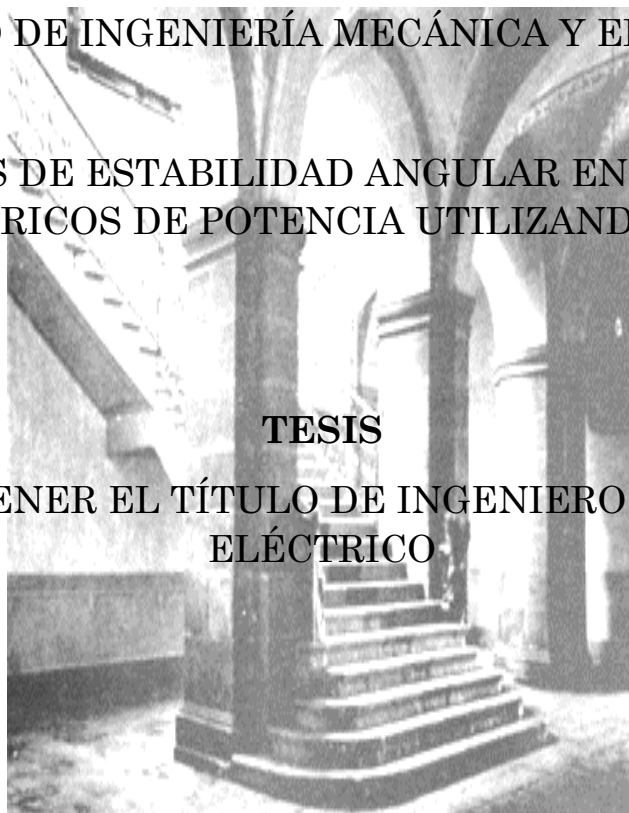




BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANGULAR EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA UTILIZANDO PSAT**



TESIS
**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
ELÉCTRICO**

PRESENTA:

MAX VELASCO QUINTERO

ASESOR:

M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA

SEPTIEMBRE, 2017.



BUAP

Oficio D-SA 3043/2017

C. MAX VELASCO QUINTERO
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANGULAR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA UTILIZANDO PSAT”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al Dr. Ismael Albino Padilla.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 28 de agosto de 2017

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

M'FDLH/M. JAJT/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



80  **AÑOS**
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería

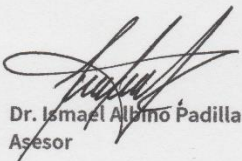
Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Presente.

El que suscribe: Dr. Ismael Albino Padilla, asesor del tema denominado: “ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANGULAR EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA UTILIZANDO PSAT”, presentado por el C. MAX VELASCO QUINTERO, pasante de la carrera de Ingeniería Mecánica y Eléctrica con número de matrícula 201129501, me permito informar a Usted que dentro del marco de examen profesional, y después de haber realizado una cuidadosa revisión del contenido temático, la metodología y la redacción de la tesis correspondiente, no existe inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 21 de agosto de 2017


Dr. Ismael Albino Padilla
Asesor

M' IAP/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



DEDICATORIAS

A mi madre María del Consuelo Quintero Guerrero, por tener las palabras correctas, inclusive si no, para que no pierda el camino que elegí, siempre darme el cariño y apoyo que sólo una madre es capaz de ofrecer y no dejar de creer en mis sueños. A todo el esfuerzo que siempre ha dado no sólo a mí, sino también a mis hermanos.

A mi padre Edgar Velasco Muñoz, a pesar de todo siempre me ha dado palabras de aliento y apoyarme cuando las cosas parecen malas.

A mis hermanos Julio César Velasco Quintero y Ulises Velasco Quintero por creer en mis ideas y confiar en mis más incoherentes pensamientos.

A M.P, A.E, W.H y N.T, por entrar a mi mente en la mejor etapa de mi vida y aportar la mayor parte de mis ideales y convertirme en lo que ahora soy, sin ustedes quizá jamás hubiese encontrado el verdadero camino de mi vida profesional.



AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Ismael Albino Padilla, por permitirme realizar este trabajo bajo su tutoría, el tiempo brindado, las pláticas y la comprensión que me brindó.

A los maestros que de algún modo influenciaron a la formación de mis actuales ideales.

Al tiempo por permitirme realizar mis sueños.



RESUMEN

En este documento se realizará los estudios de estabilidad angular en un sistema de potencia, empezando con los análisis gráficos y matemáticos para entender el comportamiento del sistema y de esta manera poder entender el análisis realizado en la simulación de PSAT. El método de áreas iguales ayuda a poder observar cómo se comporta la máquina en diferentes tiempos antes, durante y después de la falla. El periodo de tiempo de estudio es el primer segundo que sigue a la falla del sistema o a otro disturbio grande también llamado como estudios de primera oscilación.

Si se encuentra que las máquinas del sistema permanecen esencialmente en sincronismo dentro del primer segundo, se considera que el sistema es transitoriamente estable. Se realizarán simulaciones de los sistemas de potencia propuestos para obtener su comportamiento en diferentes tiempos de liberación de falla, y de esta manera se podrá configurar los sistemas de protección en el sistema(cuchillas, restauradores, etc.) y estar preparados para las contingencias eléctricas y mantener el servicio constan.

Contenido

CAPÍTULO I	2
MODELADO DE COMPONENTES DEL SEP PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 OBJETIVO DE TESIS	5
1.3 HIPÓTESIS	5
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	5
1.5 LÍMITES DE ESTUDIO	6
1.6 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTABILIDAD	6
1.7 TIPOS DE ESTABILIDAD	9
1.7.1 ESTABILIDAD EN ÁNGULO DEL ROTOR	10
1.7.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA	11
1.8 INTRODUCCIÓN A PSAT (POWER SYSTEM ANALYSIS TOOLBOX)	15
1.8.1 ¿QUÉ ES PSAT?	15
CAPÍTULO II	23
MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA	23
2.1 MÉTODOS GRÁFICOS	23
2.1.1 CRITERIO DE ÁREA IGUALES	24
2.2.2 MÉTODO PASO A PASO	39
2.2.3 MÉTODO DE LA REGLA TRAPEZIAL	42
2.2.4 MÉTODO DE RUNGE- KUTTA (R-K)	43

CAPÍTULO III	45
FORMULACIÓN DEL MODELO CLÁSICO Y SOLUCIÓN DEL SISTEMA.	45
3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO CLÁSICO	45
3.2 ANÁLISIS DEL MODELO CLÁSICO	48
3.3 SOLUCIÓN DEL MODELO CLÁSICO	50
3.4 SOLUCIÓN DEL MODELO CLÁSICO CON PSAT	61
3.4.1 MODELADO DE RED EN PSAT	62
3.4.2 SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE ESTABILIDAD	66
CAPÍTULO IV	70
SOLUCIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO MULTIMÁQUINAS Y SOLUCIÓN DEL SISTEMA.	70
4.1 SOLUCIÓN AL PROBLEMA MULTIMÁQUINA	70
4.1.2 DESARROLLO DEL PROBLEMA MULTIMÁQUINA	71
4.2 MODELADO DE SISTEMA MULTIMÁQUINA EN PSAT	81
CAPÍTULO V	93
CONCLUSIONES	93
5.1 CONCLUSIÓN	93
REFERENCIAS	95



CAPÍTULO I

MODELADO DE COMPONENTES DEL SEP PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD.

“Hay más cosas entre el cielo y la tierra, ..., que las que sueña tu filosofía.”

– William Shakespeare –

1.1 ANTECEDENTES

La industria y la sociedad se encuentra en constante crecimiento, por lo que demandan un incremento de energía constante. En 1879 se instaló la primera planta generadora en México, ubicada en León, Guanajuato, alimentando una fábrica textil llamada “La Americana”, la primera demanda energética que el país requería, tiempo más tarde las necesidades energéticas estarían ampliándose ahora en el ámbito minero y en menor medida para iluminación en zonas residenciales y públicas.

Con el paso de los años para satisfacer el creciente consumo, en México y el mundo se han construido Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) que son los encargados de transportar la energía para las diferentes necesidades. Esto conlleva a crear sistemas



más eficientes con infraestructura más robusta para lograr que el desarrollo y energía de calidad lleguen a más puntos del país.

