositivos, procesos y el periodo de tiempo que deben de ser tomados en consideración para determinar la estabilidad del sistema. El mapa de la Fig. 2.1, tomado del libro de Prabha Kundur, muestra la clasificación que se puede hacer de los diferentes tipos de estabilidad.

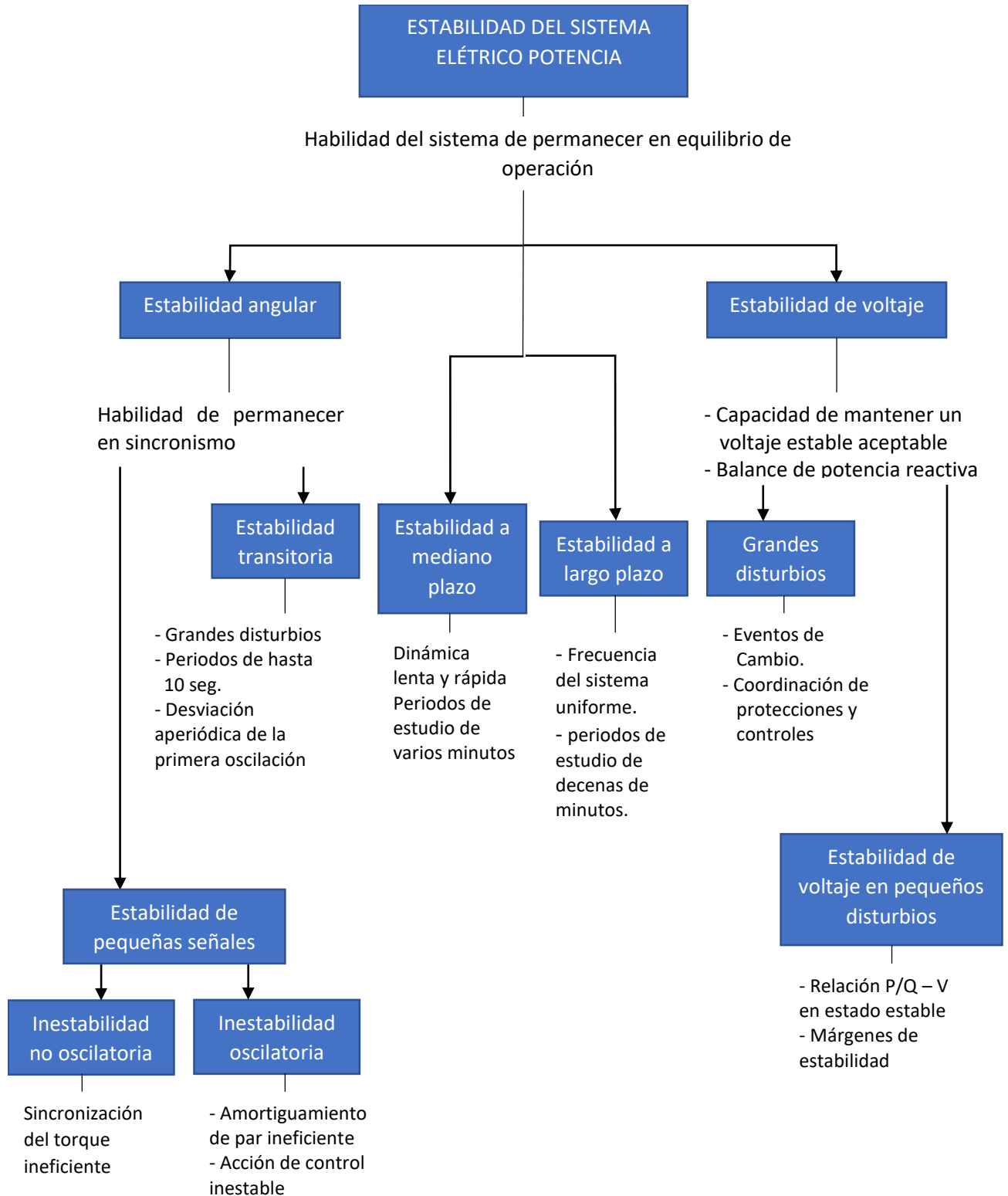


Fig. 2.1 Clasificación de los tipos de estabilidad.



Elgerd (Elgerd O. I., 1982) comenta en su obra que se puede comparar la estabilidad del sistema eléctrico con la estabilidad de un sistema de masas suspendidas conectadas por ligas o cuerdas, las cuales representan los generadores y cargas, y las líneas de transmisión respectivamente. Este sistema suspendido se considera en estado estable, pero cuando una fuerza externa lo afecta, como el movimiento de una masa o la pérdida de una liga, el sistema presentará una inestabilidad momentánea que podría derivar en dos escenarios: el sistema encuentra un nuevo estado de estabilidad o balance, o podría sufrir otra afectación, como la pérdida de otra masa u otra cuerda de enlace.

La mayoría de los autores coinciden que para que un estudio de estabilidad transitoria sea llevado a cabo de manera correcta se debe de contar con las siguientes consideraciones fundamentales:

1. Solamente se deben de considerar las corrientes sincrónicas de las máquinas y del sistema, por lo que no se pueden tomar en cuenta las maquinas CC ni las corrientes armónicas.
  2. Se usan las componentes simétricas para las fallas desbalanceadas.
  3. Se considera que el voltaje generado no se ve afectado por las variaciones en la velocidad de las máquinas.
- ¿Cuándo se considera que el sistema es transitoriamente estable?

Bien entonces, se puede considerar a un sistema como transitoriamente estable cuando este tiene la capacidad de volver a un estado de sincronía después de una gran falla en un corto periodo de tiempo, presentando una condición de trabajo significativamente diferente (Grainger & Stevenson, 1996). Por otro lado, se considera “estable en su estado estable” cuando después de presentar un pequeño disturbio este puede regresar a la condición de trabajo particular en la que se encontraba.

- Elementos necesarios para un estudio de estabilidad transitoria.

Para iniciar el análisis para determinar la estabilidad del sistema de potencia son necesarios seguir los siguientes requerimientos:

1. Modelado de los elementos del sistema. Dentro del cual se debe de tener la información necesaria para realizar el estudio, la cual se obtiene del caso base.
2. Determinar el tiempo de análisis del sistema, así como el tiempo de falla.
3. Simular las perturbaciones en el sistema y el efecto de los controles de continuos.
4. Analizar los resultados obtenidos.
5. Sacar conclusiones prácticas.



La información necesaria para los estudios de estabilidad transitoria se obtiene principalmente del caso base, y los primeros estudios que anteceden al análisis transitorio, estos datos requeridos se enlistaran enseguida: (Castelán, 2018)

- Caso base:  
Comprende toda la información general del sistema, tanto configuración como de funcionamiento, se puede considerar como la base de datos a partir de la cual se realizarán los primeros cálculos del sistema.
- Impedancia de líneas:  
Se genera por las propiedades que componen a la línea (longitud, material), la impedancia compuesta por R, X y B está dada en unidades PU.
- Tensión controlada en buses de generación:  
Son los niveles de voltajes controlados desde las centrales generadoras eléctricas, por lo regular se usa para controlar todo el voltaje del sistema, se utiliza en unidades PU.
- Potencia real generada:  
Es la potencia real que brindan los generadores, se expresa en unidades de MW.
- Potencia reactiva generada:  
Es la potencia reactiva generada para el sistema esta se expresa en unidades Mvar.
- Impedancia en los generadores:  
Es la impedancia del generador asociado al sistema, se especifica como reactancia transitoria en unidades PU.
- Carga potencia real:  
Esta es la carga que se ajusta en cada bus (esta carga no incluye las cargas que demanda la estructura del sistema), las unidades de esta se expresan en MW.
- Carga de potencia reactiva:  
Es la carga en potencia reactiva en unidades de Mvar.
- Impedancia en los transformadores de dos devanados:  
Esta impedancia en transformadores de dos devanados que por lo general solo se expresa con la reactancia X en unidades PU para casos de estudio
- El tipo de los buses del sistema.



Bus de compensación: utilizado para equilibrar la potencia activa y potencia reactiva en los sistemas durante estudios de flujos de potencia. Este bus también sirve de referencia para los ángulos de los demás buses.

Bus de generación: para este bus se especifica el voltaje y la potencia real, estos dos valores serán constantes para cada bus existente de este tipo.

Bus de carga: en este tipo de bus se tendrán especificadas la potencia real y reactiva, en este bus se tendrá una generación negativa originada por la fluidez de potencia en el sistema.

- Tensión nominal en líneas:  
Esta información es obtenida después de realizado el análisis de flujos de potencia. Las unidades son en kV
- Tiempos antes, durante y después de la falla:  
Estos tiempos son aquellos con los que se mostrará cada etapa del análisis para su mayor comprensión en cada instante.
- Bus fallado:  
En este bus es donde se produce el disturbio por el cual se realiza el análisis de estabilidad. Los datos de este bus se mantienen constantes durante la falla.

### 2.3 ¿Qué es un estudio de flujos de potencia?

Se considera como estudio de flujos de potencia a aquel conjunto de cálculos y procedimientos que proveen información de los flujos de cargas y voltajes dentro de un sistema específico sujeto a la capacidad de regulación de generadores, capacitores y cambios en las tomas de transformadores de potencia, así como un cambio neto específico entre sistemas operativos individuales (El-Abiad, 1968). Thomas Overbye define al problema del flujo de potencia como “el cálculo de la magnitud del voltaje y el ángulo de fase en cada bus en un sistema de energía en condiciones de estado estable trifásico balanceado”. El cual obtiene como subproducto de este cálculo a los flujos de potencia real y reactiva en los elementos pasivos del sistema, como son las líneas de transmisión y los transformadores, así como las pérdidas de los equipos (J. Duncan Glover, 2008).

La información obtenida de estos cálculos es de vital importancia para una constante evaluación en los cambios de la corriente dentro de un sistema, así como la eficacia de los planes alternativos de expansión del sistema que buscan satisfacer los futuros incrementos en la demanda de energía.

Para estos cálculos se utiliza una representación monofásica del sistema, ya que generalmente estos problemas se realizan comúnmente con sistemas balanceados y es posible obtener los



datos de entrada necesarios, tales como: admitancia de líneas, voltajes de máquinas, información del bus y voltajes de transformadores.

En estos cálculos, 4 son las variables que están relacionadas a los buses: potencia real y reactiva, magnitud de voltaje y ángulo de fase.

## 2.4 ¿Qué es un método de solución de ecuaciones algebraicas no lineales?

Un inicio de esto puede ser definir sistema de ecuaciones algebraicas no lineales como aquel conjunto de ecuaciones donde  $F(x)$  representa un “determinado” no lineal con sus dominio y rango en un espacio n-vectorial en el espacio de los reales (Crow, 2010).

Por consiguiente, son considerados como métodos de solución de ecuaciones algebraicas no lineales a aquellos procedimientos empleados para encontrar la solución a cada incógnita del sistema, la cual, si bien no aparece en todas las ecuaciones, sí por lo menos una vez en el sistema.

Por lo general estos métodos se realizan numéricamente, y en la mayoría de los casos se llevan a cabo encontrando aproximaciones del  $X$  arbitrariamente cercanas al valor real de  $x^*$ , sustituyendo cada aproximación con una más precisa consecutivamente hasta aproximarse a  $F(x) \approx 0$ . Estos métodos se conocen como iterativos.

Con la aplicación de estos métodos iterativos, aparecen tres problemas; los cuales son:

1. El proceso de iteración debe de estar bien definido.
2. Las iteraciones deben de converger en una solución del sistema de ecuaciones.
3. Que tan económico es el proceso completo de solución.

## 2.5 ¿Qué es un método de integración numérica?

Los sistemas dinámicos generalmente son representados por ecuaciones diferenciales ordinarias con un valor inicial dado. Tales ecuaciones son representadas como funciones que varían con el tiempo que dependen del valor inicial dado, y comúnmente son llamadas “problemas de valor inicial” [3] (Crow, 2010).

Un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales muy difícilmente puede ser resuelto por medio de métodos analíticos, sin embargo, sí pueden ser resueltos por métodos iterativos.

En las soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales, una secuencia de puntos es calculada de tal manera que se aproxime a la solución en una cantidad de pasos de tiempo. El intervalo



de tiempo entre dos puntos es conocido como “paso de tiempo” y el algoritmo de solución avanza en la solución en un paso de tiempo por cada aplicación de este.

Un algoritmo de integración numérica debe de poder satisfacer ciertos criterios: exactitud numérica, estabilidad numérica, y eficiencia en cálculos.

La exactitud numérica asegura que el margen de error que presente el algoritmo en cada paso de iteración permanezca delimitado. La estabilidad numérica implica que el error de cada paso de integración no se propagará a la siguiente iteración y la eficiencia numérica se refiere a una función con respecto a los cálculos requeridos en cada iteración y el tamaño de los intervalos entre los puntos adyacentes.

## 2.6 ¿Qué es Matlab?

MATLAB (abreviado de Matrix Laboratory) es un software basado en el cálculo matricial para el desarrollo de aplicaciones matemáticas y de ingeniería. (Ogata, 1999) Gracias a su flexibilidad en el manejo de programas, el cual permite una programación directa, y un enlace con programas de simulación, sus aplicaciones han incrementado en gran medida, volviendo popular su uso para fines educativos. Debido a esto, el software ha obtenido una gran extensión y complejidad, lo que ha vuelto su uso un poco difícil, necesitando una gran familiaridad del usuario con el entorno del sistema, por suerte contiene una gran biblioteca de ayuda en línea.

- Procedimiento para la construcción de programas

La programación en MATLAB está diseñada para llevarse a cabo de manera estructurada. La cual es una técnica de programación con el fin de realizar programas con poca dificultad de entendimiento los cuales se basan en tres tipos de subrutinas estructuradas: estructura secuencial, estructura selectiva y estructura repetitiva (o iterativa). (Diaz, Mestas, & Hanco, 2015)

Estructura secuencial:

Las instrucciones en el programa se ejecutan consecutivamente, según el orden en que estén definidas dentro del programa. En los diagramas de flujo, son representados como un bloque seguido de otro los cuales tienen un solo conector de entrada y uno solo de salida.

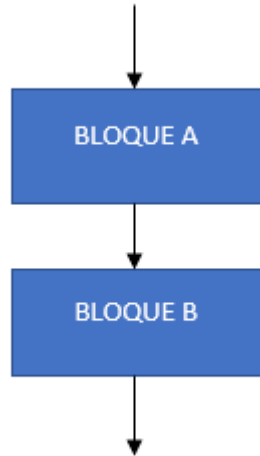


fig. 2.1 Diagrama de flujo de estructura secuencial

Estructura selectiva:

Estas estructuras se caracterizan por presentar sentencias o condiciones las cuales evalúan el valor de entrada, y dependiendo de si cumple una condición o no se realiza una acción u otra. Este tipo de estructuras son representadas por el comando **if**. Algunas de estas estructuras son:

*Bifurcación simple*: se evalúa si el valor de entrada cumple con la condición para realizar la acción, de caso contrario se procede al siguiente paso.

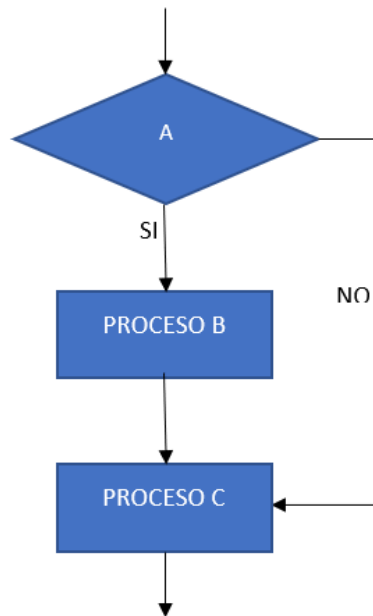


fig. 2.2 Diagrama de flujo de estructura selectiva, bifurcación simple



**Bifurcación doble:** se evalúa el valor de entrada A, si este cumple con la condición se ejecuta el proceso B, en caso contrario se ejecuta el proceso C; y una vez tomada la decisión y realizado el proceso, se pasa a siguiente proceso.