Unos de los pioneros de la electricidad fue Nikola Tesla con la invención de su motor de inducción que fueron parte clave, en 1887 con su diseño de un motor eléctrico alimentado por corriente alterna, para que las demandas de mayor nivel energético fuesen solventadas, no solo para la industria sino también la población en general, aumentando la eficiencia de los sistemas de transmisión con un menor número de conductores aéreos, en comparación a los ya establecidos por las antiguas compañías eléctricas. El aumento de los sistemas en corriente alterna tomaron cierto tiempo para que se convirtiera en estándar para la industria y sociedad dando así un segundo plano a la corriente directa como medio de transmisión de energía surgiendo de esta manera las ya conocidas disputas entre Thomas Alva E. y Nikola Tesla.

Ahora los sistemas de transmisión cuentan con la capacidad de hacer llegar la energía a lugares cada vez más lejanos con menores pérdidas y pueden llegar a estar compuestos de miles de generadores y kilómetros de líneas, todas interconectadas a través del país.

La capacidad de generación de electricidad a disposición de la Comisión de Federal de Electricidad (CFE) se diversifica en 10 tipos de tecnología: vapor (combustóleo y gas), carboeléctrica, geotermoeléctrica, ciclo combinado, turbogas, combustión interna, hidroeléctrica, eoloeléctrica, nucleoeleétrica y solar fotovoltaica.

A diciembre de 2014, la infraestructura de generación estaba integrada por 215 centrales, con 1,081 unidades de generación. En conjunto, la capacidad instalada era de 54,374.7 Megawatts (MW). (CFE, 2014)

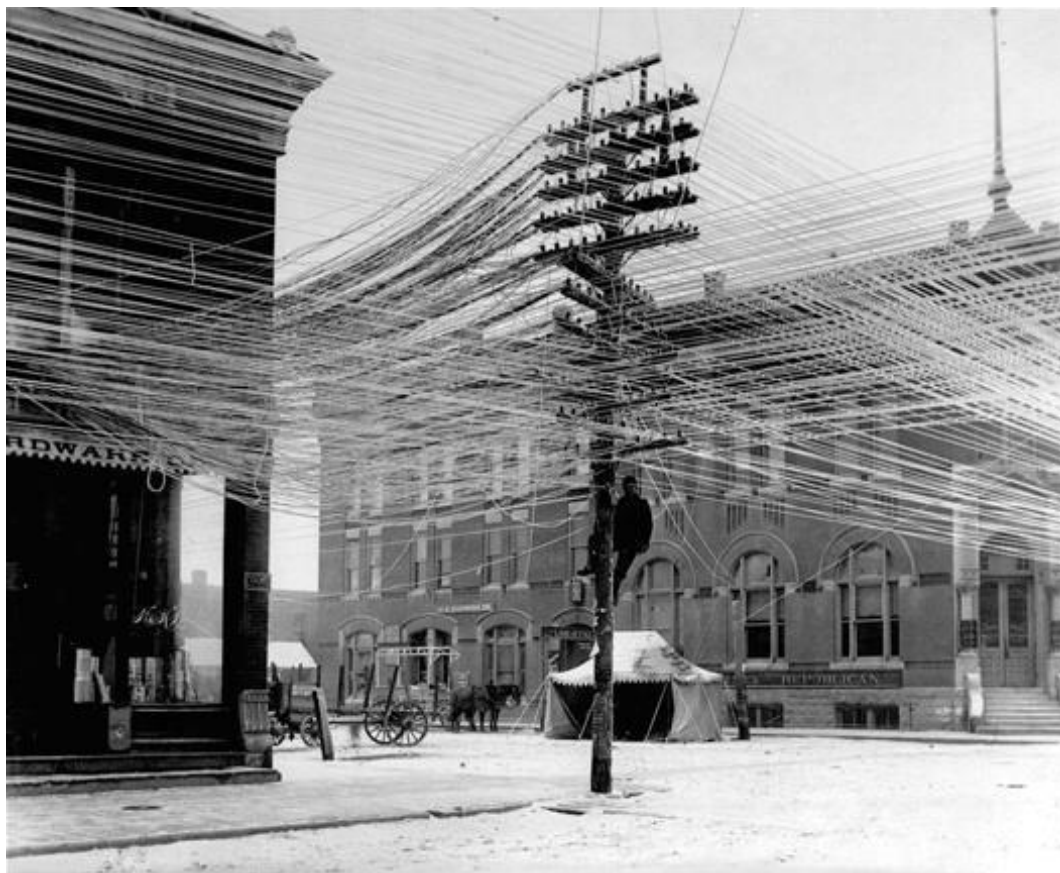


Figura 1.1 Postes eléctricos para transmisión de energía en Pratt, Kansas a principios de 1911. [Sociedad Histórica de Kansas]

Tabla 1.1 Capacidad de generación instalada en México por CFE al 2014. (CFE, 2014)

Generador	Tipo de tecnología	Capacidad efectiva (MW)		Número de Centrales y de Unidades en 2014		Participación porcentual por tecnología	Variación 2013-2014 (%)
		2013	2014	Centrales	Unidades		
CFE	Hidroeléctrica	11,266.8	12,268.8	80	218	22.6	8.9
	Vapor (combustóleo y gas)	11,698.6	11,398.6	26	89*	21.0	-2.6
	Ciclo combinado	7,420.3	7,566.6	13	68	13.9	2
	Carboeléctrica	5,378.4	5,378.4	3	15	9.9	-
	Turbogás	1,510.4	2,303.4	46	110	4.2	52.5
	Geotermoelectrica	823.4	813.4	4	38	1.5	-1.2
	Combustión interna	259.2	302.4	9	78	0.6	16.7
	Eoloelectrica	86.8	86.3	3	8	0.2	-
	Solar fotovoltaica	6.0	6.0	2	2	< 0.1	-
Nucleoelectrica**	1,400.0	1,400.0	1	2	2.6	-	
Total CFE	-	39,849.9	41,523.9	187	628	75.4	4.3
Productores Independientes de Energía (PIE)	Ciclo Combinado	12,339.9	12,339.9	23	77	22.7	-
	Eoloelectrica	510.9	510.9	5	376	0.9	-
Total PIE	-	12,850.8	12,850.8	28	453	23.6	-
Total	-	52,700.7	54,374.7	215	1,081	100	3.2



1.2 OBJETIVO DE TESIS

Estudiar y entender el comportamiento de un sistema eléctrico en estado transitorio, específicamente en periodo de falla en relación al ángulo de carga del generador síncrono, para así poder observar la estabilidad angular de la máquina y entender el comportamiento dinámico de sistemas reales de potencia.

1.3 HIPÓTESIS

Los problemas de estabilidad en el ángulo de carga para estudios de primera oscilación pueden ser resueltos con la correcta coordinación de los interruptores, para poder lograrlo se debe obtener el tiempo crítico de liberación mediante soluciones digitales (PSAT).

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

Los problemas de estabilidad siempre están presentes en los sistemas eléctricos, por lo que su estudio y supervisión son indispensables para mantener en forma correcta el estado operativo del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Se necesitan realizar estudios de Estabilidad angular, en los cuales se incluyen múltiples máquinas, estos estudios permiten observar el comportamiento angular de la máquina y observar su comportamiento ante fallas que pueden ocurrir en cualquier parte del sistema, con estos estudios se puede verificar los tiempos críticos de liberación de la falla. La CFE contiene departamentos que utilizan el programa comercial PSS/E para analizar la estabilidad del sistema. El programa PSAT es similar a PSS/E, a diferencia de que este es de licencia gratuita y trabaja sobre la base de Matlab. En ciertos aspectos PSAT hace



los mismos análisis que PSS/E pero para sistemas más pequeños, sin embargo el uso de PSAT puede resultar valioso para observar las dinámicas de sistemas de prueba que después pueden extrapolarse a sistemas reales.

1.5 LÍMITES DE ESTUDIO

El estudio de estabilidad se limitará a sistemas sin control electrónico de generadores, como gobernadores, que son equipos especializados que regulan la velocidad dependiendo de los cambios que sucedan en el sistema, esto es debido a que se enfocará el estudio a estabilidad transitoria en donde la respuesta de los controles mencionados anteriormente no afecta la respuesta del sistema al tener constantes de tiempo lentas.