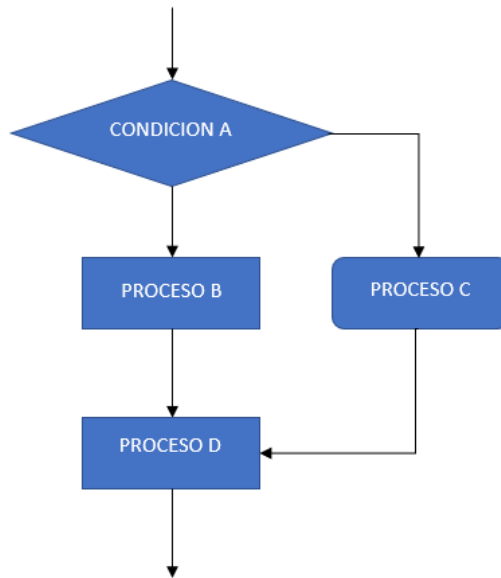


fig. 2.3 Diagrama de flujo de bifurcación doble

La sintaxis del condicional **if** es la que se presenta a continuación:

```
if (condición)
  proceso A
else
  proceso B
end
```

Estructura iterativa:

Son reconocidas por presentar comandos que condicionan el comportamiento del programa a repetir las instrucciones hasta que ya no se cumpla la condición. Comúnmente se implementan mediante dos comandos: **for** y **while**.

Comando **For**:

Este comando utiliza un tipo de variable de entrada conocido como contador, el cual toma un valor igual al inicio establecido por el programa, se realizan las instrucciones dentro del bucle y una vez hecho, el contador incrementa su valor previo más el valor de paso establecido en la estructura, para nuevamente ejecutar las instrucciones del programa y así sucesivamente hasta



llegar al valor final. Una vez alcanzado el valor final, el bucle termina y se procede a realizar las instrucciones seguidas al comando **end** del comando **for**.

La sintaxis del comando **for** es la siguiente:

```
for contador = inicio : paso : final  
Bloque A  
End
```

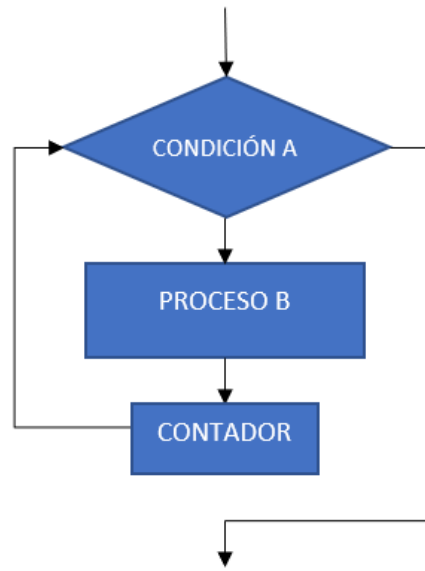


fig. 2.4 Diagrama de flujo para comando for

Comando **while**:

Cuando no se sabe de ante mano cuantas veces se tendrán que repetir las instrucciones, es recomendable el uso de este comando. El comando while establece que mientras una condición sea verdadera, el bucle seguirá repitiéndose y finalizará cuando la condición no se cumpla o sea falsa. Para esta estructura el valor de entrada inicial debe de ser puesto antes del inicio del bucle, para que así la condición se cumpla al menos una vez.

la sintaxis con la que se ejecuta el comando **while** es:

```
while condición  
proceso  
end
```

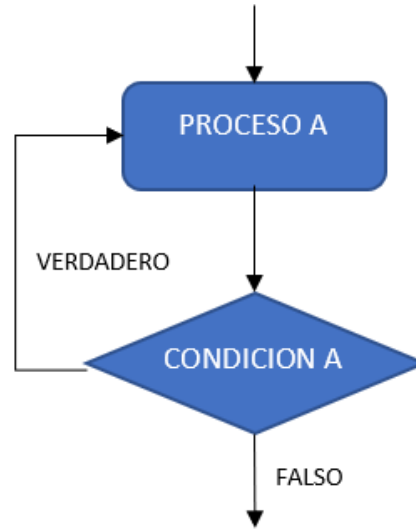


fig. 2.5 Diagrama de flujo de comando while

La programación realizada en MATLAB siguiendo estas estructuras permiten tener una mayor claridad en la lectura del programa por parte del desarrollador y del usuario obteniendo así una mejor comprensión del objetivo de este, además de permitir encontrar fallos en la programación con mayor rapidez.

La construcción de un programa dentro del software de MATLAB se realiza directamente sobre archivos M, denominados así por su extensión “.m”, los cuales pueden ser visualizados y modificados en cualquier editor de texto. Los programas realizados en estos archivos M, llamados script, son ficheros los cuales contienen comandos para MATLAB que se ejecutan secuencialmente cuando el nombre del archivo es tecleado en la pantalla de comandos de MATLAB o este es escrito dentro de otro programa.

Para la creación de un programa dentro de MATLAB, lo primero que se debe de hacer es la apertura o creación de un archivo nuevo o “script” dentro del cual se realizará la programación desea. Posterior a esto se deben de colocar los comandos y operaciones que se realizarán dentro del programa para entregar el valor de salida o la información obtenida en el proceso.

- Funciones

Se puede definir a las funciones como un conjunto de instrucciones o comandos cuyo objetivo es entregar valores de salida con respecto a otros valores de entrada. Las funciones son los



módulos o partes en que se divide un programa, permiten que este sea más fácil de entender, ubicar errores más rápidamente y evita la redundancia en el programa.

Una función es un archivo script el cual contiene sus propias variables locales, es decir, dentro de este programa se realizarán operaciones en las cuales se usarán variables que solo afectarán a esta función y no saldrán como resultado de esta. Tanto el número, nombre y tipo de variables que entren y salgan de la función son definidos por la estructura de la función.

La estructura o sintaxis en la cual se presentan las funciones es:

**Function** [s1,s2, ..., sn] = nombre (e1,e2, ...,en)

**Donde:** e1, e2, ..., en son las variables de entrada del programa  
s1, s2, ..., sn son las variables de salida del programa.

Con la cual definiremos que argumentos introduciremos a la función y obtendremos una vez se realiza la función. Para la creación de códigos y variables se debe de tener mucho cuidado ya que la sintaxis de MATLAB reconoce entre mayúsculas y minúsculas, y alguna confusión dentro de los nombres de las variables o de la función el programa podría terminar en el error de compilación del programa.

Al nombrar la función, diversos autores recomiendan que este sea escogido de tal manera que sea algo relacionado con lo que realice la función, así como el nombre de la función deberá ser el mismo que el nombre del archivo, con la finalidad de que MATLAB lo encuentre en el directorio que se está ocupando. Este no debe de contener espacios y no debe de ser el nombre de una variable establecida o algún comando predeterminado.

- Programación modular

En programación, se conoce como modulo a un segmento, subrutina o procedimiento dentro un algoritmo principal que realiza una tarea específica de manera independiente y que es llamada por el programa principal.

Se puede definir a la programación modular como aquella que usa el concepto de dividir un problema complejo en subproblemas más pequeños, hasta que estos sean fáciles de tratar y resolver por separado. Así la solución de los subproblemas en conjunto da como resultado la solución del problema completo. (López, 2003)

Este formato o técnica permite dar una mejor y más clara solución a los problemas que tienen una gran cantidad de procedimientos en cadena para la obtención de un valor final, como es



el caso de los problemas con soluciones iterativas, que requieren la repetición de procesos en cadena hasta la obtención de la solución aproximada.

Algo muy importante de este método de programación es que al crearse módulos o subprogramas, estos deben de ser independientes del programa principal y deben de poder ser “llamados” por el programa principal y una vez terminada su función o entregados los datos de salida requeridos, estos deben de devolver el control del trabajo al programa principal, por lo que solo pueden ser utilizados en software de programación que permitan el llamado de elementos externos durante el funcionamiento del programa principal.



## 3 Metodología para la implementación numérica

### 3.1 Introducción

La realización de los estudios de flujos de potencia y de estabilidad del sistema se llevan a cabo, como ya se expresó anteriormente, por medio de métodos numéricos para la solución de las ecuaciones diferenciales, por lo que se requiere tener previamente establecidas las ecuaciones que representen de manera fiable el sistema.

En el presente capítulo, se muestran los procedimientos para la obtención de las ecuaciones que se utilizarán durante la realización del estudio de estabilidad transitoria, así como los métodos para realizarlos.

### 3.2 Ecuación de Oscilación

Para poder determinar el desplazamiento angular entre las máquinas de un sistema eléctrico de potencia durante condiciones transitorias, se debe de resolver ecuaciones diferenciales que describan el movimiento del rotor de las máquinas (El-Abiad, 1968). Considerando una unidad generadora trifásica, la ecuación que describe este movimiento establece que el torque de aceleración es el producto del momento de inercia de la maquina por su aceleración angular. Esto es (Grainger & Stevenson, 1996):

$$J\alpha(t) = T_m - T_e = T_a \quad (3.1)$$

Donde:  $J$  = es el momento total de inercia, en  $kg * m^2$

$\alpha$  = aceleración angular del rotor, en  $rad/s^2$ .

$T_m$  = Torque mecánico, N-m

$T_e$  = Torque eléctrico, N-m

$T_a$  = Torque neto, N-m.

Se define a la aceleración angular como la doble derivada de la posición angular, dada por la ecuación:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3.2)$$

Y recordando que la posición angular del rotor con respecto al eje de referencia de rotación síncrona es:

$$\delta = \theta_e - \omega_0 \quad (3.3)$$

Entonces, al introducir las ecuaciones (3.2) en la ecuación (3.1), está tomará la forma:



$$J \frac{d^2 \delta}{dt} (t) = J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e = T_a \quad (3.4)$$

De la misma manera podemos introducir

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$$

Para la velocidad angular del rotor. Ya que de la mecánica elemental se recuerda que la potencia es igual al torque por la velocidad angular, así, al multiplicar la ecuación (3.4) por  $\omega_m$ , se obtiene:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta}{dt} = P_a = P_m - P_e \quad (3.5)$$

Donde  $P_m$  = Potencia mecánica, entregada por la flecha a las menores flechas, en MVA  
 $P_e$  = Potencia eléctrica de salida, en MVA

Al producto de los valores  $J\omega_m$  se le conoce como constante de inercia  $M$ , la cual se expresa en Joules-segundo por radian ( $J \cdot \text{seg}/\text{rad}^2$ ). Aunque la velocidad angular no es constante en todas las condiciones de operación, en la práctica se considera como tal debido a la poca variación que existe con la velocidad síncrona de la maquina cuando está en régimen estable. (Grainger & Stevenson, 1996)

Otra constante que se encuentra en los datos de la máquina para su análisis de estabilidad, que permite trabajar con una constante de inercia normalizada, es la constante  $H$ . Como es preferible trabajar estas ecuaciones de manera normalizada, se puede optar por hacerlo en términos de por unidad de la constante de inercia  $H$ , definida como la energía cinética en Watts-segundo a velocidad nominal, dividido por los VA base.

La cual se define como:

$$H = \frac{\text{energía cinética almacenada a velocidad síncrona,}}{\text{capacidad de la maquina en MVA}}$$
$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{maq}} \quad (3.6)$$

Donde  $\omega_{sm}$  es la velocidad síncrona de la maquina en radianes mecánicos por segundo y  $S_{maq}$  representa la potencia base de la maquina en MVA.

Despejando el momento de inercia  $J$  en términos de  $H$  es:



$$J = \frac{2H}{\omega_{sm}^2} VA_{base} \quad (3.7)$$

Se procede a sustituir en la ecuación (3.5), despejando la potencia base de la máquina, permitiendo quedar la ecuación en términos de PU:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt} = P_m - P_e \quad (3.8)$$

Dado que tanto la velocidad angular se expresa en radianes por segundos mecánicos, así como la posición angular se encuentran en unidades de radianes mecánicos, se pueden expresar también en unidades eléctricas.

$$\frac{d^2\delta}{dt} = \frac{\omega}{2H} P_m - P_e$$

Por consiguiente, si se toma la velocidad angular como  $\omega_m = 2\pi f$ , entonces, sustituyendo y despejando la aceleración obtenemos las ecuaciones:

$$\frac{d^2\delta}{dt} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (3.9)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f \quad (3.10)$$

Las cuales son dos ecuaciones diferenciales de primer grado usadas para representar la ecuación diferencial de segundo grado (3.8) que es la ecuación fundamental que gobierna la dinámica del rotor en los estudios de estabilidad transitoria, llamada ecuación de oscilación.

### 3.3 Ecuaciones de las máquinas rotatorias

#### MODELO CLASICO DE LA MAQUINA SINCRONA

En el desarrollo de las ecuaciones de las maquinas síncronas, se toman en cuenta los siguientes puntos (J. Duncan Glover, 2008):

- El embobinado de estator esta sinusoidalmente distribuido a lo largo del entre hierro con respecto a los efectos mutuos del rotor.
- Las ranuras del estator no causan variaciones en la inductancia del rotor con la posición de este.
- Los efectos de la histéresis son despreciados.
- Los efectos de la saturación magnética son despreciados.



Debido a que el estudio se realiza en un estado transitorio y no estático las ecuaciones de funcionamiento comunes no pueden ser usadas, por lo que deben de ser deducidas para una salida de potencia en función de la posición angular  $\delta$  durante las variaciones transitorias.

Se puede partir de la suposición de que un generador funciona conectado a una red en estado estable durante un largo tiempo, y posterior a esto, un cortocircuito sucede en algún punto de la red, por lo que los voltajes en los buses sufren repentinas variaciones. Por lo que los valores en el generador cambiarían repentinamente de su estado en prefalla  $V^0$  a los valores postfalla  $V^1$  como se muestra en el siguiente diagrama fasorial. fig. 3.1 (Elgerd O. I., 1971)

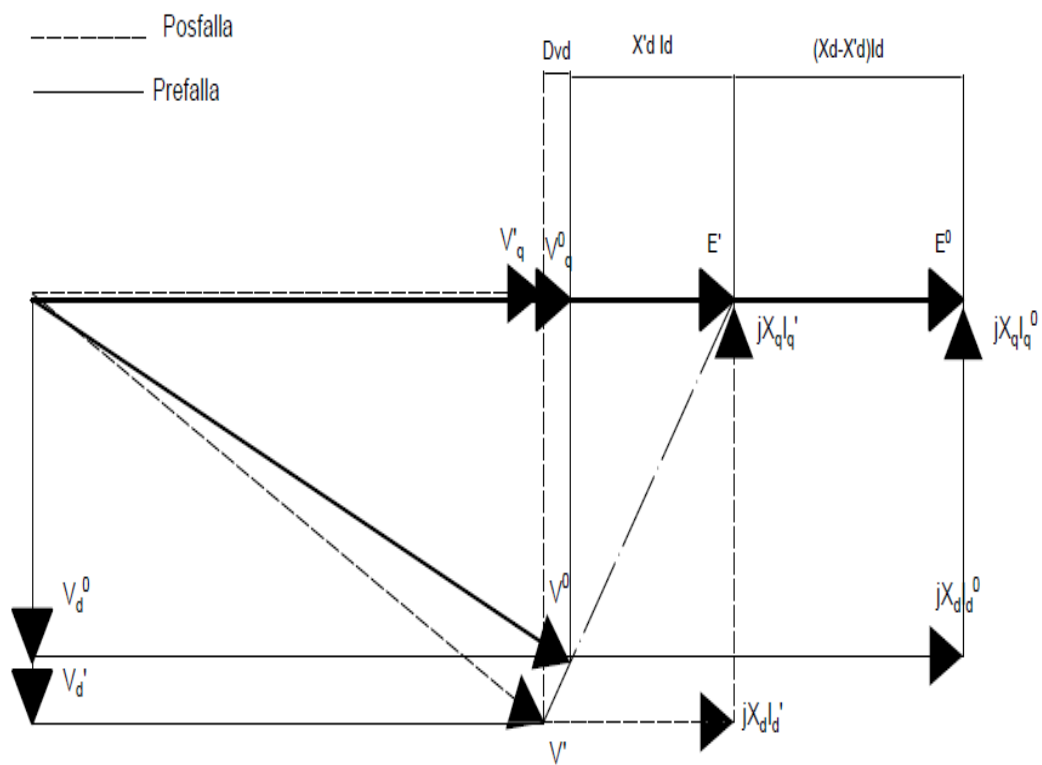


fig. 3.1 Diagrama fasorial mostrando las relaciones entre valores prefalla y posfalla

En los estudios de estabilidad transitoria, sobre todo aquellos en los que el que periodo de estudio es de un segundo o menos, las maquinas pueden ser representadas como una fuente de voltaje junto con una reactancia transitoria, la cual es constante en magnitud, pero variable en posición angular. (El-Abiad, 1968)

Esta representación desprecia los efectos de la saliencia y asume enlaces de flujo constantes. El voltaje detrás de la reactancia está determinado por:

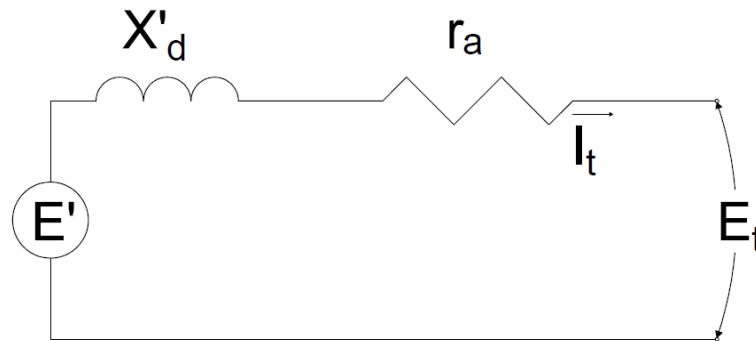


fig. 3.2 Circuito equivalente de la maquina sincrona

$$E' = E_t + r_a I_t + jX'_d I_t \quad (3.11)$$

Donde  $E'$  = voltaje detrás de la reactancia transitoria.