1.6 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTABILIDAD

En los estudios de estabilidad se determina el nivel de impacto de disturbios en el sistema, a nivel electromecánico de los sistemas de potencia. Estos estudios son de tipo *transitorio* y *estado estable*. Para *estabilidad transitoria* existen organizaciones que se encargan de su análisis y así asegurar el óptimo comportamiento del sistema, tales como el CENACE (Centro Nacional de Control de Energía).

Actualmente se utilizan modelos a computadora de los sistemas eléctricos para su estudio ya que resultaría una tarea casi imposible de completar si se realizará de manera manual. Estas máquinas tienen sistemas de excitación asociados y sistemas de control o gobernadores de la turbina que son modelados en su mayoría de veces para obtener una simulación del comportamiento dinámico lo más exacto posible. Para la



resolución de las ecuaciones diferenciales no lineales o algebraicas, obtenidas de los sistemas anteriores, se pueden utilizar métodos matemáticos iterativos que logran alcanzar una solución satisfactoria a las condiciones iniciales dadas en el sistema de simulación.

Para estar en contexto se definirá al SEP (Sistema Eléctrico de Potencia) como el *conjunto de plantas generadoras, líneas de transmisión, transformadores, subestaciones, redes de distribución y usuarios en general*. Todo sistema de potencia se encuentra en una condición de *estado estable* cuando los parámetros que definen al mismo son constantes. Pueden ocurrir, en diferentes puntos del sistema, perturbaciones o cambios en las variables que pongan en riesgo su estabilidad, cuando un suceso de este tipo sucede se le dice que el sistema experimenta un *disturbio*. Existen dos clases de disturbios dependiendo de su origen, grandes y pequeños.

Se define como *disturbio grande* cuando las ecuaciones no lineales que describen la dinámica del sistema de potencia no se pueden linealizar de forma válida para propósitos de análisis. Ejemplos de un disturbio grande pueden ser fallas en sistemas de transmisión, cambios abruptos de carga, pérdidas de generadores y maniobras en líneas. Por otro lado, un *disturbio pequeño* puede ser un cambio en la ganancia de un regulador automático de voltaje en el sistema de excitación de una unidad generadora. En un sistema de potencia que se encuentre en *estado estable* para una condición de operación preestablecida, en caso de un disturbio pequeño, si el sistema regresa a la misma condición de operación se considera *estado estable*. En cambio, en un disturbio grande, la condición de operación preestablecida cambia, pero entra dentro de niveles aceptables de operación, el sistema es *transitoriamente estable*.

Los estudios de estabilidad en estado estable son menos extensivos en su alcance que los de estabilidad transitoria, en este se incluyen diferentes factores de sistemas



complejos multimáquinas, en cambio los de estabilidad transitoria estudian la estabilidad bajo variaciones incrementales pequeñas en los parámetros o bajo condiciones de operación alrededor del punto de equilibrio de estado estable.

Como los estudios de estabilidad transitoria involucran disturbios grandes, no se permite la linealización de sistema de ecuaciones. Algunas veces, la estabilidad transitoria se estudia con base en una primera oscilación. Este tipo de estudios usan un modelo de un generador clásico que consiste en una fuente de voltaje E_i en serie con una reactancia síncrona X_d' ; en estos estudios no se representan los sistemas de excitación ni los sistemas de control del gobernador de la turbina de las unidades generadoras. El periodo de tiempo de estudio es el primer segundo que sigue a la falla del sistema o a otro disturbio grande. Si se encuentra que las máquinas del sistema permanecen esencialmente en sincronismo dentro del primer segundo, se considera que el sistema es transitoriamente estable. Para estudios con periodos de tiempo mayores a un segundo, se deben considerar los sistemas de control de las unidades generadoras ya que estas pueden influir en el comportamiento dinámico de la máquina. Por lo tanto, se requieren modelos sofisticados de máquinas para su correcta simulación.

Para la simulación de los sistemas de transmisión se pueden tener diferentes escenarios, dependiendo del estudio o los resultados que se deseen obtener ya sea anexando los sistemas de excitación y de control, como estabilidad transitoria y estado estable. En todos los estudios de estabilidad, el objetivo es determinar si los rotores de las máquinas que están en un estado de perturbación serán capaces de regresar a una velocidad de operación constante. (William D. Stevenson, 2002)

1.7 TIPOS DE ESTABILIDAD

Como se explicó en el apartado anterior, la estabilidad en un sistema de potencia es la capacidad del mismo de permanecer en condiciones normales de operación bajo el mismo régimen y, después de que se suceda un disturbio, poder recuperar esa misma condición de equilibrio.

Para mantener esta estabilidad, un sistema, debe de mantener el sincronismo de la máquina acoplados a motores síncronos para la generación de la energía. Este tipo de estabilidad está relacionada con la dinámica del ángulo del rotor del generador y el ángulo de potencia; sin embargo, la estabilidad no siempre depende del sincronismo de la máquina, sino que también puede existir inestabilidad por el *colapso del voltaje de la carga*. En esta situación no depende del sincronismo en cuestión, sino del *control del voltaje y la estabilidad* del mismo.

Para la entender los diferentes estudios de estabilidad se utilizará un modelado clásico de la red, el cual se nombrará, G-LT-MS (Generador-Línea de Transmisión- Máquina Síncrona). (Kundur, 1994)

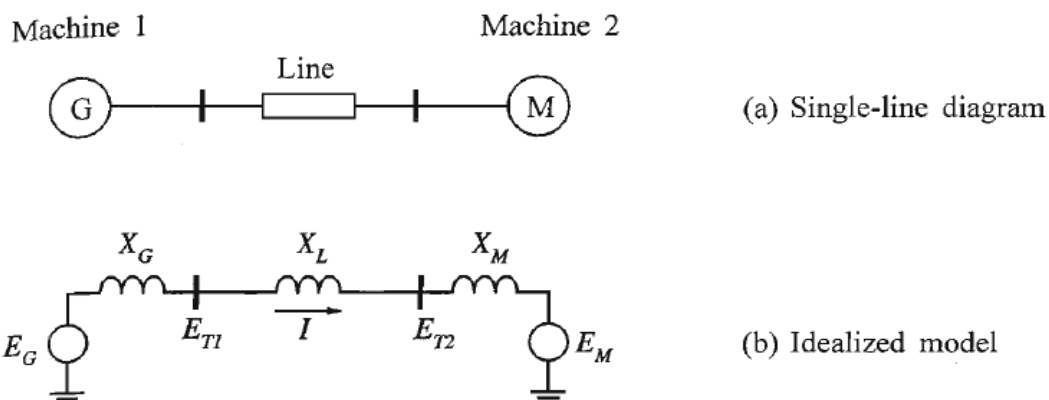


Figura 1.2 (a) Modelo de sistema de transmisión G-LT-MS. (b) Modelo de sistema en transmisión por reactancias. [Kundur, 1994]



En operación normal existen diferentes cambios constantes en el sistema, al estudiar dicho sistema lo importante es conocer cuál será su comportamiento cuando ocurre el cambio y cuál será el estado final del mismo.

Los cambios a los que puede ser sometido el sistema pueden ser pequeños o grandes disturbios, si se dan pequeños disturbios en forma de cambio de carga, que es algo que se da de manera constante en un sistema de potencia, este se ajusta para su correcta operación al cambio de las condiciones. El sistema también debe ser capaz de soportar numerosos cambios en las condiciones como corto circuitos, pérdidas de líneas de transmisión o grandes cantidades de carga, incluso la pérdida de un generador. Estos cambios se ven reflejados como disturbios en el voltaje, velocidad del rotor, y estos mismos se reflejarán en la operación de diferentes dispositivos, desde reguladores de voltaje, controles de velocidad, gobernadores, etc.

Se explicarán de manera breve los diferentes tipos de estabilidad que se pueden presentar en un sistema de potencia.

1.7.1 ESTABILIDAD EN ÁNGULO DEL ROTOR.

La estabilidad en el ángulo del rotor se puede definir como la habilidad de máquina síncronas, interconectadas por un sistema de potencia, mantener el sincronismo. El problema de la estabilidad en el ángulo del rotor radica en la oscilación o variación de la potencia de salida en la máquina por la misma oscilación del rotor.

Para entender el problema de la estabilidad del ángulo del rotor, se necesita comprender algunas características de la máquina.