$E_t$  = voltaje en terminales de máquina.

$I_t$  = corriente en terminales de máquina.

$r_a$  = resistencia de armadura.

$X'_d$  = reactancia transitoria.

## MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

En los estudios de estabilidad usualmente se representan a las cargas por medio de impedancias en derivación, incluidos los motores de inducción. Sin embargo, en estudios con grandes cargas por motores de inducción, es necesario representarlos de una manera muy detallada.

Los motores de inducción son usados ampliamente en procesos industriales y pueden tener efectos significativos en la respuesta transitoria de los sistemas de potencia.

Una representación lineal del motor de inducción se obtiene tomando en cuenta los transitorios mecánicos y eléctricos del rotor. Generalmente, los efectos de los transitorios en el estator sobre la respuesta del sistema pueden ser despreciados. El circuito en la figura siguiente (fig. 3.3) se utiliza para representar el comportamiento transitorio de la máquina, incluyendo los efectos de los transitorios mecánicos y los transitorios eléctricos del rotor con una constante de tiempo sencilla.

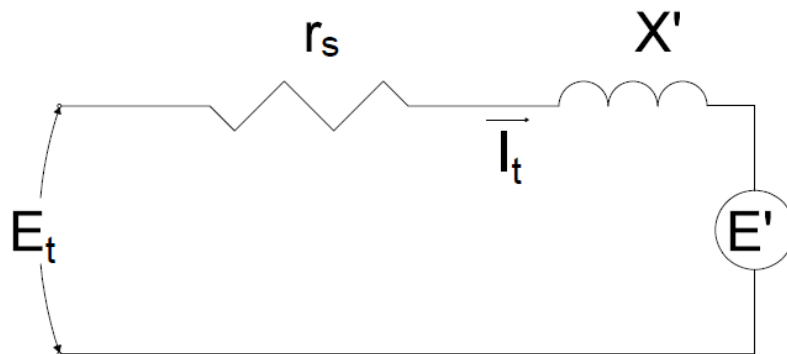


fig. 3.3 circuito equivalente de la máquina de inducción

La ecuación diferencial que describe la tasa de cambio de voltaje detrás de la reactancia transitoria  $X'$  es:

$$\frac{dE'}{dt} = -2\pi fsE' - \frac{1}{T} \{E' - j(X - X')I_t\} \quad (3.12)$$

Donde la constante de tiempo del rotor en circuito abierto  $T_0$  en segundos es:

$$T_0 = \frac{x_r + x_m}{2\pi fr_r}$$

Y la corriente en las terminales es:

$$I_t = (E_t' - E') \frac{1}{r_s + jX'}$$

Las reactancias  $X$  y  $X'$  pueden ser obtenidas del circuito equivalente en estado estable de la maquina síncrona de la figura 3.4, donde:

$r_s$  y  $x_s$  son la resistencia y reactancia del estator, PU

$r_r$  y  $x_r$  son la resistencia y reactancia del rotor, PU

$x_m$  es la reactancia de magnetización, PU

$s$  es el deslizamiento del rotor, PU

Tanto las resistencias como las reactancias se encuentran a la misma unidad de VA base. El desfase en PU esta dado por:



$$S = \frac{\text{Velocidad sincrona nominal} - \text{velocidad real}}{\text{velocidad sincrona nominal}}$$

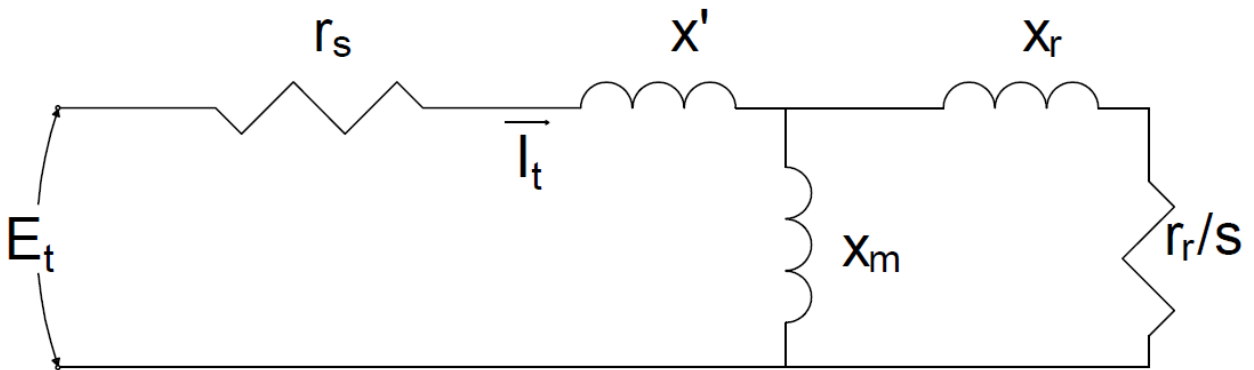


fig. 3.4 circuito equivalente de la máquina de inducción en estado estable.

Dado que la resistencia del rotor  $r_r$  es pequeña en comparación con las reactancias, esta comúnmente es despreciada en los cálculos de  $X$  y  $X'$ . Entonces, utilizando este circuito, la reactancia de circuito abierto es:

$$X = x_s + x_m$$

Y la reactancia del rotor bloqueado, es aproximadamente:

$$X' = x_s + \frac{x_m x_r}{x_m + x_r}$$

### 3.4 Ecuaciones del sistema de potencia

#### REPRESENTACIÓN DE CARGAS

Aquellas cargas en el sistema de potencia que no son motores representados por sus circuitos equivalentes se pueden manejar de distintas maneras durante el periodo transitorio. Las representaciones más comúnmente usadas son impedancias estáticas o admitancias a tierra, corriente constante con un factor de potencia constante, potencial real y reactiva constante, o una combinación de las representaciones anteriores.

Los parámetros asociados con las representaciones de impedancia estática y corriente constante se obtienen de las cargas programadas en los buses y los voltajes calculados de la solución de flujos de potencia en el sistema, previo a un disturbio. El valor inicial de la corriente constante se obtiene de:

$$I_{p0} = \frac{P_{Lp} - jQ_{Lp}}{E_p^*}$$



Donde  $P_{Lp}$  y  $Q_{Lp}$  son las cargas programadas en el bus y  $E_p$  es el voltaje calculado en el bus. La corriente  $I_{p0}$  fluye del bus  $p$  a tierra, es decir, al bus 0. La magnitud y ángulo del factor de potencia de  $I_{p0}$ , permanecer constante.

La admitancia estática  $Y_{p0}$ , usada para representar la carga en el bus  $p$ , se puede obtener de

$$(E_p - E_0)y_{p0} = I_{p0}$$

Donde  $E_p$  es el voltaje calculado del bus y  $E_0$  es el voltaje a tierra, igual a cero (0). Entonces:

$$y_{p0} = \frac{I_{p0}}{E_p} \quad (3.13)$$

Multiplicando tanto el dividendo como el divisor de la ecuación (3.13) por el conjugado del voltaje calculado del bus  $E_p^*$  para mantener la igualdad y separando los componentes en real e imaginario:

$$g_{p0} = \frac{P_{Lp}}{e_p^2 + f_p^2} \quad \text{y} \quad b_{p0} = \frac{Q_{Lp}}{e_p^2 + f_p^2}$$

Donde

$$y_{p0} = g_{p0} - jb_{p0}$$

## MODELO DE LA RED

Las ecuaciones para el desempeño de la red usados en el cálculo del flujo de potencia se pueden aplicar para describir el desempeño de la red durante un periodo transitorio.

Usando la matriz de admitancia de bus, con la tierra como referencia, la ecuación de voltaje para el bus  $p$  es:

$$E_p = \frac{(P_p - jQ_p)L_p}{E_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n YL_{pq} E_p \quad (3.14)$$

El término  $P_p - jQ_p / E_p^*$ , en la ecuación (3.14) representa la corriente de la carga en el bus  $p$ . Para la representación de la carga con corriente constante:

$$\frac{P_p - jQ_p}{(E_p^k)^*} = |I_{p0}| \angle \theta_p^k + \theta_p$$



Donde  $\theta_p$  es el ángulo del factor de potencia y  $\theta_p^k$  es el ángulo del voltaje con respecto a la referencia. Cuando se usa potencia constante para representar la carga  $(P_p - jQ_p)L_p$  será constante pero el voltaje en el bus  $E_p$  cambiará a cada iteración. Cuando la carga en el bus  $p$  se representa por una admitancia constante a tierra, la corriente impresa en el bus es cero y entonces:

$$\frac{P_p - jQ_p}{(E_p^k)^*} = 0$$

Al usar la ecuación (3.14) para describir el comportamiento de la red para el análisis transitorio, los parámetros deben de modificarse para incluir los efectos de los elementos equivalentes necesarios para representar las maquinas síncronas y de inducción, así como las cargas.

Los parámetros de las líneas  $YL_{pq}$  deben modificarse para agregar los nuevos elementos y un parámetro de línea adicional, que debe ser calculado para cada elemento nuevo de la red. Al representar las cargas como admitancias estáticas a tierra la ecuación de voltaje será

$$E_p = \sum_1^q YL_{pq} E_q - YL_{p0} E_0$$

Donde  $E_0$  es el voltaje de del bus a tierra, el cual es cero (0). Dado que  $E_0$  es cero, los parámetros de línea  $YL_{p0}$  no tiene que ser calculado.

En este caso de estudio, se utiliza el sistema de prueba de la *fig. 3.5*. Se representan todas las cargas como admitancias estáticas a tierra, el voltaje en el bus 1 está dado por la ecuación:

$$E_1 = -YL_{12}E_2 - YL_{13}E_3 - YL_{16}E_6 - YL_{10}E_0$$

Donde

$$YL_{12} = Y_{12}L_1$$

$$YL_{13} = Y_{13}L_1$$

$$YL_{16} = Y_{16}L_1$$

Los elementos  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$  y  $Y_{16}$  de la matriz de admitancias de la red, son las mismas que en la representación del flujo de potencia. Sin embargo:

$$L_{11} = \frac{1}{Y_{11}}$$

Donde  $Y_{11} = y_{12} + y_{13} + y_{16} + y_{10}$



Incluye la admitancia estática que representa la carga. Para calcular la admitancia de la carga se utiliza la siguiente ecuación:

$$y_{p0} = \frac{P_{Lp} - jQ_{Lp}}{e_p^2 + f_p^2}$$

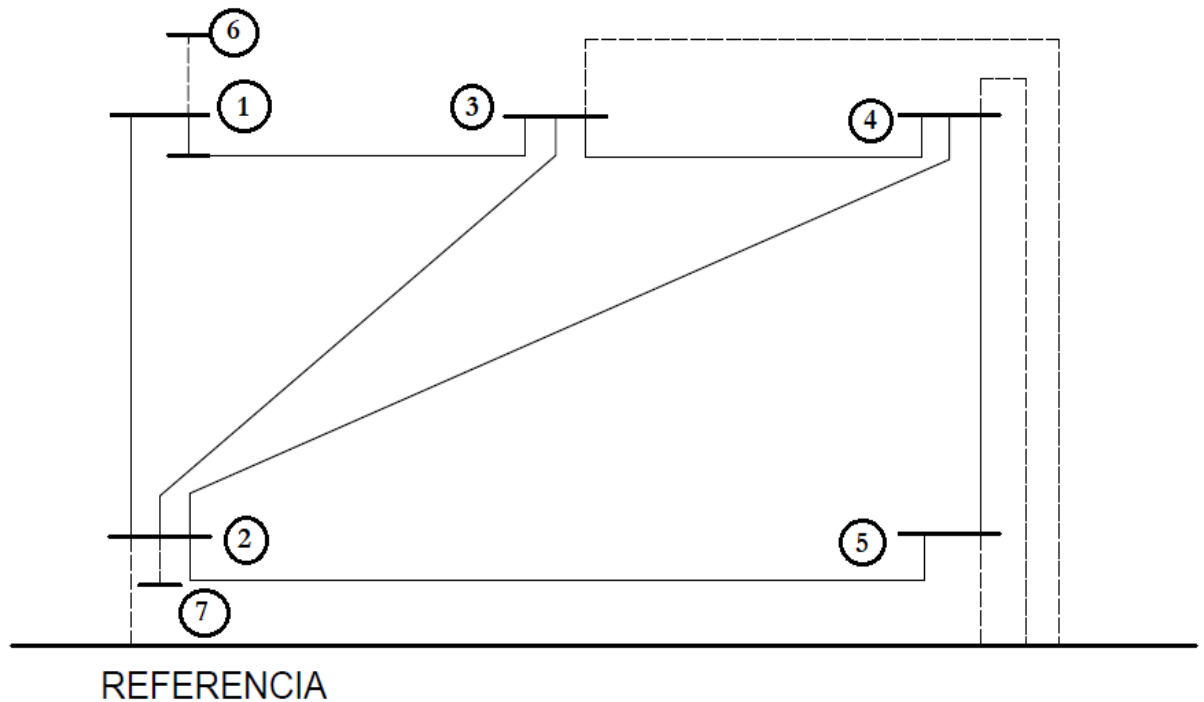


fig. 3.5 diagrama una línea de un sistema de potencia usado para el caso de análisis transitorio

la ecuación para el voltaje en el bus 2 es:

$$E_2 = -YL_{21}E_1 - YL_{23}E_3 - YL_{24}E_4 - YL_{25}E_5 - YL_{27}E_7$$

Donde el bus 7 es un nuevo representando la máquina. En este caso el elemento de la diagonal de admitancia para el bus 2 es:

$$Y_{22} = y_{21} + y_{23} + y_{24} + y_{25} + y_{27} + y_{20}$$

Donde  $y_{20}$  es la admitancia estática que representa la carga,  $y_{27}$  es la admitancia equivalente de la máquina. Entonces, las fórmulas para la solución iterativa por Gauss-Seidel de la red mostrada anteriormente, serán:



$$\begin{aligned}E_1^{k+1} &= -YL_{12}E_2^k - YL_{13}E_3^k - YL_{16}E_6 \\E_2^{k+1} &= -YL_{21}E_1^{k+1} - YL_{23}E_3^k - YL_{24}E_4^k - YL_{25}E_5^k - YL_{27}E_7 \\E_3^{k+1} &= -YL_{31}E_1^{k+1} - YL_{32}E_2^{k+1} - YL_{34}E_4^k \\E_4^{k+1} &= -YL_{42}E_2^{k+1} - YL_{43}E_3^{k+1} - YL_{45}E_5^k \\E_5^{k+1} &= -YL_{52}E_2^{k+1} - YL_{54}E_4^{k+1}\end{aligned}$$

Los voltajes iniciales son obtenidos de la solución de flujos de potencia anterior al disturbio. Los valores iniciales para los buses 6 y 7 son obtenidos del circuito equivalente que representa las máquinas. Los siguientes voltajes para estos buses son calculados de las ecuaciones diferenciales que describen el desempeño de las máquinas.

Durante el cálculo iterativo las magnitudes y ángulos de fase del bus de voltaje detrás de las admitancias equivalentes de la maquina se mantienen fijos. Si una falla trifásica balanceada se simula, el voltaje del bus donde se presenta la falla se vuelve cero y se mantiene cero durante el cálculo de la falla.

Existe otro método en el cual se emplea la matriz de impedancias para el estudio de estabilidad, pero no al no ser empleado para la solución del problema expuesto en esta tesis, no se ahondará en él.

En el procedimiento descrito, el representar las maquinas como una fuente de voltaje detrás de la admitancia de maquina es una aplicación de teorema de Thévenin. Un método alternativo es representar la maquina como una fuente de corriente entre las terminales de máquina y la tierra, y en paralelo con la impedancia de máquina, lo cual es la aplicación del teorema de Norton.

### 3.5 Técnicas de Solución

El primer paso en un estudio de estabilidad transitoria es el cálculo del flujo de potencia para obtener las condiciones previas a la falla. Luego los datos de la red deben de ser modificada para corresponder a la representación deseada para el análisis transitorio. Las corrientes de la máquina previas al disturbio se calculan de:

$$I_{ii} = \frac{P_{ii} - jQ_{ii}}{E_{ii}^*} \quad i = 1, 2, 3... m$$

Donde  $m$  es el número de máquinas y  $P_{ii}$  y  $Q_{ii}$  son las potencias reales y reactivas programadas o calculadas en terminales. La potencia calculada para la maquina en el bus de compensación, así como los voltajes en terminales, se obtienen de la solución inicial del flujo de potencia. Finalmente, los voltajes detrás de las impedancias de las maquinas se deben de calcular.



Cuando la máquina  $i$  es representada por una fuente de voltaje de magnitud constante detrás de la reactancia transitoria, los voltajes se obtienen de:

$$E'_{i(0)} = E_{ii} + r_{ai} I_{ii} + jx'_{di} I_{ii}$$

Donde:

$$E'_{i(0)} = e'_{i(0)} + jf'_{i(0)}$$

Y el ángulo de voltaje interno inicial es entonces:

$$\delta_{i(0)} = \tan^{-1} \frac{f'_{i(0)}}{e'_{i(0)}}$$

La velocidad inicial  $\omega_{i(0)}$  en radianes/segundo es igual a  $2\pi f$  donde  $f$  es la frecuencia del sistema. La potencia mecánica inicial de entrada  $P_{mi(0)}$  es igual a la potencia eléctrica  $P_{ei}$  antes del disturbio, que se puede obtener de:

$$P_{ei} = P_{ii} + |I_{ii}|^2 r_{ai}$$

Donde  $|I_{ii}|^2 r_{ai}$  representa las pérdidas en el estator.

El siguiente paso es cambiar los parámetros del sistema para simular el disturbio. Las pérdidas en generación, cargas o líneas de transmisión se pueden simular al remover de la red los elementos apropiados. Una falla trifásica se puede simular al ajustar el voltaje en el bus fallado a cero. Luego, las ecuaciones modificadas de la red se resuelven para obtener las condiciones de sistema en el instante después que ocurre el disturbio.

Las técnicas descritas para la solución de flujos de potencia se utilizan para obtener los nuevos voltajes de la red. En la solución iterativa, sin embargo, los buses detrás de las impedancias de las máquinas se tratan diferente, dependiendo de la representación de la máquina. Cuando la maquina es representada por un voltaje de magnitud constante detrás de la reactancia transitoria, el voltaje interno de la máquina se mantiene constante durante todo el proceso iterativo.

Cuando la solución de la red se ha obtenido, la corriente en terminales de la máquina se vuelve el valor inicial para la solución de las ecuaciones diferenciales. Se utiliza para calcular la potencia inicial:

$$P_{ei(0)} = R_e(I_{ii(0)}, E'_{i(0)}^*)$$

### Método modificado de Euler

Cuando la maquina se representa por un voltaje de magnitud constante detrás de la reactancia transitoria, es necesario resolver dos ecuaciones diferenciales de primer orden para obtener



los cambios en el ángulo del voltaje interno  $\delta_i$  y la velocidad de la máquina. Así para un problema de con  $m$  máquinas donde todas las máquinas son representadas de manera simplificada, se necesitan resolver  $2m$  ecuaciones diferenciales de manera simultánea. Estas ecuaciones son:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_{i(t)} - 2\pi f \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei(t)}) \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3.15)$$

si no se considera la acción del gobernador turbina,  $P_{mi}$  permanece constante y  $P_{mi} = P_{mi(0)}$ .

En la aplicación del método modificado de Euler, las estimaciones iniciales de los ángulos de los voltajes internos y las velocidades de las máquinas en un tiempo  $t + \Delta t$  se obtienen de:

$$\begin{aligned} \delta_{i(t+\Delta t)}^0 &= \delta_{i(t)}^{(1)} + \left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{(t)} \Delta t \\ \omega_{i(t+\Delta t)}^0 &= \omega_{i(t)}^1 + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t)} \Delta t \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

Donde las derivadas son evaluadas en las ecuaciones (3.15) y  $P_{ei(t)}$  son las potencias de las máquinas en el tiempo  $t$ . Cuando  $t=0$ , las potencias de la máquina  $P_{ei(0)}$  se obtienen de la solución de la red en el instante después de que el disturbio ocurre.

Las segundas estimaciones se obtienen por la evaluación de las derivadas en el tiempo  $t + \Delta t$ . Para esto es necesario determinar las potencias de máquinas en este nuevo tiempo. Estas potencias se obtienen iniciando por el cálculo de nuevos componentes del voltaje interno por:

$$\begin{aligned} e_{i(t+\Delta t)}^{(0)} &= |E_i| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} \\ f_{i(t+\Delta t)}^{(0)} &= |E_i| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} \end{aligned}$$

Luego se obtiene una solución de la red manteniendo fijo los voltajes internos en los buses de las máquinas. Cuando hay una falla trifásica en el bus  $f$ , el voltaje  $E_f$  también se mantiene fijo en cero. Con los voltajes del bus y voltajes internos, la corriente en terminales de la máquina se pueden calcular de:

$$I_{ii(t+\Delta t)}^{(0)} = (E_{i(t+\Delta t)}^{(0)} - E_{ii(t+\Delta t)}^{(0)}) \frac{1}{r_{ai} + jx'_{di}}$$

Y las nuevas estimaciones de potencias de las máquinas se obtienen de

$$Pe_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \{I_{ii(t+\Delta t)}^{(0)} (E_{ii(t+\Delta t)}^{(0)})^*\}$$



Las segundas estimaciones para los voltajes internos y velocidades de las maquinas se obtienen de

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left( \frac{\left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{(t)} + \left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left( \frac{\left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t)} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

$$i=1, 2, \dots, m$$

Donde

$$\left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{(t+\Delta t)} = \omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} - 2\pi f$$

$$\left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t+\Delta t)} = \frac{\pi f}{H} (P_{mi} - P_{ei(t+\Delta t)}^{(0)})$$

Los voltajes finales en  $t+\Delta t$  para las maquinas son:

$$e_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$$

$$f_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = |E_i| \text{sen} \delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)}$$

para  $i = 1, 2, \dots, m$

Después las ecuaciones de la red son resueltas otra vez para obtener los voltajes finales en el tiempo  $t+\Delta t$ . Los voltajes del bus son usados en conjunto con los voltajes internos para obtener las corrientes y potencias de las máquinas y los flujos de potencia en la red. El tiempo se incrementa en  $\Delta t$  y se hace una prueba para determinar si una operación por cierre o apertura se debe realizar o si el estado de la falla se ha de modificar.

Si una operación está programada, se realizan los cambios apropiados en los parámetros o variables de la red o ambos. Luego las ecuaciones de la red se resuelven para obtener las condiciones después de que ocurre el cambio. En este cálculo los voltajes internos se mantienen fijos a los valores actuales. Luego se obtienen estimaciones para el siguiente incremento de tiempo. El proceso se repite hasta que  $t$  es igual al valor máximo  $T_{(max)}$  especificado para el estudio.



- Diagrama de flujo

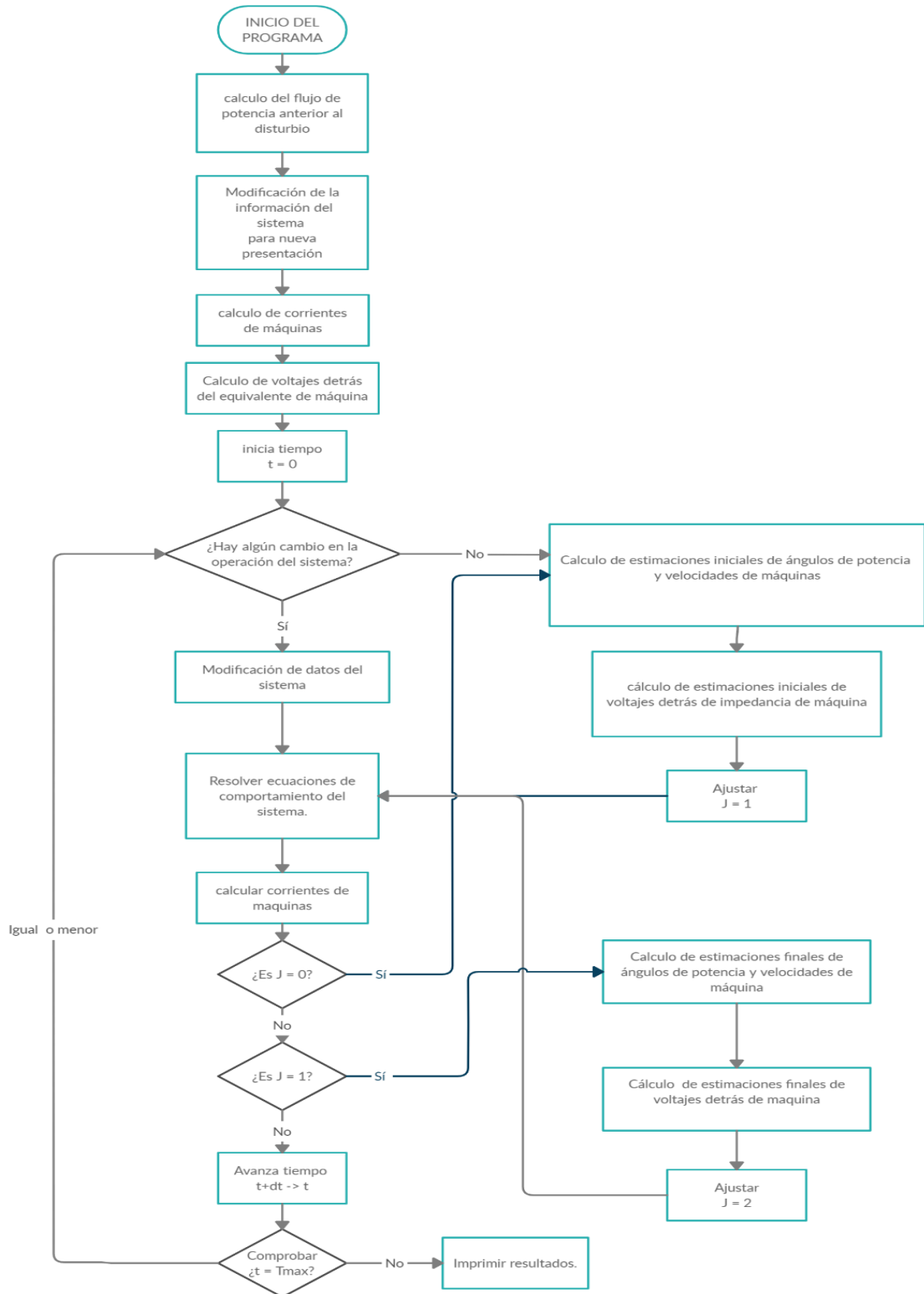


fig. 3.6 Diagrama de flujo del método de Euler modificado aplicado a cálculos de estabilidad transitoria



### 3.6 Descripción del programa desarrollado

- Descripción general

El programa realizado permite al usuario conocer las variaciones que existen tanto en los ángulos de voltaje interno de las máquinas y las velocidades de estas.

Para su desarrollo fue necesario conocer el método de integración numérica iterativo de Euler modificado, desde su estructura hasta la manera de implementarlo en la solución de análisis de estabilidad transitoria. Así como el método numérico iterativo de Gauss-Seidel para el cálculo de flujos de potencia, ya que estos son empleados en el análisis de estabilidad transitoria.

Al ser un programa desarrollado en Matlab, se realizó utilizando la programación modular; por lo que lo primero que se desarrolló fueron los subprocesos previamente delimitados por los elementos de entrada y los datos de salida, los cuales se usarán como datos de entrada en el siguiente subprograma; y así sucesivamente hasta obtener las estimaciones finales de ángulos de voltajes internos y velocidad de máquina.

El programa se guía por medio de “flags” o banderas las cuales sirven para identificar en que parte del proceso iterativo se encuentra, así como para poder tomar una decisión de que acción se realizará. También cuenta con un contador que permite al programa identificar cuando se realiza una operación de apertura o liberación de falla, o algún otro cambio dentro de los parámetros del sistema para realizar modificaciones a la solución de las ecuaciones del comportamiento del sistema.



## 4 Resultados

### 4.1 Introducción

Una vez estudiada y comprendida la teoría explicada en el capítulo anterior, en el presente capítulo se pondrá en práctica los conocimientos adquiridos durante la investigación, así como se pondrá a prueba el programa diseñado para el análisis de la estabilidad transitoria.

En este capítulo se presenta paso a paso los cálculos necesarios para completar las primeras dos iteraciones del método, esto con el fin de ilustrar las modificaciones que se realizan en el procedimiento si el sistema presenta operaciones que cambien la configuración de este, como operaciones de apertura o cierre de protecciones. Asimismo, se presentan las gráficas que permiten determinar si el sistema se puede considerar transitoriamente estable.

### 4.2 Descripción del sistema de prueba

El sistema utilizado (Fig. 4.1) para probar la funcionalidad del programa realizado es un sistema aislado hipotético, el cual consta de cinco buses, dos de ellos (bus 1 y 2) con máquinas y cuatro se encuentran conectados a cargas (buses 2, 3, 4 y 5).

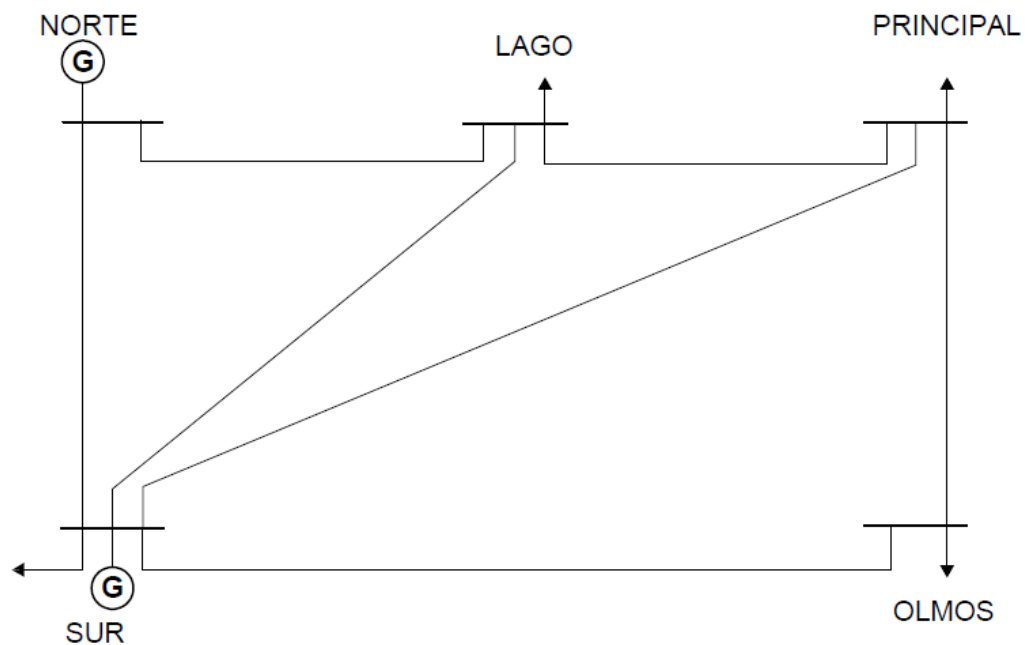


Fig. 4.1 Diagrama sencillo para cálculo de estabilidad transitoria



De este diagrama y la información de los componentes del sistema se obtiene la matriz  $Y_{bus}$ :

$$Y_{BUS} = \begin{matrix} 6.25000 - j18.69500 & -5.00000 + j15.00000 & -1.25000 + j3.75000 & & & \\ -5.00000 + j15.00000 & 10.83334 - j32.41500 & -1.66667 + j5.00000 & -1.66667 + j5.00000 & -2.50000 + j7.50000 & \\ -1.25000 + j3.75000 & -1.66667 + j5.00000 & 12.9167 - j38.6950 & -10.0000 + j30.0000 & & \\ & -1.66667 + j5.00000 & -10.0000 + j30.0000 & 12.9167 - j38.6950 & -1.2500 + j3.75000 & \\ & -2.50000 + j7.50000 & & -1.2500 + j3.75000 & 3.75000 - j11.2100 & \end{matrix}$$

La cual sirve para obtener las ecuaciones que representen el comportamiento del sistema en esta estable o estacionario, anterior a la falla; las ecuaciones obtenidas son:

$$\begin{aligned} E_1^{k+1} &= -Y_{L_{12}}E_2^k - Y_{L_{13}}E_3^k - Y_{L_{16}}E_6 \\ E_2^{k+1} &= -Y_{L_{21}}E_1^{k+1} - Y_{L_{23}}E_3^k - Y_{L_{24}}E_4^k - Y_{L_{25}}E_5^k - Y_{L_{27}}E_7 \\ E_3^{k+1} &= -Y_{L_{31}}E_1^{k+1} - Y_{L_{32}}E_2^{k+1} - Y_{L_{34}}E_4^k \\ E_4^{k+1} &= -Y_{L_{42}}E_2^{k+1} - Y_{L_{43}}E_3^{k+1} - Y_{L_{45}}E_5^k \\ E_5^{k+1} &= -Y_{L_{52}}E_2^{k+1} - Y_{L_{54}}E_4^{k+1} \end{aligned}$$

Ahora se procede a realizar el cálculo de flujos de potencia para obtener los datos de operación del sistema anteriores a la falla, los cuales se muestran en la tabla siguiente:

Numero de bus $p$	Voltaje de bus $E_p$	Generación		Carga	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.06000+j0.00000	129.565	-7.480	0.0	0.0
2	1.04621 - j0.05128	40.0	30.0	20.0	10.0
3	1.02032 - j0.08920	0.0	0.0	45.0	15.0
4	1.01917 - j0.09506	0.0	0.0	40.0	5.0
5	1.01209 - j0.10906	0.0	0.0	60.0	10.0

Tabla 4.1 Condiciones anteriores a la falla, de cálculo de flujos de potencia.