1.7.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

Se conoce que la máquina síncrona está compuesta por dos elementos importantes que son el campo y la armadura, una localizada en rotor y la otra en el estator respectivamente. El rotor puede ser alimentado por corriente directa, o puede ser movido por una turbina acoplada a través de un eje, que al rotar el campo magnético induce un valor de voltaje en los devanados de armadura, que, en el caso de máquinas trifásicas, es el voltaje de generación como se ve en plantas hidroeléctricas donde una turbina, con la fuerza de caída de agua y acoplada a un generador, producen voltaje.

Dentro de la máquina el arreglo físico que se tiene de los devanados del estator es tal que la variación alternante en el tiempo de la corriente produce un campo magnético, que, en condiciones de estado estable, gira al mismo tiempo que la velocidad del rotor. Los campos magnéticos del estator y del rotor interactúan lo que resulta un torque electromagnético debido a la tendencia de los campos a alinearse.

Esto significa que el torque electromagnético del rotor actúa en una dirección con el fin de oponerse al movimiento de la alimentación mecánica.

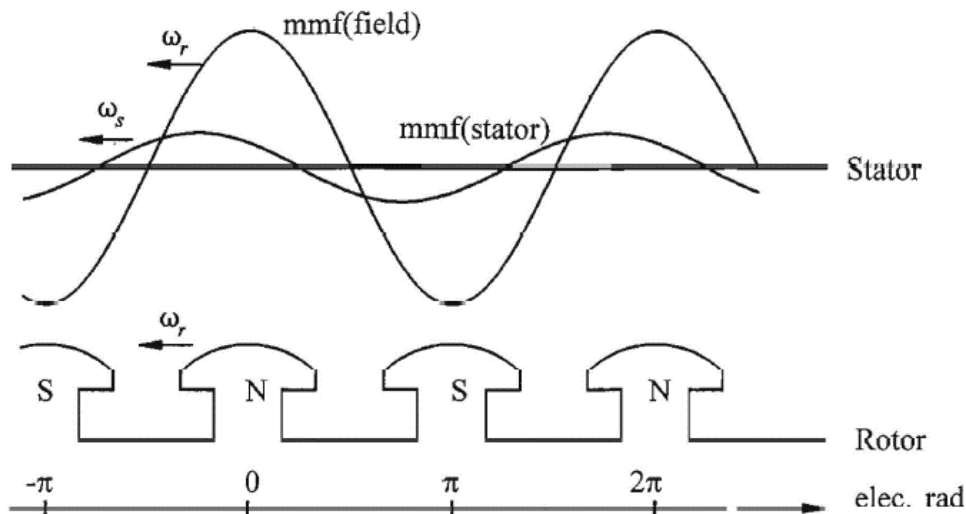


Figura 1.3 Representación de la fuerza magnetomotriz del devanado de campo y el estator en una máquina síncrona. [Kundur,1994]



En el caso de un motor se intercambian los papeles, el torque electromagnético generado por la alimentación trifásica mantiene el giro de la máquina y la carga acoplada se opone al movimiento.

La relación entre la potencia y la posición angular del rotor de una máquina síncrona está representada como una función “no linear”. En un sistema “G-LT-MS” la potencia transmitida por el generador está dada por

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1.1)$$

La expresión anterior representa la potencia máxima que se puede transferir, la función sinusoidal describe la función no linear, del factor seno implícito en la expresión se observa el valor máximo de potencia transferida depende del valor de δ , en los valores dados para $\delta = 0^\circ$ la potencia máxima transferida por el sistema es $P=0$, para valores $\delta = +90^\circ$ el valor de la potencia transferida disminuye. (Kundur, 1994) (Kothari, 2009)

Como se ha definido anteriormente, la estabilidad es la capacidad de un sistema de mantener su estado de funcionamiento en equilibrio. En el caso de la estabilidad eléctrica con la ecuación que se estudiará más adelante, se tiene

$$P_a = P_m - P_e \quad (1.2)$$

Donde P_a es la potencia de aceleración de la máquina, que, en condiciones de estado estable la potencia de aceleración es 0. Esto representa que para que las condiciones de estabilidad se cumplan la potencia mecánica debe ser igual a la potencia eléctrica, si bien lo anterior descrito es una representación del sistema idealizado.

En caso de una perturbación al sistema este se verá afectado por una aceleración o desaceleración en el mismo, si se supone que la potencia mecánica no sufre ningún cambio y la perturbación ocurre en la parte eléctrica del sistema G-LT-MS, esto significa



que la potencia mecánica permanece constante y el sistema tendrá un cambio en la potencia eléctrica en lo que resultará en la ecuación anterior una desigualdad.

Por ejemplo, si un generador gira a una velocidad mayor, la posición angular relativa con respecto a la otra máquina avanzará, como se verá más adelante, el incremento del ángulo de carga respecto a una máquina determinará si se estabiliza o no. Después de un límite en el valor del ángulo de carga, la máquina, perderá estabilidad, y la potencia transferida disminuirá.

Para cualquier situación dada, la estabilidad del sistema dependerá de si las desviaciones en la posición angular del rotor resultan en un torque suficiente para la recuperación de la misma.

El cambio de torque en una máquina síncrona seguida de una perturbación puede ser resuelta en dos componentes

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (1.3)$$

$T_s \Delta \delta$, es la componente del torque en fase con el cambio del ángulo $\Delta \delta$, y se conoce como torque de sincronización.

$T_D \Delta \omega$, es la componente del torque in fase con la velocidad de desviación $\Delta \omega$, y se conoce como torque de amortización.

La suma de estas componentes como se muestra en la expresión anterior, es la resultante del torque eléctrico, que es el equivalente en la ecuación de oscilación a la potencia eléctrica P_e .

Para tener estabilidad en el sistema se necesitan *torque de sincronización* y *torque de amortización* en cada máquina. La ausencia del torque de sincronización resulta en inestabilidad a través un movimiento aperiódico en el ángulo del rotor. Por otra parte,

la ausencia de torque de amortización se traduce en una inestabilidad oscilatoria.
 (Kundur, 1994) (Kothari, 2009) (William D. Stevenson, 2002)