Posterior a esto, el sistema es modificado para realizar el adecuado estudio de estabilidad, representando como nuevos buses (bus 6 y 7) a los voltajes detrás de las admitancias equivalentes a las máquinas conectadas al sistema, así como agregando las admitancias a tierra correspondientes a la representación de las cargas conectadas a los buses; por lo que las ecuaciones del sistema que previamente se habían utilizado para calcular los voltajes anteriores a la falla se tuvieron que modificar para agregar los nuevos componentes.





El parámetro de línea modificado  $YL_{12}$  es:

$$YL_{12} = Y_{12} \left( \frac{1}{Y_{11} + y_{16}} \right)$$

$$YL_{12} = \frac{-5.00000 + j15.00000}{6.25000 - j22.69500}$$

$$YL_{12} = -0.67074 - j0.03560$$

Donde el elemento  $Y_{11}$  es obtenido de la matriz  $Y_{bus}$  y el elemento  $y_{16}$  de la tabla XX.2, en este caso el elemento  $y_{p0}$  es igual a cero, debido a que el bus 1 no cuenta con una carga conectada a él. Los demás parámetros de línea modificados son calculados de manera similar y dados a continuación:

$$YL_{13} = -0.16769 - j0.00890$$

$$YL_{16} = -0.16383 + j0.04512$$

$$YL_{21} = -0.45235 - j0.00052$$

$$YL_{23} = -0.15078 - j0.00017$$

$$YL_{24} = -0.15078 - j0.00017$$

$$YL_{25} = -0.22618 - j0.00026$$

$$YL_{27} = -0.01810 + j0.00601$$

$$YL_{31} = -0.09625 + j0.00089$$

$$YL_{32} = -0.12833 + j0.00119$$

$$YL_{34} = -0.77000 + j0.00711$$

$$YL_{42} = -0.12866 + j0.00115$$

$$YL_{43} = -0.77198 + j0.00687$$

$$YL_{45} = -0.09650 + j0.00086$$

$$YL_{52} = -0.65236 + j0.02866$$

$$YL_{54} = -0.32618 + j0.01433$$

El siguiente paso es calcular los voltajes detrás de las admitancias equivalentes de máquina, por medio de la ecuación:

$$E'_i = E_{ii} + jx'_{di} I_{ii} \quad i = n+1, n+2, \dots, n+m$$

Donde:



$$I_{ii} = \frac{P_{ii} - jQ_{ii}}{E_{ii}^*}$$

Y  $n$  es el número de buses de la red y  $m$  es el número de la máquina. Para la máquina en el bus 1, el voltaje es:

$$E_6 = (1.06 + j0.0) + (j0.25) \left( \frac{1.29569 + j0.07480}{1.06 - j0.0} \right)$$
$$E_6 = 1.04236 + j0.30558$$

Y el voltaje detrás de la admitancia equivalente de máquina 2 es obtenido de manera similar y es:

$$E_7 = (1.04621 - j0.05128) + (j1.50) \left( \frac{0.040 - j0.030}{1.04621 - j0.05128} \right)$$
$$E_7 = 1.50335 + j0.49981$$

Una vez obtenido esto se procede a realizar el cálculo para determinar la estabilidad transitoria.

### 4.3 Simulaciones

Los casos de estudio con el sistema de prueba presentado son cuatro, los dos primeros presentan variaciones en los tiempos de apertura o “limpieza” de la falla y en los dos posteriores se realizó una modificación en los parámetros de las máquinas conectadas al sistema.

- Caso 1 condición 001

En este primer caso, la falla es simulada en el bus 2, por lo que el voltaje en este punto es igualado a cero (0) y mantenido fijo durante el cálculo.

Entonces, el cálculo de estabilidad se inicia, resolviendo las ecuaciones del sistema para obtener los valores del sistema en el instante en que sucede la falla. Obteniendo:

$$E_1 = 0.19234 + j0.00330$$
$$E_2 = 0.0 + j0.0$$
$$E_3 = 0.04707 - j0.00096$$
$$E_4 = 0.03758 - j0.00118$$
$$E_5 = 0.01226 - j0.00093$$

El siguiente paso de esto es el cálculo de las magnitudes de las máquinas durante el evento, mediante la ecuación:



$$I_{ii} = (E_i' - E_{ii})y_{pi}$$

entonces

$$\begin{aligned} I_{61} &= \{(1.04236 + j0.30558) - (0.19234 + j0.00330)\}(0.0 - j4.0) \\ &= 1.20912 - j3.40008 \end{aligned}$$

Y para la maquina 2 (bus 6) será:

$$\begin{aligned} I_{72} &= \{(1.50335 + j0.49981) - (0.0 - j0.66667)\} \\ &= 0.33321 - j1.00233 \end{aligned}$$

Y las potencias de las máquinas:

$$\begin{aligned} P_{e6} &= (1.20912)(1.04236) - (3.40008)(0.30558) \\ P_{e6} &= 0.22134 \end{aligned}$$

Y dado que el voltaje en el bus 2 es cero por la falla, la potencia de la maquina es cero (0).

Las estimaciones iniciales del ángulo de voltaje interno y la velocidad de las máquinas en el  $t+\Delta t$  son obtenidas por las ecuaciones diferenciales definidas en el capítulo pasado. La tasa de cambio de velocidad en las maquinas es calculada de:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei(t)})$$

En el tiempo  $t = 0$  para la maquina 1,

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\omega_6}{dt} \right|_{(0)} &= \frac{3.1416(60)}{50.0} (1.2965 - 0.22134) \\ &= 4.05006 \end{aligned}$$

Así mismo, para la maquina 2,

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\omega_7}{dt} \right|_{(0)} &= \frac{3.1416(60)}{1.0} (0.4000 - 0.0) \\ &= 75.3984 \end{aligned}$$

Lo siguiente, las estimaciones iniciales de la velocidad de las máquinas en  $t+\Delta t$  son calculadas de:

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$



Donde  $\omega_{i(t)}^{(1)}$  en  $t = 0$  es la velocidad nominal, igual a  $2\pi f$ , y  $\Delta t = 0.02$ . Entonces, para la maquina en el bus 1:

$$\begin{aligned}\omega_{6(0.02)}^{(0)} &= 2(3.1416)(60) + (4.05006)(0.02) \\ &= 377.07300\end{aligned}$$

Asimismo, para la máquina 2:

$$\begin{aligned}\omega_{7(0.02)}^{(0)} &= 2(3.1416)(60) + (75.3984)(0.02) \\ &= 378.49997\end{aligned}$$

Para el cálculo de la tasa de cambio del ángulo de voltaje, se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{d\delta_i}{dx} = \omega_{i(t)} - 2\pi f$$

Dado que  $\omega_{i(t)}$  en tiempo  $t=0$  es la velocidad nominal, entonces para las máquinas:

$$\left. \frac{d\delta_6}{dt} \right|_{(0)} = 0.0 \quad ; \quad \left. \frac{d\delta_7}{dt} \right|_{(0)} = 0.0$$

Las estimaciones iniciales de los ángulos de voltaje interno para las máquinas son dadas por:

$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{(t)} \Delta t$$

Entonces, para las máquinas el ángulo de voltaje interno de máquina en radianes es:

$$\begin{aligned}\delta_{6(0.02)}^{(0)} &= 0.28517 \\ \delta_{7(0.02)}^{(0)} &= 0.32097\end{aligned}$$

Con esto se calculan las nuevas componentes de los voltajes detrás de las admitancias equivalentes que representan las máquinas, por medio de:

$$\begin{aligned}e_{i(t+\Delta t)}^{(0)} &= |E'_i| \cos \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)} \\ f_{i(t+\Delta t)}^{(0)} &= |E'_i| \sin \delta_{i(t+\Delta t)}^{(0)}\end{aligned}$$

Estas nuevas componentes remplazan las anteriores y se resuelven por segunda vez las ecuaciones del comportamiento del sistema, para obtener los nuevos voltajes en los buses.

Dado que no hubo cambios en los ángulos de los voltajes, los obtenidos en el cálculo previo son mantenidos y los parámetros de máquinas (corriente, potencias) son mantenidas. Por lo tanto, las tasas de cambio de la velocidad de la maquina es la misma en  $t+\Delta t = 0.02$ , por lo que:



$$\left. \frac{d\omega_6}{dt} \right|_{(0.02)} = 4.05006 \quad \text{y} \quad \left. \frac{d\omega_7}{dt} \right|_{(0.02)} = 75.39484$$

Las estimaciones finales de las velocidades de máquina para  $t+\Delta t = 0.02$ , son calculadas en:

$$\omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \omega_{i(t)}^{(1)} + \left( \frac{\left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t)} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

Entonces, para las maquinas 1 y 2:

$$\begin{aligned} \omega_{6(0.02)}^{(1)} &= 2(3.1416)(60) + \left( \frac{4.05006 + 4.05006}{2} \right) (0.02) \\ &= 377.0300 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{7(0.02)}^{(1)} &= 2(3.1416)(60) + \left( \frac{75.3985 + 75.3984}{2} \right) (0.02) \\ &= 378.49997 \end{aligned}$$

Las nuevas tasas de cambio del ángulo de voltaje interno en  $t+\Delta t$  son calculadas de:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_{i(t+\Delta t)}^{(1)} - 2\pi f$$

Entonces para las maquinas 1 y 2:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\delta_6}{dt} \right|_{0.02} &= 377.0730 - 376.9920 \\ &= 0.08100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\delta_7}{dt} \right|_{0.02} &= 378.49997 - 376.9920 \\ &= 1.50079 \end{aligned}$$

Las estimaciones finales para el ángulo de voltaje interno de las maquinas en  $t+\Delta t$  son calculadas de:



$$\delta_{i(t+\Delta t)}^{(1)} = \delta_{i(t)}^{(1)} + \left( \frac{\frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t)} + \frac{d\delta_i}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)}}{2} \right) \Delta t$$

Entonces, para las maquinas 1 y 2:

$$\begin{aligned} \delta_{6(0.02)}^{(1)} &= 0.28517 + \left( \frac{0.0 + 0.08100}{2} \right) (0.02) \\ &= 0.028517 + 0.00081 \\ &= 0.28598 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{7(0.02)}^{(1)} &= 0.32097 + \left( \frac{0.0 + 1.50797}{2} \right) (0.02) \\ &= 0.33605 \end{aligned}$$

Los ángulos de voltaje interno en grados son:

$$\begin{aligned} \delta_{6(0.02)}^{(1)} &= 0.28598(180 / \pi) = 16.38540^\circ \\ \delta_{7(0.02)}^{(1)} &= 0.33605(180 / \pi) = 19.25420^\circ \end{aligned}$$

Sustituyendo estos nuevos ángulos para obtener las nuevas componentes del voltaje detrás de las admitancias equivalentes de maquina, obtenemos:

$$\begin{aligned} e_6^{(1)} &= 1.08623 \cos(16.38540) \\ &= 1.04212 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_6^{(1)} &= 1.08623 \sin(16.38540) \\ &= 0.30641 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} e_7^{(1)} &= 1.58426 \cos(19.25420) \\ &= 1.49564 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_7^{(1)} &= 1.58426 \sin(19.25420) \\ &= 0.52243 \end{aligned}$$

Se realiza la última fase de esta iteración, por lo que se procede a calcular los voltajes finales en los buses por medio de las ecuaciones de comportamiento del sistema en  $t+\Delta t = 0.02$ . Los voltajes obtenidos son:



$$E_1 = 0.19258 + j0.00353$$

$$E_2 = 0.0$$

$$E_3 = 0.04815 - j0.00114$$

$$E_4 = 0.03845 - j0.00133$$

$$E_5 = 0.01249 - j0.00097$$

Por último, se calculan las corrientes y potencias de las máquinas en  $t+\Delta t = 0.02$ , donde para la maquina 1:

$$\begin{aligned} I_{61(0.02)} &= \{(1.04212 + j0.30641) - (0.19258 + j0.00353)\}(0.0 - j4.0) \\ &= 1.21152 - j3.39816 \end{aligned}$$

y para la potencia real

$$\begin{aligned} P_{e6(0.02)} &= (1.21152)(1.04212) - (3.39816)(0.30641) \\ &= 0.22132 \end{aligned}$$

Para la maquina 2, la potencia será cero (0) debido a que el voltaje en el bus 2 sigue siendo cero; por lo tanto, la corriente será:

$$\begin{aligned} I_{72(0.02)} &= \{(1.49564 + j0.52243) - (0.0 + j0.0)\}(0.0 - j0.66667) \\ &= 0.34829 - j0.99710 \end{aligned}$$

Con estos cálculos se da por terminado el proceso para la iteración en  $t=0$  por lo que  $t= 0.02$  y  $t+\Delta t=0.04$ . Para esta nueva iteración los voltajes del bus no son calculados primero, debido a que no ha habido ninguna operación en las protecciones ni el sistema ha sufrido alguna operación. Entonces, se procede a calcular las primeras estimaciones del cambio de velocidad de las maquinas:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\omega_6}{dt} \right|_{0.02} &= \frac{3.1416(60)}{50.0} (1.29565 - 0.22132) \\ &= 4.05014 \end{aligned}$$

$$\left. \frac{d\omega_7}{dt} \right|_{0.02} = 75.39484$$

Debido a que la potencia de la maquina conectada al bus fallado es cero, el incremento de velocidad  $\left(\frac{d\omega_7}{dt}\right)$  se mantendrá mientras la falla no sea limpiada. Las estimaciones iniciales de las velocidades de máquina serán:



$$\begin{aligned}\omega_{6(0.04)}^{(0)} &= 377.0300 + (4.05014)(0.02) \\ &= 377.11100\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_{7(0.04)}^{(0)} &= 378.49997 + (75.39484)(0.02) \\ &= 380.00787\end{aligned}$$

En cuanto a las estimaciones del ángulo de voltaje interno, el incremento será:

$$\left. \frac{d\delta_6}{dt} \right|_{0.02} = 0.081$$

$$\left. \frac{d\delta_7}{dt} \right|_{0.02} = 1.50079$$

Las estimaciones del ángulo del voltaje interno de maquina son:

$$\begin{aligned}\delta_{6(0.04)}^{(0)} &= 0.28598 + 0.081(0.02) \\ &= 0.2876 \text{ rad} = 16.4782^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{7(0.04)}^{(0)} &= 0.33605 + 1.50079(0.02) \\ &= 0.36606 \text{ rad} = 19.2542^\circ\end{aligned}$$

Las nuevas componentes de voltaje de la máquina 1, son

$$\begin{aligned}e_{6(0.04)}^{(0)} &= |1.08623| \cos(16.4782) \\ &= 1.04162\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{6(0.04)}^{(0)} &= |1.08623| \sin(16.4782) \\ &= 0.30811\end{aligned}$$

Para la máquina 2:

$$\begin{aligned}e_{7(0.04)}^{(0)} &= |1.58426| \cos(19.2542) \\ &= 1.49564\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{7(0.04)}^{(0)} &= |1.58426| \sin(19.2542) \\ &= 0.52242\end{aligned}$$

Ahora se procede a calcular los voltajes del sistema para la estimación final por medio de las ecuaciones de sistema, dando:



$$E_1 = 0.19259 + j0.00373$$

$$E_2 = 0.0$$

$$E_3 = 0.04796 - j0.00103$$

$$E_4 = 0.03822 - j0.00122$$

$$E_5 = 0.01245 - j0.00095$$

Lo siguiente es calcular las corrientes y potencias de maquina:

$$\begin{aligned} I_{61} &= \{(1.04162 + j0.30811) - (0.19259 + j0.00373)\}(0.0 - j4.0) \\ &= 1.21752 - j3.39612 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{72} &= \{(1.49564 + j0.52242) - (0.0 + j0.0)\}(0.0 - j0.66667) \\ &= 0.34828 - j0.99710 \end{aligned}$$

Para las potencias de maquina:

$$\begin{aligned} P_{e6} &= (1.21752)(1.04162) - (3.39612)(0.30811) \\ &= 0.22181 \end{aligned}$$

Recordando que para la maquina 2, la potencia es cero, debido a que el bus en falla es al que está conectada.