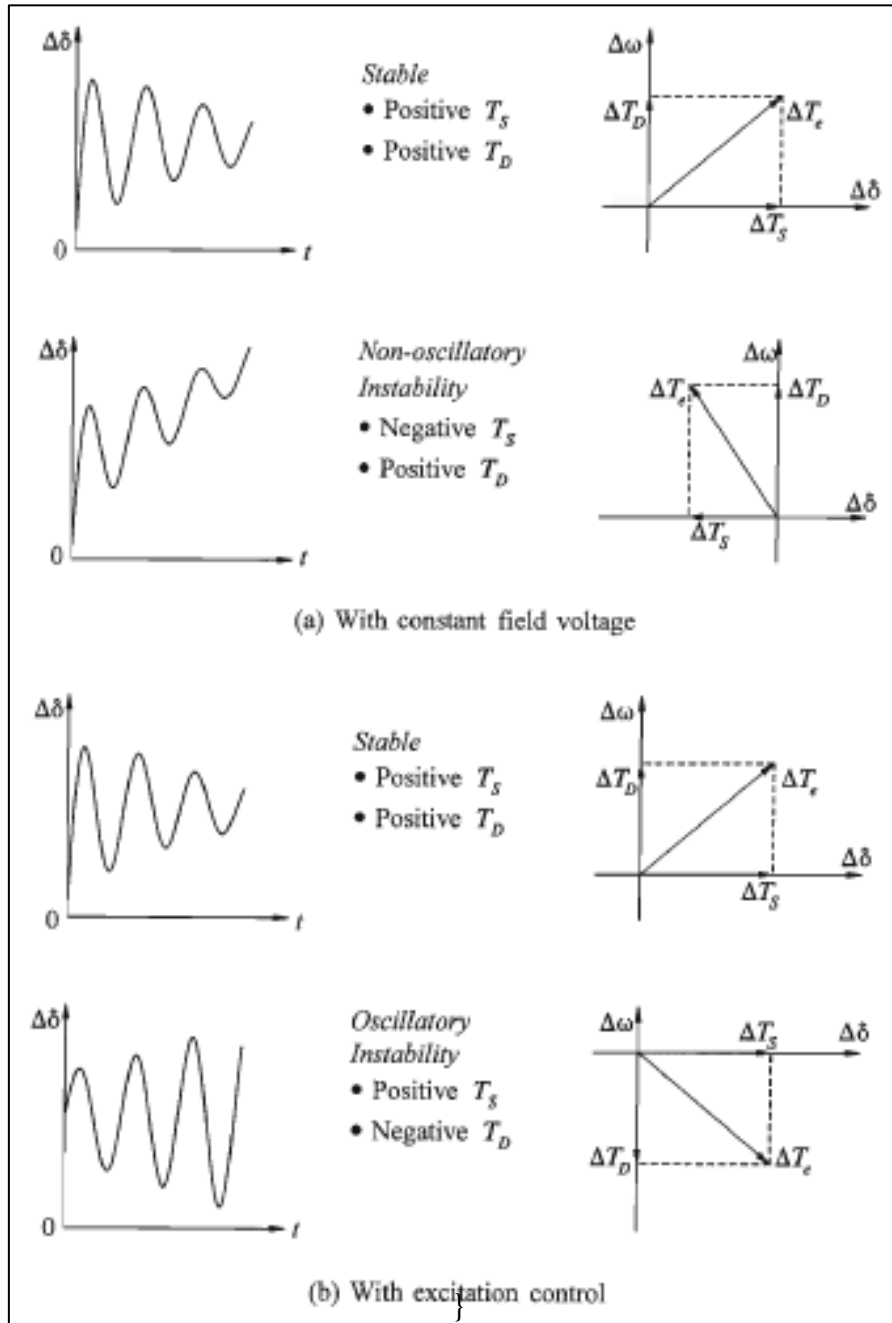


Figura 1.4 (a) Respuesta de generador a los cambios de T_S y T_D con voltaje de campo constante. (b) Respuesta de generador a cambios de T_S y T_D con control de excitación. [Kundur,1994]

1.8 INTRODUCCIÓN A PSAT (POWER SYSTEM ANALYSIS TOOLBOX)

1.8.1 ¿QUÉ ES PSAT?

En el mercado existen diferentes recursos informáticos para poder estudiar y analizar el comportamiento de una o varias máquinas en un sistema de potencia. PSAT es una herramienta de análisis y simulación de sistemas eléctricos presente en MATLAB, que puede realizar estudios de flujos de potencia, estudios de estabilidad (voltaje, ángulo de carga, etc.)

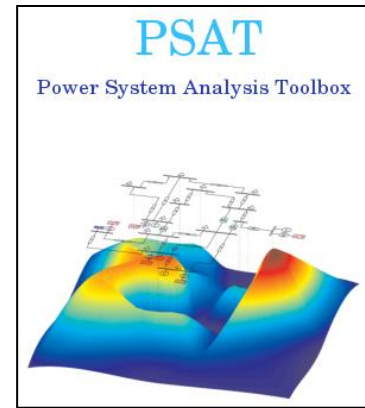


Figura 1.5 Logotipo de herramienta PSAT

En toolbox se realizará el análisis de estado estable y transitorios con las características que ofrece la herramienta. Las librerías contenidas en el programa son limitadas pero suficientes para tener un entendimiento de los sistemas que se pueden encontrar en un sistema de transmisión real.

La herramienta PSAT es un programa de licencia libre como extensión de librerías del programa MATLAB, para la introducción del uso del programa se considerará desde la instalación de la herramienta y de las herramientas que contiene de una manera amplia, considerando los aspectos que se utilizarán en este trabajo.



Figura 1.6 Página del creador de la herramienta.

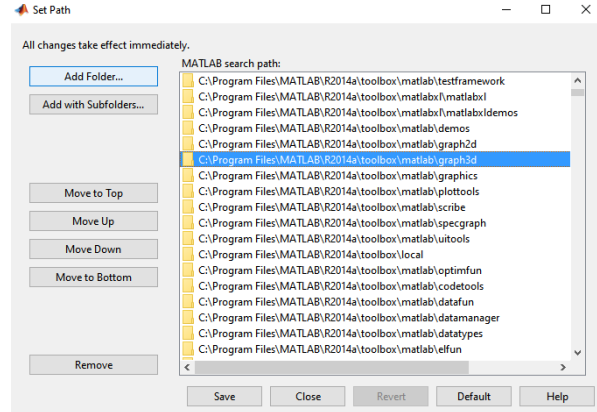


Figura 1.7 Ventana de instalación de toolbox de MATLAB.

- **Descarga de PSAT**

El toolbox puede ser descargado desde la página oficial del creador, <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>. La versión a utilizar en este documento es la versión **2.1.9**

- **Instalación PSAT**

Una vez descargado el programa (en formato “.zip”) se abrirá el programa **MATLAB** y de la cinta de opciones **HOME** en la opción **set path** abrirá una ventana donde se seleccionará la carpeta en donde se encuentra la aplicación que descargamos, y daremos a **SAVE**.

Una vez instalado el programa se abrirá desde la ventana de comando de MATLAB escribiendo **PSAT**. Posteriormente se abrirá la ventana de la herramienta.

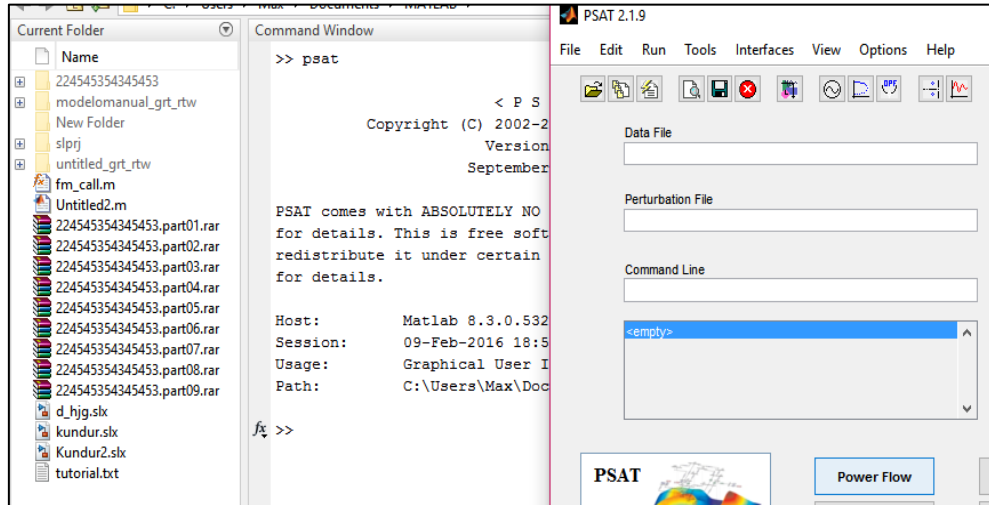


Figura 1.8 Ventana principal PSAT.

- Descripción de la pantalla de inicio

La herramienta cuenta con interfaz simple donde, como se muestra en la imagen inferior, del lado derecho de la pantalla se enlistan las características del sistema. En la parte inferior, la herramienta para diseñar el sistema está en la etiqueta de **PSAT** librería de *simulink*, el reporte estático es un apartado que muestra todos los resultados obtenidos en la simulación, el apartado **Power Flow** y **Time Domain** inician los estudios de flujo de potencia y estabilidad.

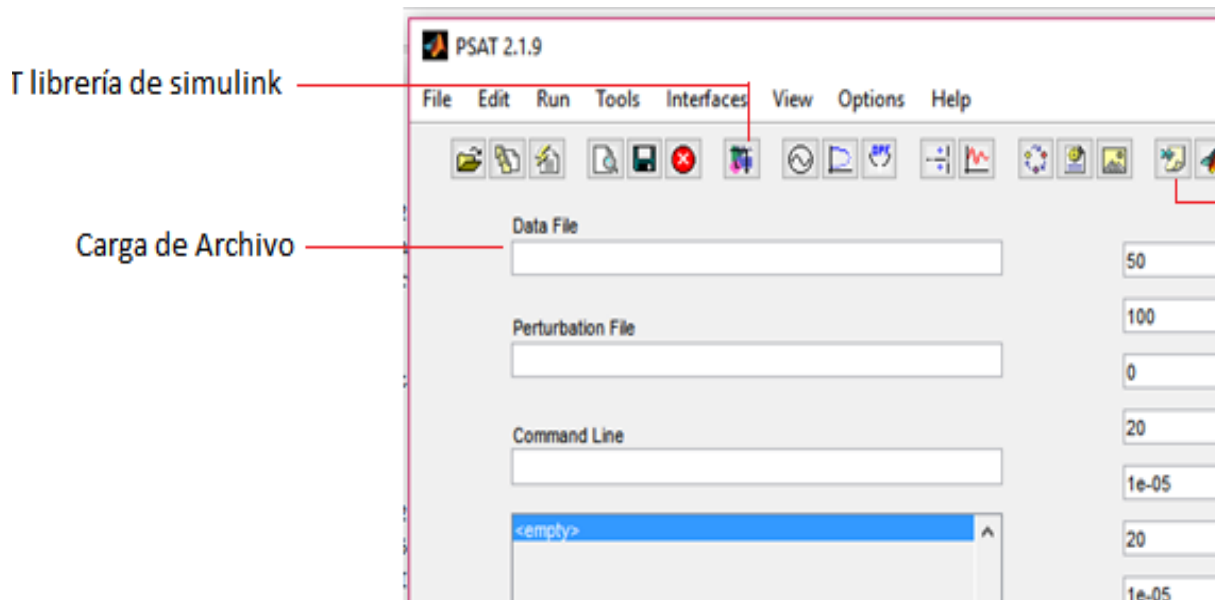


Figura 1.9 Ventana principal PSAT.