Se realizan las estimaciones finales para  $t + \Delta t = 0.04$ , el aumento de velocidad es igual a

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\omega_6}{dt} \right|_{0.04} &= \frac{(3.1416)(60)}{50.0} (1.29565 - 0.22181) \\ &= 4.04829 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\omega_7}{dt} \right|_{0.04} &= \frac{(3.1416)(60)}{1.0} (0.04000 - 0.0) \\ &= 75.3984 \end{aligned}$$

Y las estimaciones finales de la velocidad de la máquina son:

$$\begin{aligned} \omega_{6(0.04)}^{(1)} &= 377.0300 + \left( \frac{4.05014 + 4.04829}{2} \right) (0.02) \\ &= 377.11098 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{7(0.04)}^{(1)} &= 378.00787 + \left( \frac{75.3984 + 75.3984}{2} \right) (0.02) \\ &= 379.51588 \end{aligned}$$

En cuanto al incremento en el ángulo de voltaje interno de máquina, estos son:



$$\left. \frac{d\delta_6}{dt} \right|_{0.04} = 377.11098 - 2(3.1416)(60)$$
$$= 0.11989$$

$$\left. \frac{d\delta_7}{dt} \right|_{0.04} = 379.51588 - 2(3.1416)(60)$$
$$= 2.52388$$

Y las estimaciones finales de los ángulos de voltaje interno de máquina son:

$$\delta_{6(0.04)}^{(1)} = 0.28598 + \left( \frac{0.081 + 0.11982}{2} \right) (0.02)$$
$$= 0.28799 \text{ rad} = 16.50061^\circ$$

$$\delta_{7(0.04)}^{(1)} = 0.33605 + \left( \frac{1.50079 + 2.52388}{2} \right) (0.02)$$
$$= 0.37629 \text{ rad} = 21.55982^\circ$$

Y se procede a recalcular las componentes de voltaje de máquina; para la máquina 1

$$e_{6(0.04)}^{(1)} = |1.08623| \cos(16.50061)$$
$$= 1.04150$$

$$f_{6(0.04)}^{(1)} = |1.08623| \sin(16.50061)$$
$$= 0.30852$$

Y para la máquina 2

$$e_{7(0.04)}^{(1)} = |1.58426| \cos(21.55982)$$
$$= 1.47342$$

$$f_{7(0.04)}^{(1)} = |1.58426| \sin(21.55982)$$
$$= 0.58217$$

Por último, volvemos a recalcular los voltajes finales en los buses en  $t+\Delta t=0.04$ , con las ecuaciones de sistema y obtenemos los parámetros de máquina.

$$E_1 = 0.19258 + j0.00381$$

$$E_2 = 0.0 + j0.0$$

$$E_3 = 0.04796 - j0.00101$$

$$E_4 = 0.03217 - j0.00120$$

$$E_5 = 0.01245 - j0.00094$$

Las corrientes finales en las máquinas son:



$$\begin{aligned} I_{61(0.04)} &= \{(1.04150 + j0.30852) - (0.19258 + j0.00381)\}(0.0 - j4.0) \\ &= 1.21844 - j3.39568 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{72(0.04)} &= \{(1.47342 + j0.58217) - (0.0 + j0.0)\}(0.0 - j0.6667) \\ &= 0.03881 - j0.98228 \end{aligned}$$

Y la potencia en la maquina 1:

$$\begin{aligned} P_{e6} &= (1.21844)(1.04150) - (3.39568)(0.30852) \\ &= 0.22137 \end{aligned}$$

Recordando que para la máquina 2 la potencia será igual a cero, debido a que se encuentra conectada en el bus fallado.

Este proceso se continua hasta  $t = 0.10$ , cuando la falla es limpiada del sistema, haciendo necesario un cálculo de voltajes del sistema en el instante de liberada la falla, con la modificación que a partir de este punto el voltaje en el bus 2 se vuelve a calcular y ya no es mantenido fijo.

Las gráficas que muestran el comportamiento del sistema durante este disturbio son las siguientes:

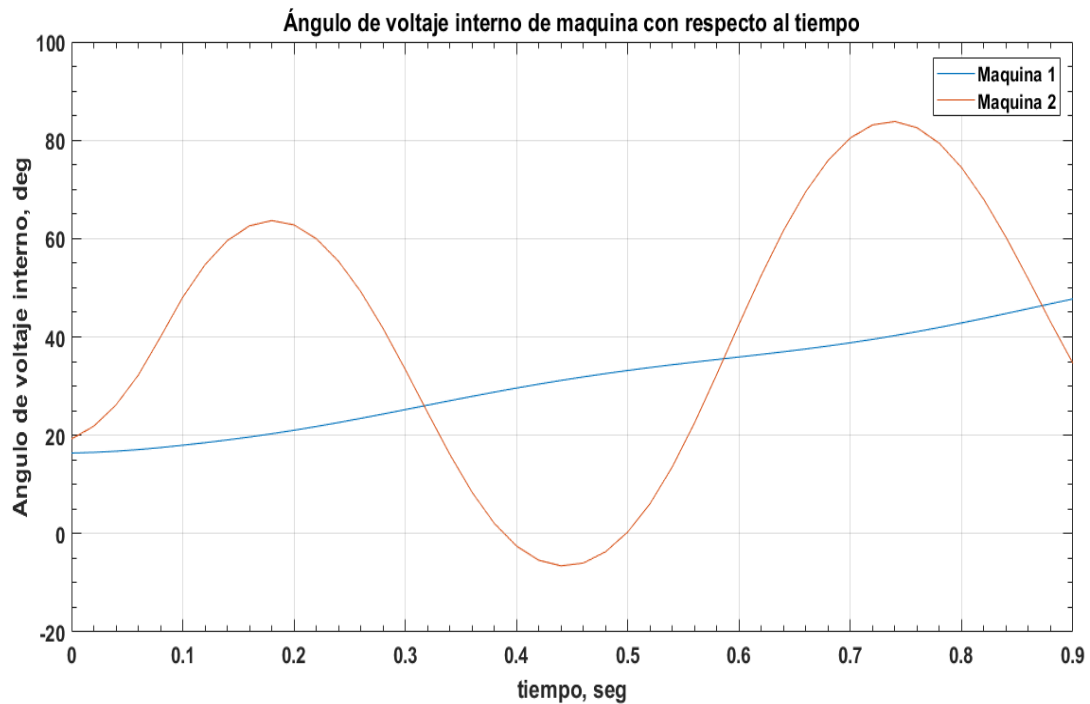


fig. 4.3 Grafica de ángulos de voltajes internos de máquina de caso 001

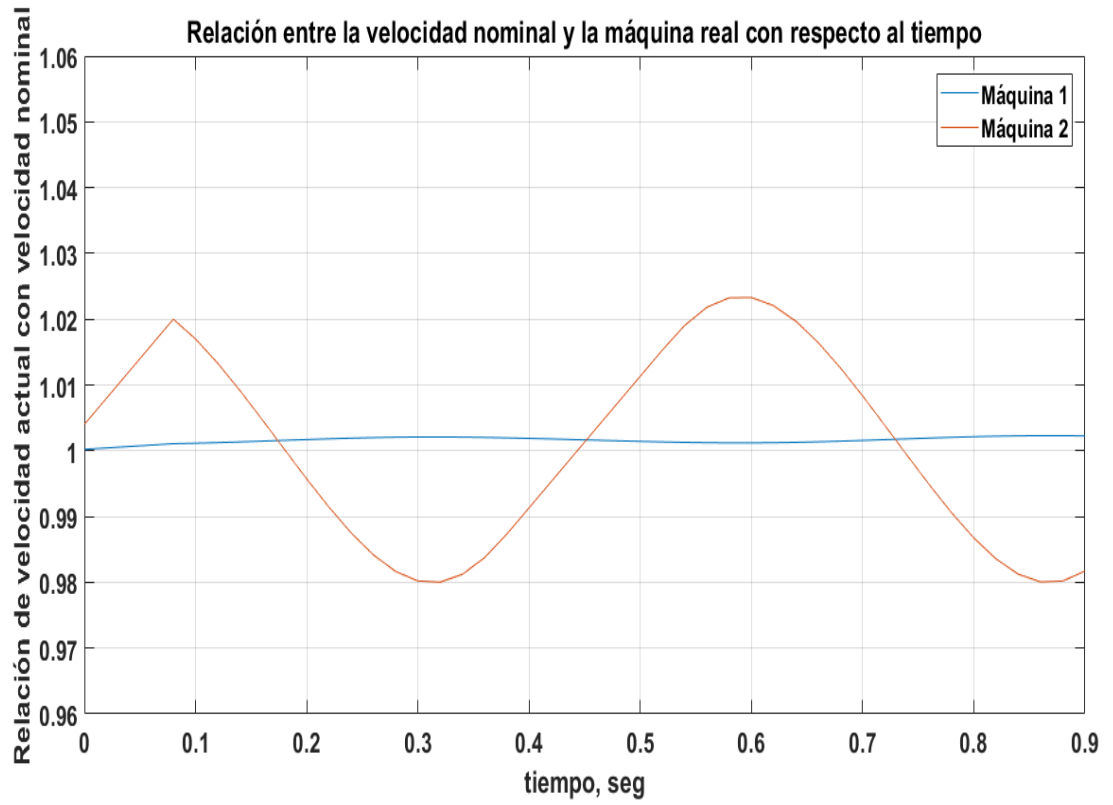


fig. 4.4 Gráfica de relación entre velocidades de maquinas de caso 001



- Caso 2 condición 002

Para el segundo caso, las condiciones anteriores a la falla se mantienen, así como los parámetros de las máquinas; lo único que cambia es el tiempo de operación de la falla, la cual se libera en  $t=0.2$ . Los datos obtenidos de este análisis se grafican en las figuras siguientes en las cuales se muestra el análisis de estabilidad.

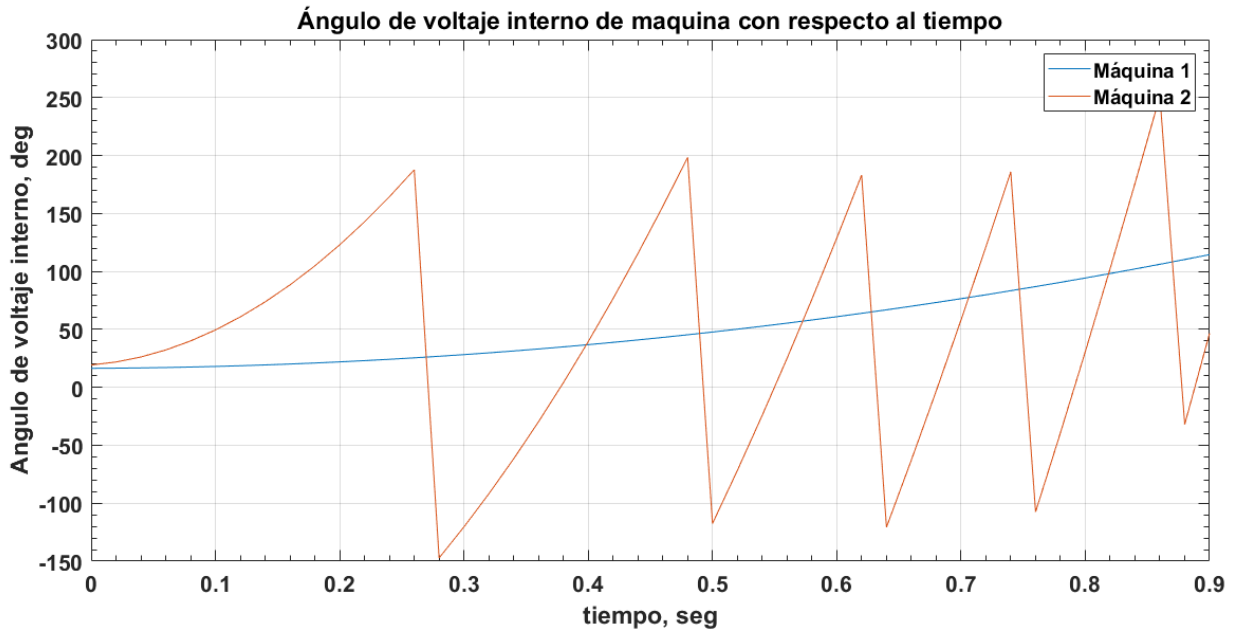


fig. 4.5 Gráfica de ángulos de voltajes internos de máquina de caso 002

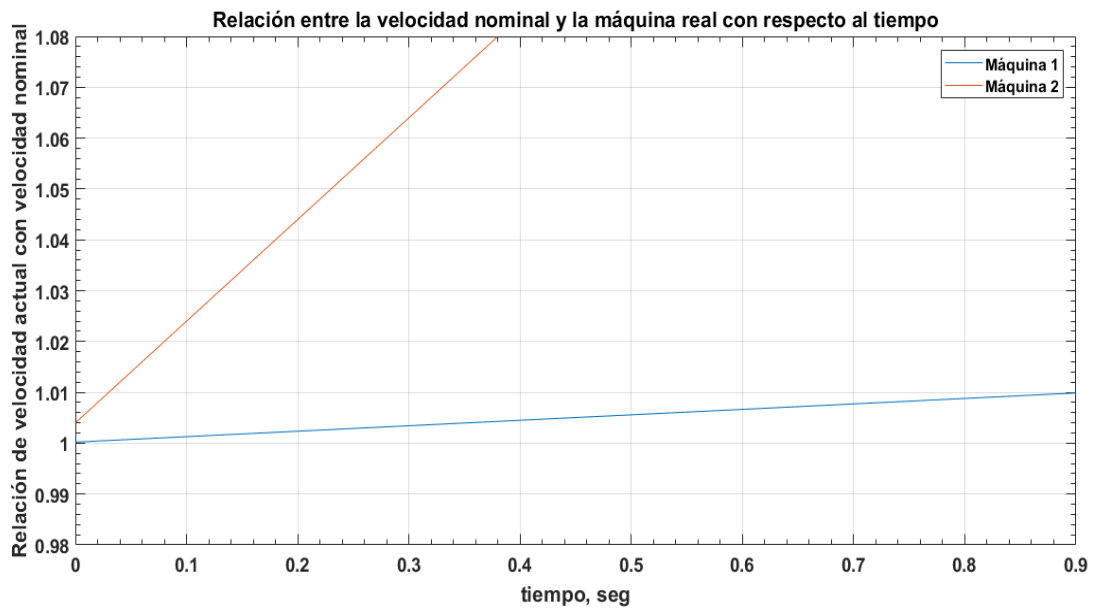


fig. 4.6 Gráfica de relación de velocidades de máquina de caso 002



- Caso 3 condición 003

Para el caso 3, las condiciones del sistema anteriores a la falla se mantienen, sin embargo, los valores de constantes de inercia se cambian, como se muestra en la tabla siguiente, con el objetivo de mostrar la sensibilidad del sistema y el efecto de estos parámetros en la estabilidad de todo el sistema. El tiempo de liberación de la falla será la misma que el caso 1, con  $t = 0.1$ .