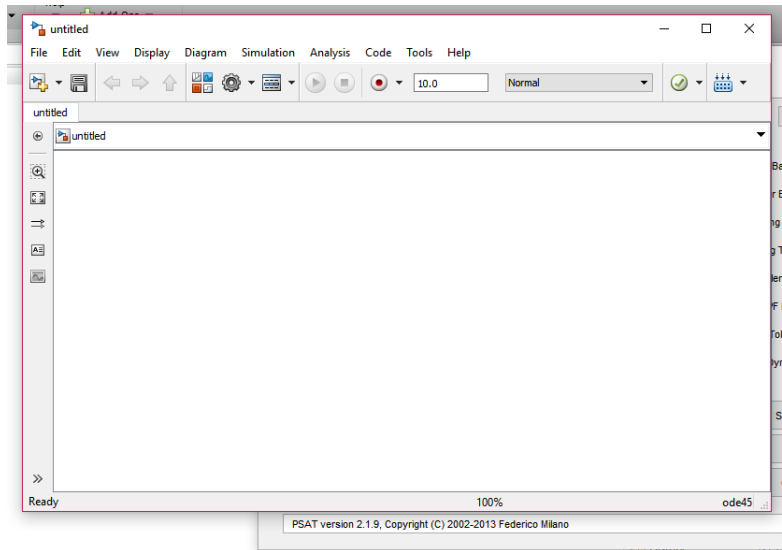


Figura 1.10 Ventana principal PSAT.

- **Construcción de Modelo de estudio**

Para la creación de un sistema para modelo de estudio se abrirá una librería en una ventana nueva. En este apartado se accederá a las librerías de todos los elementos que se pueden encontrar en un sistema de potencia.

- **Librerías y Elemento**

Buses y Conexiones: Elementos de conexión del sistema eléctrico de potencia para el acoplamiento de elementos.

Componentes estáticos & dispositivos: Contiene elementos transformadores de diferentes tipos, dispositivos como compensadores y líneas de transmisión.

OPF & CPF: Bloques para el estudio económico del sistema eléctrico de potencia.

Fallas y operaciones: Contiene fallas e interruptores figura 1, Cargas: Contiene bloques de diferentes tipos de carga.

Máquinas eléctricas: Contiene los modelos de máquinas eléctricas rotatorias, motores y generadores.

Controles: Contiene elementos de control para motores y estabilizadores.

Transformadores reguladores: Contiene transformadores con derivaciones o *taps*.

Sistemas flexibles de transmisión de CA: Elementos como compensador estático o compensador estático síncrono.

Turbinas de viento: modelos de diferentes tipos de turbinas.

Otros modelos: Contiene modelos diferentes de generadores como subsíncrono o fotovoltaico.

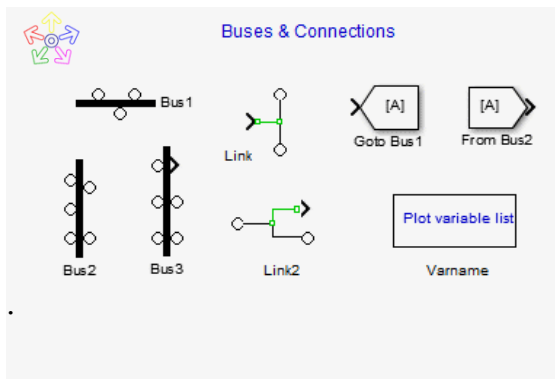


Figura 1.11 Librería de buses y conexiones.

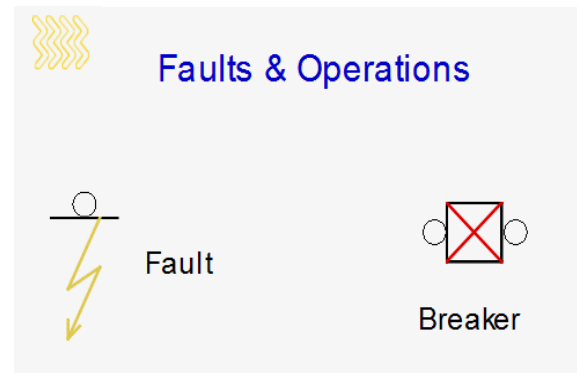


Figura 1.12 Librería de fallas y maniobras.

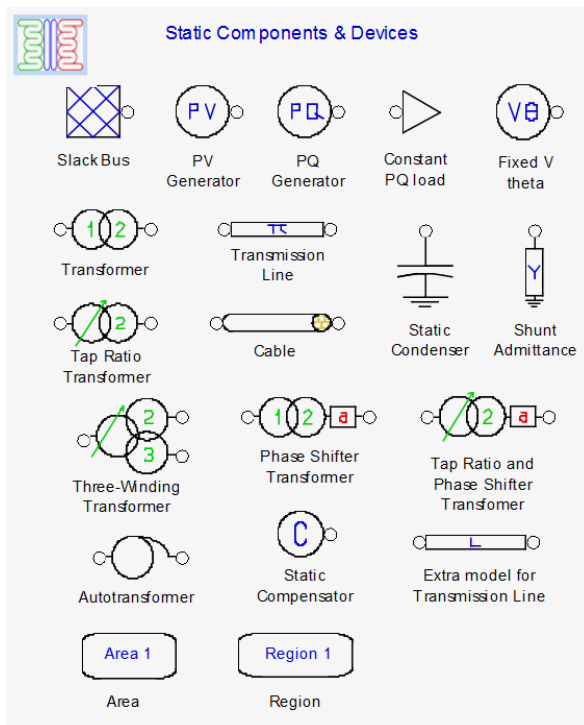


Figura 1.13 Librería de componentes estáticos y dispositivos.

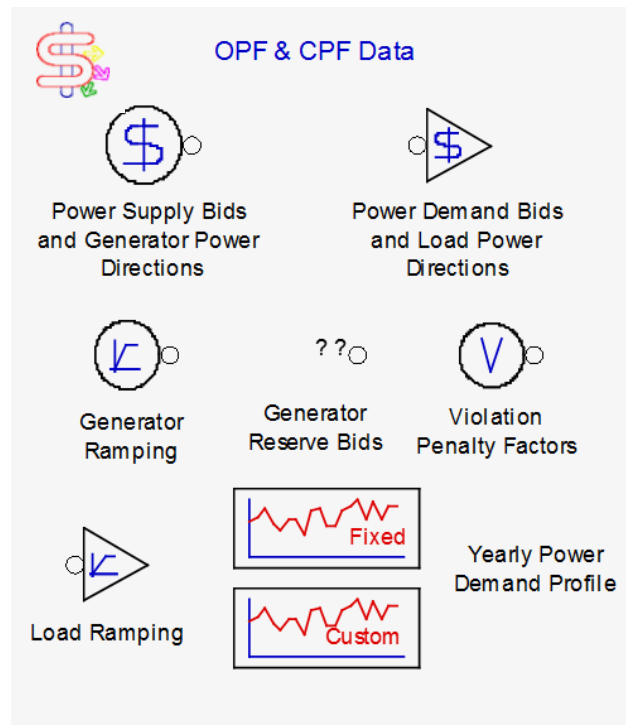


Figura 1.14 Librería de OPF & CPF.