Código de Bus $p - i$	Constante de inercia $H$	Reactancia transitoria $X'_d$	Admitancia equivalente. $Y_{pi}$
6 - 1	20.0	0.25	$-j4.0000$
7 - 2	5.0	1.50	$-j0.6667$

Las gráficas que muestran el comportamiento son:

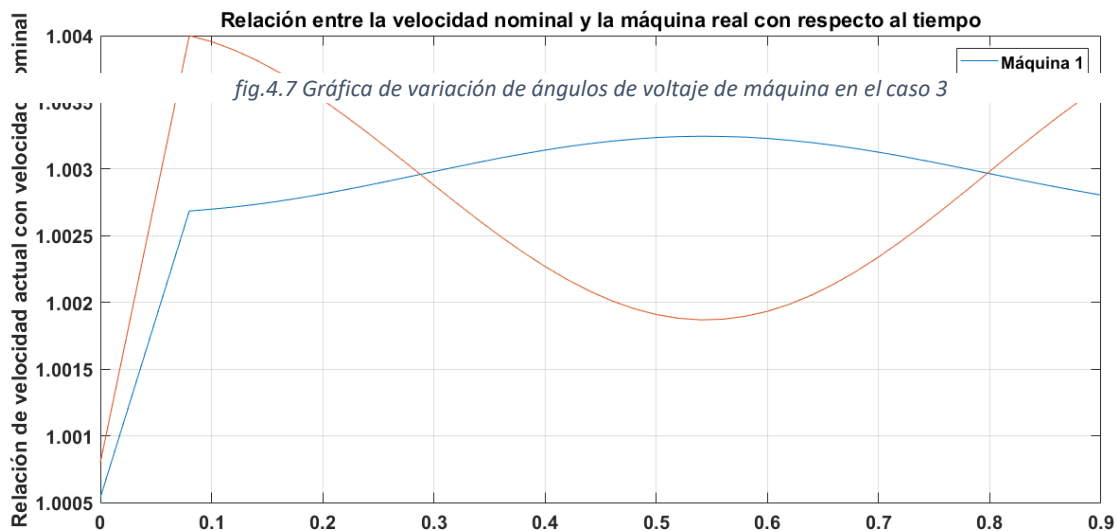
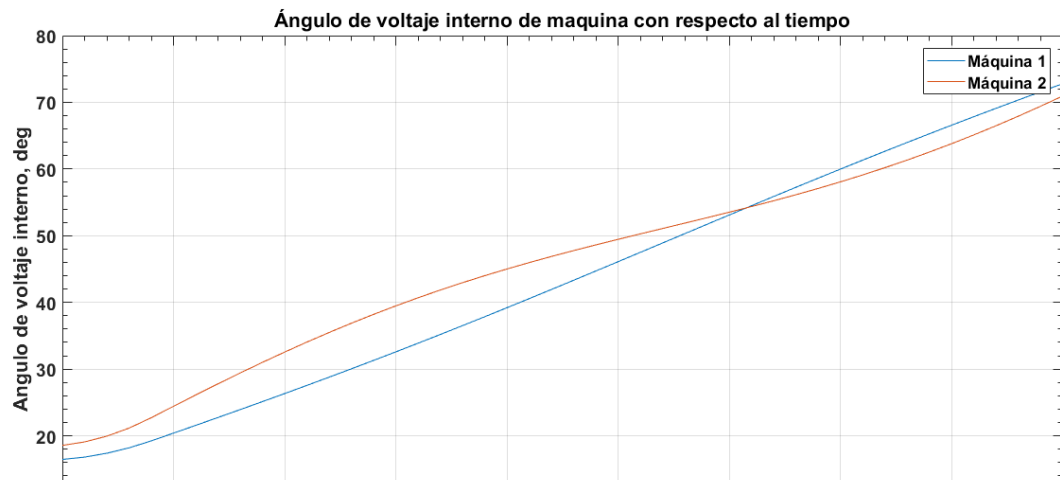


fig. 4.8 Gráfica de relación de velocidades de máquina en caso 3



- Caso 4 condición 004

Debido a que el sistema analizado es representado con ecuaciones diferenciales de segundo grado o con dos ecuaciones diferenciales lineales el sistema se puede considerar rígido, por lo cual las constantes de tiempo para ambas máquinas deben de ser precisas; pues si estas no coinciden, el método puede llegar a fallar en la representación del comportamiento de alguna de ellas.

Es por lo que para el caso 4, se busca mostrar la delicadeza del método, así como la necesidad de precisión en las variaciones de tiempo, por lo que se procede a modificar el paso de integración con  $\Delta t = 0.01$ .

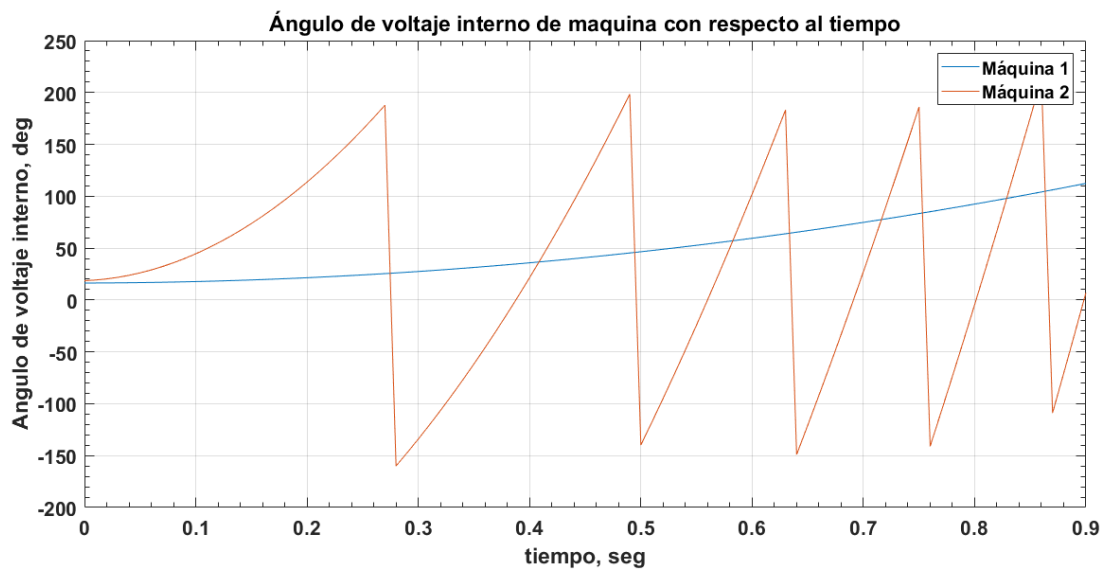


fig. 4.9 Gráfica para ángulos de voltaje de máquinas de caso 4

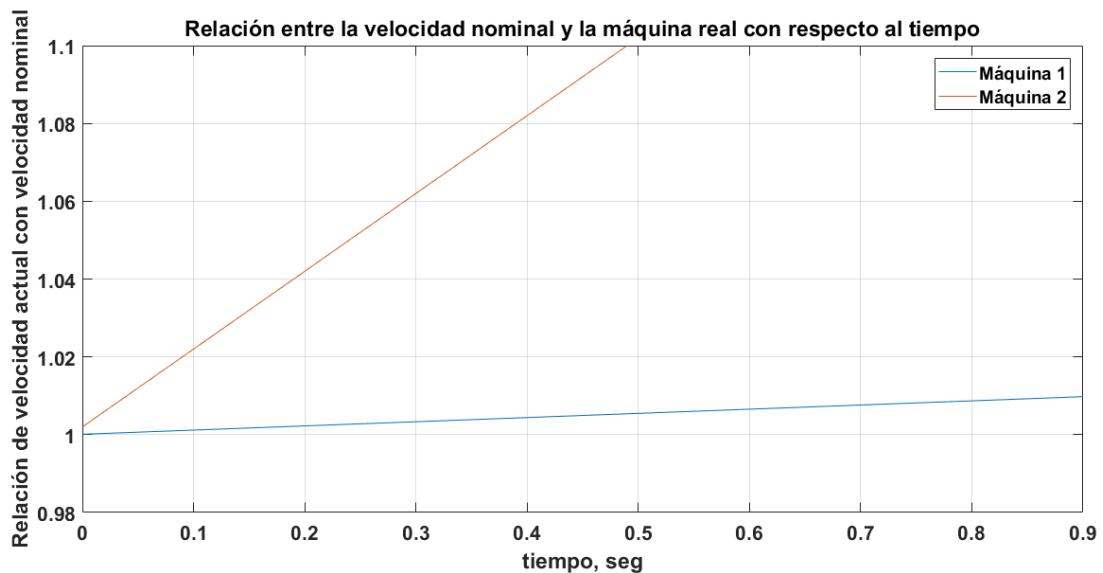


fig. 4.10 Gráfica de relación de velocidades de máquinas de caso 4



#### 4.4 Observaciones y análisis de resultados

En el caso 001 se puede observar en la gráfica de la fig. 4.3 como el sincronismo en ambas máquinas es mantenido después de ocurrida la falla y su posterior liberación. Si bien en ambas máquinas se observa que el ángulo de voltaje interno de la máquina está creciendo, se hace notar que estos mantienen una variación sincrónica, lo cual es lo buscado por el sistema. Así mismo, en la gráfica de la relación de velocidades se muestra que antes de ser liberada la falla el comportamiento de estas es en crecimiento lineal, sin embargo, después de que se activan las protecciones la velocidad de ambas comienza a fluctuar de manera sincrónica y controlada.

Para el caso 002, como ya se mencionó antes, la falla se liberó en  $t = 0.2$  seg. y como se observa en las gráficas de las fig. 4.5 y 4.6, esto afecta totalmente la respuesta del sistema a la falla, propiciando que este no pueda entrar en estabilidad transitoria y los valores de voltajes oscilen de tal forma que el funcionamiento de estos será catastrófico para el sistema. En estas gráficas también se puede observar como el programa no puede seguir el comportamiento del sistema una vez que se presenta la inestabilidad, y es por lo que en la fig. 4.5 los ángulos graficados presenten caídas de magnitud tan grandes.

Al analizar estos dos primeros casos, se puede observar la importancia del tiempo de activación que al que se deben de programar las protecciones de los sistemas eléctricos de potencia, ya que una fracción de tiempo pequeña puede marcar la diferencia entre la estabilidad de todo un sistema y el completo fallo de este. Algunos autores y catedráticos comentan que si al graficar o comparar las variaciones de ángulos de ambas máquinas y de éstas ningún valor difiere por  $90^\circ$ , se puede concluir que el sistema se encuentra en estabilidad transitoria; y en estos casos se reconoce que tal condición se cumple, puesto que en el caso 001 los ángulos de voltaje interno de máquina nunca presento una diferencia superior a los  $90^\circ$ , caso contrario al caso 002, el cual si presentaba valores superiores a este.

El caso 003 muestra la importancia de los parámetros de funcionamiento de las máquinas en la estabilidad del sistema, pues como se puede ver en las gráficas del caso 001 (fig. 4.3 y 4.4) el ángulo de la máquina 1 presenta oscilaciones relativamente pequeñas con respecto a al ángulo de la máquina 2, el cual cuenta con una constante de inercia mucho mayor. Aun así, en este caso las constantes fueron modificadas como ya se ha señalado anteriormente y las gráficas de este caso (fig. 4.7 y 4.8) muestran que entre más próximas sean las constantes de inercia de las máquinas, mayor sincronismo habrá entre ellas al momento de encontrar la estabilidad transitoria. Sin embargo, en este comportamiento también influye el hecho de que, para estos casos de estudios, la máquina 2 se encontrara conectada al bus donde se había presentado la falla, propiciando así que el aumento en de velocidad sea mucho mayor para la máquina 2 que para la máquina 1.

El caso 004 retrata el efecto que tiene la magnitud del paso de integración en todo el comportamiento del método de análisis, esto es importante pues refleja como seria el comportamiento de las protecciones del sistema ante la falla, ya que estos generalmente se



programan por ciclos y si estas no pueden analizar el comportamiento del voltaje y reaccionar en el instante preciso en que se debe de liberar la falla entonces la respuesta del sistema puede ser diferente y puede resultar en la inestabilidad del sistema.



## 5 Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

El estudio de la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia es un tema que si bien es simple (por el hecho de basarse en la observación del comportamiento del sistema) es muy complejo debido a la gran cantidad de variables que se toman en cuenta para poder calcularla. Por si fuera poco, la estabilidad del sistema se ve clasificada por los parámetros medidos y sus efectos en los elementos del sistema. La estabilidad transitoria es un tema bastante complejo, pues esta basa su estudio en los disturbios grandes y por lo mismo sus efectos en el sistema son mayores.

Después de observar los resultados obtenidos en los casos 001 y 002 se puede concluir que la estabilidad transitoria del sistema depende en gran medida del tiempo de operación de las protecciones del sistema eléctrico, pues esto determinará tanto la velocidad y ángulos máximos de desfase que alcanzarán las máquinas y si sobrepasan el punto de retorno del sistema a una estabilidad síncrona. Otro elemento que destacar es la importancia del tamaño del paso de integración dentro del método de solución, pues este al ser un sistema rígido, requiere de una constante de tiempo que se adapte al funcionamiento de ambas máquinas, pues si este llega a ser muy grande o muy pequeño no se aproximará a un análisis más realista y puede tender a dar una simulación errónea; de la misma manera, un paso de integración que no se encuentre coordinado con el tiempo de liberación de la falla propiciará que el método no se resuelva de manera correcta y que el sistema tienda a la inestabilidad en la simulación.

Por su parte la creación de un programa de que permita el análisis de la estabilidad transitoria es un trabajo que requiere mucha dedicación y esfuerzo, debido a la gran cantidad de variables y arreglos que se hacen durante su solución. El uso de softwares de programación como Matlab son de gran ayuda por la practicidad y simpleza con la que se pueden generar los códigos y así como las herramientas con las que cuenta que permiten saber el funcionamiento de cada parte del programa y marcar los procesos que se realizan.

El aprender y conocer los métodos de programación son elementos básicos en la formación actual para un ingeniero, pues como se muestra en este trabajo, sin ellos es imposible la solución de problemas de ingeniería que requieren ser resueltos en cortos periodos de tiempo para tomas de decisiones. Aparte de esto, la constante ampliación de los sistemas eléctricos y la inclusión de nuevos métodos de generación de energía requieren un mayor número de estudios y un constante análisis de los sistemas; haciendo necesaria la creación y utilización de programas que permitan hacer más eficiente el trabajo de un ingeniero.



## 5.2 Áreas de oportunidad para trabajos futuros

1. Este trabajo puede servir como base para la creación de futuros programas que utilicen el método de solución aquí presentado por parte de otros miembros de la comunidad estudiantil o quizá en la aplicación de alguna maestría con especialización en sistemas eléctricos de potencia.
2. El programa presentado se encuentra limitado por las ecuaciones del sistema empleado para la demostración del método de solución, por lo que se puede aprovechar la programación ya realizada para crear un programa de código abierto que permita su aplicación en sistemas con diferentes configuraciones en el cual no sea necesario predefinir las ecuaciones del sistema, sino que este mismo programa las cree y modifique para utilidad del usuario.
3. La creación de este programa permite tener una noción de lo necesario a saber para poder crear un programa que simule y pruebe diferentes tipos de contingencias en el sistema, por lo cual queda abierta la oportunidad de seguir desarrollando a futuro diferentes programas para el análisis de otros tipos de disturbios dentro del sistema.



## 6 Bibliografía

- Castelán, R. (2018). *Estudio de estabilidad transitoria en sistemas electricos de potencia utilizando el programa PSS/e*. Puebla, México.
- Crow, M. L. (2010). *Computacional methods for electric power systems*. Boca Raton: CRC Press5.
- Diaz, L., Mestas, R., & Hancoo, R. (2015). *Metodos numericos con MATLAB*.
- El-Abiad, W. S. (1968). *Computer Methods in Power Systems*. New York: McGraw-Hill.
- Elgerd, O. I. (1971). *Electric energy systems theory: an introduction*. New York : McGraw-Hill.
- Elgerd, O. I. (1982). *Electric Energy Systems Theory,*. New York : McGraw-Hill.
- Grainger, J., & Stevenson, W. D. (1996). *Analisis de sistemas de potencia*. México: McGraw-Hill.
- J. Duncan Glover, M. S. (2008). *Power System Analysis and Design*. Standford: USA.
- López, L. (2003). *Programacion estructurada, un enfoque algoritmico*. México: Alfaomega.
- Moore, H. (2007). *Matlab para ingenieros*. Pearson.
- Ogata, K. (1999). *Problemas de ingeniería de control usando MATLAB*. Madrid : PRENTICE HALL IBERIA.
- Stevenson, W. D. (1995). *Elements of power system analasys*. New York: McGraw-Hill.