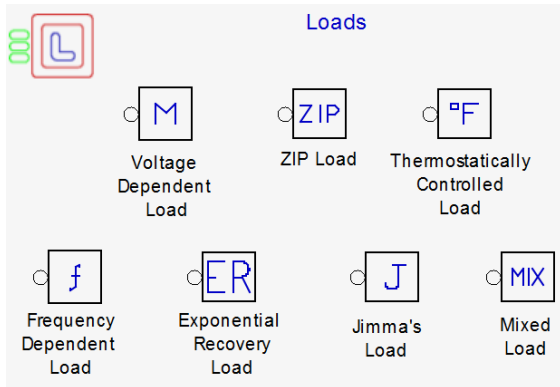


Figura 1.15 Librería de OPF & CPF.

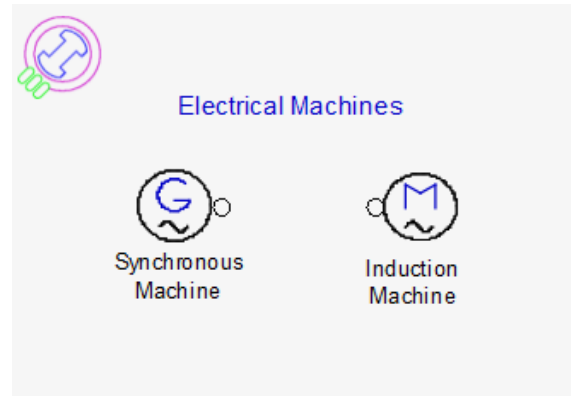


Figura 1.16 Librería de máquinas eléctricas.

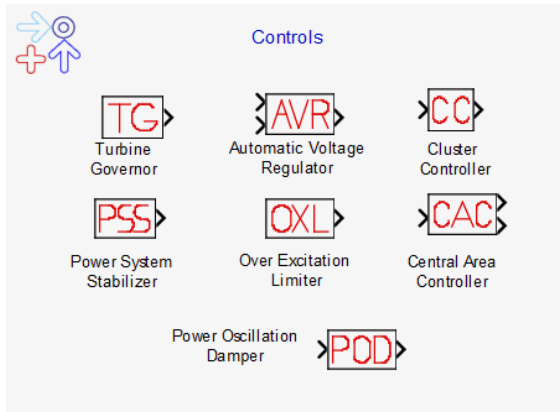


Figura 1.17 Librería de dispositivos de control.

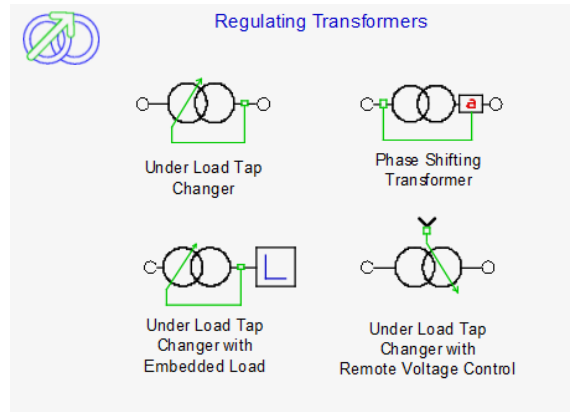


Figura 1.18 Transformadores con derivadores.

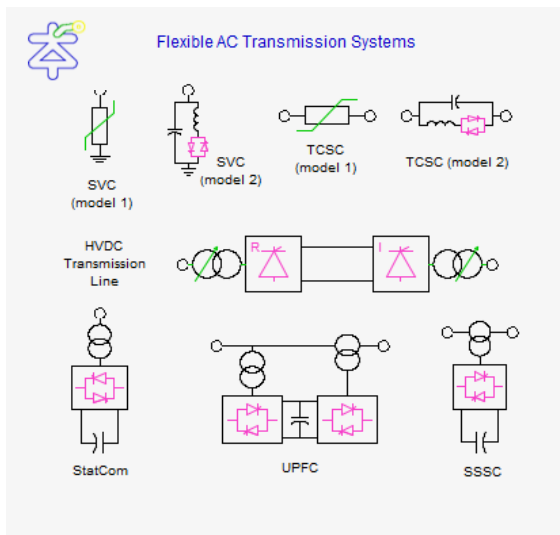


Figura 1.19 Sistemas flexibles de transmisión de CA.

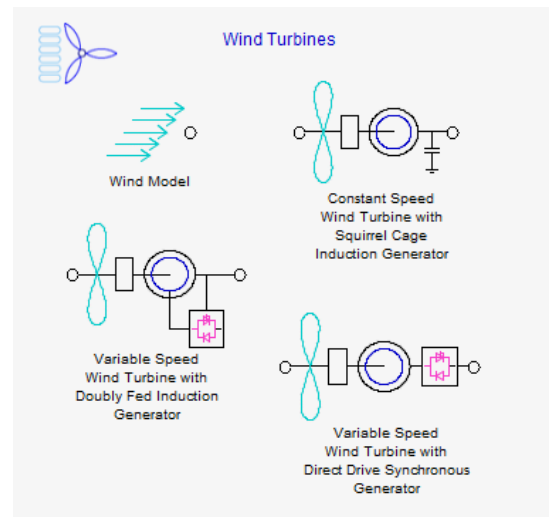


Figura 1.20 Turbinas de viento.

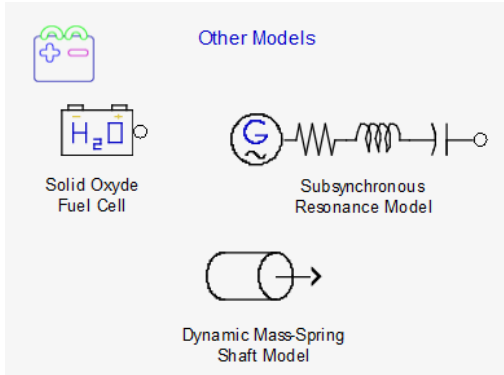


Figura 1.21 Otros modelos.

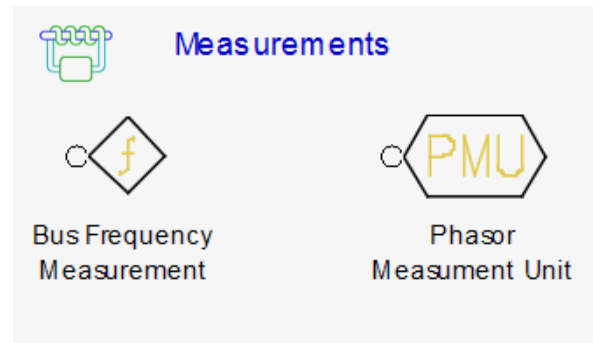


Figura 1.22 Equipos de medición.

De vuelta en la pantalla de modelado de sistema se puede incorporar un elemento de los antes mencionados en las librerías. Por ejemplo, se toma un generador y un transformador en el que posicionando el cursor sobre los íconos de ambos elementos y haciendo doble clic se abrirán los parámetros del bloque de cada elemento donde se editará dependiendo de la característica del problema.

Se observa que el bloque del generador contiene todos los datos como reactancias en *p.u.*, reactancias en eje directo y en en cuadratura, entre otros, para realizar estudios

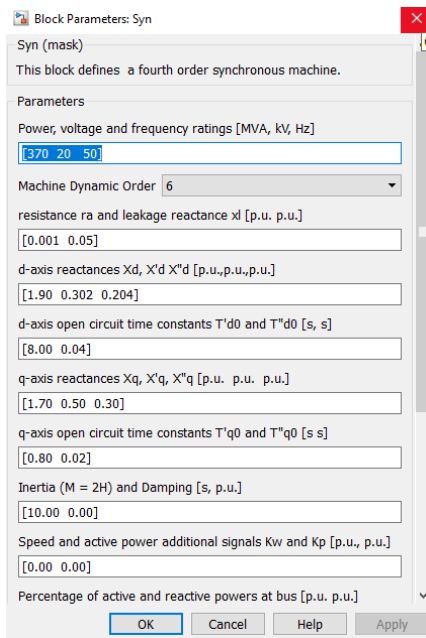


Figura 1.23 Ventana de cambio de parámetros para máquina síncrona.