## 7 Anexos

Programas diseñados y utilizados para la simulación del sistema presentado.

### Programa principal

```
% CUERPO DEL PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA
% El programa está diseñado para observar inicio de falla en t=tif=0 y
% liberación de falla en t=tlf, continúa la solución hasta tmax
% Eduardo Navarrete Casimiro
% Facultad de ingeniería BUAP

filename = input('Archivo para guardar datos :\n');
IDarchivo = fopen (filename, 'w');

tif = 0
tlf = input('Tiempo de liberación de falla: \n');
dt = input('Diferencial de tiempo: \n');
tmax=0.9+dt

OPprior; % sbr1=-50
Ybus; %sbr2
[YLpq] = NFYLpq(YBUS,OPDATA,MACH); %sbr2=-50 % Calculo de nuevos
parametros de línea que serán usados para el cálculo de voltajes de bus
[E] = Fem(MACH,OPDATA) %sbr3=-50 & sbr4=-50 % Calculo de voltajes
detrás de las admitancias equivalentes que representan las maquinas
sz = size(MACH);
m = sz(1);

w(6) = 2*pi*60;
w(7) = 2*pi*60;

t=0;
repetir=1;
cambio=0;
while (repetir ==1)

    if (t==tif || t==tlf)
        cambiosis=1;
        cambio=cambio+1; % indica cuantas veces han cambiado las
condiciones del sistema
    else
        cambiosis=0;
    end

    if (cambiosis==1)
        bandera=0;
        [E, Im, H, Pe] = fsp1(E, YLpq, MACH, m, cambio); %sbr5=-50
    %sbr678=-50
```



```
if (bandera==0)

    An(6) = angle(E(6));
    An(7) = angle(E(7));
    [dw0,dA0,w0,A] = Fdif(OPDATA,MACH,Pe,w,An,dt,m);
% sbr9=-50 % Primer cálculo de diferenciales y velocidades de máquina
% y ángulos de voltaje interno
    [E,A] = FEn(E,A,MACH,m); % sbr10=-
50 % Corrección de voltajes de máquinas
    bandera=1;
    [E,Im,H,Pe] = fsp1(E,YLpq,MACH,m,cambio);
% sbr678=-50

    if (bandera==1)
        [dw,dA,w,A,Rw] =
Fdif2(OPDATA,MACH,Pe,w,dt,m,dw0,dA0,w0,An); % sbr11=-50 % Segundo
cálculo de diferenciales y velocidades de máquina y ángulos de voltaje
interno
        [E,A] = FEn(E,A,MACH,m);
% sbr12=-50 % Corrección final de voltajes de máquinas
        bandera=2;
        [E,Im,H,Pe] = fsp1(E,YLpq,MACH,m,cambio);
% sbr678=-50 % sbr678=-50
    end
end
end

if (cambiosis==0)
    An(6) = angle(E(6));
    An(7) = angle(E(7));
    [dw0,dA0,w0,A] = Fdif(OPDATA,MACH,Pe,w,An,dt,m);
% sbr9=-50 % Primer cálculo de diferenciales y velocidades de máquina
% y ángulos de voltaje interno
    [E,A] = FEn(E,A,MACH,m); % sbr10=-
50 % Corrección de voltajes de máquinas
    bandera=1;
    [E,Im,H,Pe] = fsp1(E,YLpq,MACH,m,cambio);
% sbr678=-50

    if (bandera==1)
        [dw,dA,w,A,Rw] =
Fdif2(OPDATA,MACH,Pe,w,dt,m,dw0,dA0,w0,An); % sbr11=-50 %
Segundo cálculo de diferenciales y velocidades de máquina y ángulos de
voltaje interno
        [E,A] = FEn(E,A,MACH,m); % sbr12=-
50 % Corrección final de voltajes de máquinas
        bandera=2;
```



```
[E, Im, H, Pe] = fsp1(E, YLpq, MACH, m, cambio);
% sbr678=-50 % sbr678=-50
end
end

if (t >= tmax)
    repetir=2
else
    fprintf(IDarchivo, '\n % 2.2f % 6.6f % 6.6f % 6.6f % 6.6f %
6.6f % 6.6f \r', t, A(6), A(7), w(6), w(7), Rw(6), Rw(7));
end
t=t+dt;
end
```

### Programa NFYLpq

```
% PROGRAMA PARA CALCULAR LOS NUEVOS PARAMETROS DE LINEA DEL SISTEMA PARA
LA SOLUCION DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO
% Facultad de ingeniería BUAP
```

```
function [YLpq] = NFYLpq(YBUS, OPDATA, MACH)
```

```
P = OPDATA(:, 5);
Q = OPDATA(:, 6);
E = OPDATA(:, 2);
```

```
sz = size(OPDATA);
m = sz(1);
```

```
for n = 1 : m
    Y0(n) = (P(n) - Q(n)*1i) / ((real(E(n)))^2 + imag(E(n))^2);
% CALCULAMOS LA ADMITANCIA EQUIVALENTE DE LA CARGA A TIERRA
end
```

```
for n = 1 : 2
    t = MACH(n, 1);
% ASIGNACION DE NUMERO DE BUS AL QUE ESTA CONECTADA LA MAQUINA
    j = MACH(n, 2);
% ASIGNACIÓN DE NUMERO DE BUS QUE REPRESENTARÁ A LA MAQUINA
    H(j) = MACH(n, 5);
```

```
YBUS(t, j) = - H(j);
% AGREGAMOS LA IMPEDANCIA DE LA MAQUINA CON EL BUS A LA Y DE BARRA
YBUS(t, t) = YBUS(t, t) + H(j);
% MODIFICACIÓN DE ELEMENTO YBUS(N,N) CON LA NUEVA IMPEDANCIA AGREGADA
end
```

```
d = size(YBUS);
```



```
P = d(1);
Q = d(2);

for n = 1 : m
    Lp(n) = (1 / (YBUS(n,n) + Y0(n)));
end

for p = 1 : P
    for q = 1 : Q
        if p == q
            YLpq(p,q) = 0;
        else
            YLpq(p,q) = (YBUS(p,q) * Lp(p));
        end
    end
end
```

## Programa Fem

```
% PROGRAMA PARA CALCULAR VOLTAJES DETRAS DE LA ADMITANCIA EQUIVALENTE
% REPRESENTANTE DE LAS MAQUINAS DEL SISTEMA
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO
% Facultad de ingeniería BUAP
```

```
function [E] = Fem(MACH,OPDATA)
E = zeros(7,1);

Eprior = OPDATA(:,2);
P = OPDATA(:,3);
Q = OPDATA(:,4);
Xd = MACH(:,4);

sz = size(MACH);
m = sz(1);
E = Eprior;

for n = 1 : m
    a = MACH(n,1);
    b = MACH(n,2);

    E(b) = (Eprior(a) + (Xd(a)*1i) * ((P(a) - Q(a)*1i) / conj(Eprior(a))));
end

return
```

## Subproceso 1 fsp1

```
% Determina E, dependiendo del cambio en el sistema
```



```
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP
```

```
function [Ep, Im, H, Pe] = fsp1(E, YLpq, MACH, m, cambio)  
  
if (cambio==1)  
    [Ep] = fep(E, YLpq);  
else  
    [Ep] = fepPos(E, YLpq);  
end  
[Im, H] = FIM(Ep, MACH, m);  
[Pe] = FPe(Im, Ep, MACH, m);  
  
return
```

## Programa fep

```
% PROGRAMA PARA RESOLVER LAS ECUACIONES DE RED DE UN SISTEMA SIMPLE PARA  
EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DURANTE LA FALLA.  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
% 31/MAYO/2020
```

```
function [Ep] = fep(E, YLpq)  
  
    item = 100;  
    n = 5;  
    Ep = 0.0;  
    a = 1.4;  
  
    for p = 1 : n  
        Ep(p) = E(p);  
    end  
  
    for k = 1 : item  
        Ep(1) = (-YLpq(1,2)*Ep(2)) + (-YLpq(1,3)*Ep(3)) + (-  
YLpq(1,6)*E(6));  
        dV(1) = Ep(1) - E(1);  
        E(1) = Ep(1);  
  
        Ep(2) = 0;  
  
        Ep(3) = (-YLpq(3,1)*Ep(1)) + (-YLpq(3,2)*Ep(2)) + (-  
YLpq(3,4)*Ep(4));  
        dV(3) = Ep(3) - E(3);  
        E(3) = Ep(3);
```



```
Ep(4) = (-YLpq(4,2)*Ep(2)) + (-YLpq(4,3)*Ep(3)) + (-
YLpq(4,5)*Ep(5));
dV(4) = Ep(4) - E(4);
E(4) = Ep(4);

Ep(5) = (-YLpq(5,2)*Ep(2)) + (-YLpq(5,4)*Ep(4));
dV(5) = Ep(5) - E(5);
E(5) = Ep(5);

Ep(6) = E(6);
Ep(7) = E(7);

if abs(dV(1))<1e-6 && abs(dV(3))<1e-6 && abs(dV(4))<1e-6 &&
abs(dV(5))<1e-6
    iterm = k
    return
else
end
end

end

end
```

## Programa fepPos

```
%PROGRAMA PARA RESOLVER LAS ECUACIONES DE RED DE UN SISTEMA SIMPLE PARA
EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA POSTERIOR A LIBERADA LA FALLA.
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO
% Facultad de ingeniería BUAP
% 11/06/2020
```

```
function [E] = fepPos(E,YL)
```

```
iterm = 100;
```

```
for n = 1 : 5
    Ep(n) = E(n);
end
```

```
for k= 1 : iterm
    E(1) = -YL(1,2)*E(2) -YL(1,3)*E(3) -YL(1,6)*E(6);
    E(1) = round(E(1),5);
    dV(1) = E(1) - Ep(1);
    Ep(1)= E(1);
```

```
    E(2) = -YL(2,1)*E(1) - YL(2,3)*E(3) - YL(2,4)*E(4) -YL(2,5)*E(5)
- YL(2,7)*E(7);
    E(2) = round(E(2),5);
```



```
dV(2) = E(2) - Ep(2);  
Ep(2) = E(2);
```

```
E(3) = -YL(3,1)*E(1) - YL(3,2)*E(2) - YL(3,4)*E(4);  
E(3) = round(E(3),5);  
dV(3) = E(3) - Ep(3);  
Ep(3) = E(3);
```

```
E(4) = -YL(4,2)*E(2) - YL(4,3)*E(3) - YL(4,5)*E(5);  
E(4) = round(E(4),5);  
dV(4) = E(4) - Ep(4);  
Ep(4) = E(4);
```

```
E(5) = -YL(5,2)*E(2) - YL(5,4)*E(4);  
E(5) = round(E(5),5);  
dV(5) = E(5) - Ep(5);  
Ep(5) = E(5);
```

```
E(6);  
E(7);
```

```
if abs(dV(1))<0.00001 && abs(dV(2))<0.00001 && abs(dV(3))<0.00001  
&& abs(dV(4))<0.00001 && abs(dV(5))<0.00001  
    iterm = k;  
    return  
else  
end  
iterm;  
  
end
```

## Programa FIM

```
%PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE MAQUINA  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
%07/06/2020
```

```
function [Im,H] = FIM(Ep,MACH,m)  
  
for n = 1 : m  
    t = MACH(n,1);  
    i = MACH(n,2);  
    H(i) = MACH(n,5);  
  
    Im(i) = round(((Ep(i)-Ep(t))*H(i)),5);  
end  
return
```



## Programa FPe

```
%PROGRAMA PARA CALCULAR LA POTENCIA DE LAS MAQUINAS DURANTE LA FALLA.  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
%05/06/2020
```

```
function [Pe] = FPe(I,Ep,MACH,m)  
  
for n = 1 : m  
    i = MACH(n,2);  
    Pe(i) =real(I(i))*real(Ep(i)) + (1)*imag(I(i))*imag(conj(Ep(i)));  
  
    if Pe(i) <= 0.00001  
        Pe(i) = 0 ;  
    else  
        Pe(i) = round(Pe(i),5);  
    end  
  
end  
  
end  
return
```

## Programa Fdif

```
%PROGRAMA PARA CALCULAR LAS PRIMEROS VARIABLES DE DIFERENCIALES Y  
VALORES DE ANGULO DE VOLTAJE INTERNO Y VELOCIDAD DE MAQUINAS DEL SITEMA  
PARA APLICACION DE METODO DE EULER  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
%07/06/2020
```

```
function [dw0,dA0,w0,A] = Fdif(OPDATA,MACH,Pe,w,An,dt,m)  
  
for n=1 : m  
    t = MACH(n,1);  
    i = MACH(n,2);  
  
    PM(i) = OPDATA(t,3);  
    H(i) = MACH(t,3);  
  
    dw0(i) = (((pi*60/H(i)) * (PM(i) - Pe(i))));  
    dA0(i) = ((w(i) - 2*pi*60));  
  
    w0(i) = ((w(i) + dw0(i) * dt));  
    A(i) = ((An(i) + dA0(i) * dt));  
  
end
```



return

## Programa FEn

```
%PROGRAMA PARA CALCULAR NUEVAS COMPONENTES DE VOLTAJES  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
%07/06/2020
```

```
function [E,A] = FEn(E,A,MACH,m)  
for n = 1 : m  
    i = MACH(n,2);  
    V(i) = abs(E(i));  
  
    e(i) = V(i) * cos(A(i));  
    f(i) = V(i) * sin(A(i));  
  
    E(i) = complex(e(i),f(i));  
  
    A(i) = A(i) * (180/pi);  
end
```

## Programa Fdif2

```
%PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LAS SEGUNDAS VARIABLES DE ANGULO DE VOLTAJE  
%INTERNO Y VELOCIDAD DE MAQUINA DEL SISTEMA PARA APLICACIÓN DE METODO  
DE  
%EULER MODIFICADO.  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
%10/06/2020
```

```
function [dw,dA,w,A,Rw] = Fdif2(OPDATA,MACH,Pe,w,dt,m,dw0,dA0,w0,An)  
  
for n=1 : m  
    t = MACH(n,1);  
    i = MACH(n,2);  
  
    PM(i) = OPDATA(t,3);  
    H(i) = MACH(t,3);  
  
    dw(i) = (((pi*60/H(i)) * (PM(i) - Pe(i))));  
    dA(i) = ((w0(i) - 2*pi*60));  
  
    w(i) = ((w(i) + ((dw0(i)+dw(i))/2) * dt));  
    A(i) = ((An(i) + ((dA0(i)+dA(i))/2) * dt));
```



```
Rw(i) = w(i)/(2*pi*60); % CALCULO DE LA RELACION ENTRE LAS  
VELOCIDADES REAL Y NOMINAL DE LA MAQUINA
```

```
end  
return
```

### Programa GRAFICAR

```
% PROGRAMA PARA GRAFICAR LOS DATOS OBTENIDOS DE ANGULOS INTERNO DE  
VOLTAJE DEL EJEMPLO DE CALCULO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.
```

```
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
% 10/07/2020
```

```
N = load(filename);  
T = N(:,1); % TIEMPO  
An1 = N(:,2); % ANGULOS DE MAQUINA 1  
An2 = N(:,3); % ANGULOS DE MAQUINA 2
```

```
% PROCEDEMOS A GRAFICAR LOS DATOS
```

```
plot(T,An1,T,An2)  
title('Ángulo de voltaje interno de maquina con respecto al tiempo');  
xlabel('tiempo, seg')  
ylabel('Angulo de voltaje interno, deg')
```

### Programa GRAFICAR2

```
% PROGRAMA PARA GRAFICAR LOS DATOS DE VELOCIDAD DE VOLTAJE DEL EJEMPLO  
DE
```

```
% CALCULO DE ESTABILIDAD TRANSITORIO  
% EDUARDO NAVARETE CASIMIRO  
% Facultad de ingeniería BUAP  
% 10/07/2020
```

```
N = load(filename);  
T = N(:,1); % TIEMPO  
V1 = N(:,6); % VELOCIDAD ACTUAL DE MAQUINA 1  
V2 = N(:,7); % VELOCIDAD ACTUAL DE MAQUINA 2
```

```
plot(T,V1,T,V2)  
title('Relación entre la velocidad nominal y la máquina real con respecto  
al tiempo')  
xlabel('tiempo, seg')  
ylabel('Relación de velocidad actual con velocidad nominal')
```