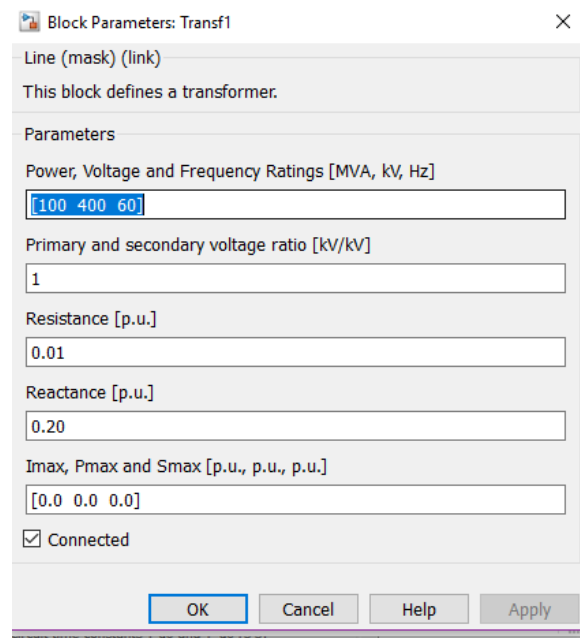


Figura 1.24 Ventana de cambio de parámetros para transformador.

simples a complejos. Por otro lado, el bloque que define al transformador va desde potencia, frecuencia y voltajes de operación hasta resistencia y reactancia del mismo.

Para poder armar un circuito o modelo todos los elementos contienen un círculo en su símbolo para poder interconectarlos entre sí, solo basta la selección del círculo en el elemento deseado y deslizar el cursor hasta el círculo del elemento siguiente

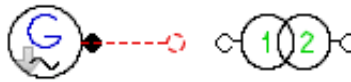


Figura 1.25 Conexión entre elementos.

Los detalles del manejo en la parte de los estudios estabilidad se verán durante el desarrollo de los distintos casos.



CAPÍTULO II

MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.

“La ciencia no es sino una perversión de sí misma a menos que tenga como objetivo final el mejoramiento de la humanidad”

-Nikola tesla-

2.1 MÉTODOS GRÁFICOS

Para los estudios de estabilidad existen diferentes tipos de métodos de resolución y en estos mismos existen dos tipos, los métodos gráficos, que, como su nombre lo define, es un método de resolución en el que puede ser representado en forma de función de manera gráfica.



2.1.1 CRITERIO DE ÁREA IGUALES

Para poder explicar el método de áreas iguales se tomará el modelo clásico, generador-transformador-LT-bus infinito y entender el comportamiento del sistema analizando sus curvas de potencia-ángulo.

Se desarrollará el método en base a las siguientes condiciones iniciales, ángulo del rotor δ_0 , que será el ángulo inicial, y una potencia mecánica equivalente a la potencia eléctrica de salida correspondiente a una operación estable.

La diferencia de potencias genera que la aceleración sea diferente de cero, lo que generará un incremento de velocidad. Para obtener el tiempo crítico de liberación " t_{cr} ", entonces, la aceleración es constante por un tiempo " t " menor que " t_{cr} " y está dada por

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2.1)$$

Durante la falla, el incremento de velocidad es el resultado de integrar la ecuación anterior

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (2.2)$$

El ángulo del rotor se puede obtener con una integración más

$$\delta = \frac{\omega_s}{4H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (2.3)$$

En las ecuaciones anteriores muestra la velocidad relativa del rotor con respecto a la síncrona, que tiene un incremento lineal mientras el ángulo del rotor avanza desde una posición inicial δ_0 hasta δ_c donde se libera la falla.



La ecuación que describe la liberación de la falla está dada por

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{2H} t_{cr} \quad (2.4)$$

$$\delta(t)|_{t=t_{cr}} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad (2.5)$$

En el punto de liberación δ_{cr} , la potencia eléctrica entregada por el generador corresponde al punto “d” en la curva potencia-ángulo. En este punto la potencia eléctrica es evidentemente mayor a la mecánica de entrada lo que genera una potencia de aceleración negativa. Puesto que se tiene una potencia de aceleración negativa el rotor disminuirá su velocidad hasta el punto “e” donde será la misma velocidad a la síncrona, aunque el ángulo del rotor haya cambiado.

El ángulo del rotor en el punto “e” retrocede desde δ_x , hasta el punto “a” donde la velocidad es menor a la síncrona, del punto “a” hasta “f”, la potencia mecánica excede la eléctrica y el rotor nuevamente incrementará su velocidad hasta que en el punto “f” se vuelva a alcanzar el sincronismo y se repita el mismo proceso por la falta de amortiguamiento, alcanzando la velocidad síncrona en los puntos “e” y “f”. La utilización del criterio de áreas iguales solo puede ser utilizado en sistemas de una sola máquina. (William D. Stevenson, 2002)

La ecuación de oscilación para un sistema de generador-bus infinito es el siguiente

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.6)$$

La velocidad angular del rotor relativa a la síncrona está dada por

$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.7)$$

Se sustituye la velocidad angular del rotor en la ecuación de oscilación



$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e \quad (2.8)$$

Cuando la velocidad del rotor es igual a la síncrona ω_r es igual cero. Se multiplicará ambos lados de la igualdad por $\omega_r = \frac{d\delta}{dt}$

$$\frac{H}{\omega_s} 2\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.9)$$

Al multiplicar por dt e integrar se obtiene

$$\frac{H}{\omega_s} (\omega_{r2}^2 - \omega_{r1}^2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.10)$$

El término ω_r representa la separación de la velocidad del rotor con respecto a la síncrona. Los términos ω_r con subíndices corresponden a los límites del ángulo δ , si la velocidad en δ_1 y δ_2 son igual a la síncrona los términos ω_r serán igual a cero. La ecuación anterior bajo las condiciones explicadas resulta

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.11)$$

Se integrará la expresión anterior en dos etapas del punto "a" y "e" correspondientes a diferentes ángulos de carga en la curva potencia-ángulo

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_{cr}}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.12)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.13)$$



El término del lado derecho de la expresión se aplica a los periodos de falla, los términos del lado izquierdo corresponden al periodo post falla. A_1 corresponde al lado izquierdo y A_2 al lado derecho.

El criterio de áreas iguales establece que la energía cinética añadida al rotor durante la falla debe eliminarse después de la misma para recuperar la velocidad síncrona. En la curva potencia-ángulo se puede apreciar la importancia del tiempo de liberación. Si se libera después de este tiempo la máquina perderá su estabilidad.

Para calcular el tiempo crítico de liberación y el ángulo crítico de liberación se necesitan igualar las áreas bajo la curva potencia potencia-ángulo de la siguiente manera.

Para el área 1

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) d\delta \quad (2.14)$$

Para el área 2

$$A_2 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) d\delta \quad (2.15)$$

$$P_m(\delta_{cr} - \delta_0) = P_{m\acute{a}x}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{m\acute{a}x}) - P_m(\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{cr}) \quad (2.16)$$

Para el ángulo crítico se despeja $\cos \delta_{cr}$

$$\cos \delta_{cr} = (P_m / P_{m\acute{a}x})(\delta_{m\acute{a}x} - \delta_0) + \cos \delta_{m\acute{a}x} \quad (2.17)$$



Dado que la forma de la curva es de naturaleza sinusoidal

$$\delta_{m\acute{a}x} = \pi - \delta_0 \text{ (dado en radianes el\u00e9cticos)}$$

$$P_m = P_{m\acute{a}x} \text{ sen} \delta_0 \quad (2.18)$$

Se sustituyen los valores anteriores en la ecuaci\u00f3n 2.17 para obtener el \u00e1ngulo cr\u00edtico de liberaci\u00f3n.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[\pi - 2\delta_0) \text{ sen} \delta_0 - \cos \delta_0] \quad (2.19)$$

Sustituyendo el valor de δ_{cr} en la siguiente ecuaci\u00f3n se puede obtener el tiempo cr\u00edtico de liberaci\u00f3n.

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad (2.20)$$

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.21)$$

Con los datos obtenidos anteriormente se pueden determinar el punto en el que la m\u00e1quina pierde su estabilidad, ayudando a tomar las medidas necesarias para tomarlo en el caso de un sistema generador-bus infinito. (Kundur, 1994) (William D. Stevenson, 2002)

2.1.2 EJEMPLO DE RESOLUCIÓN DEL MÉTODO DE ÁREAS IGUALES.

Para entender el método antes mencionado se utilizará el modelo que se utilizará más adelante, se tomará del libro el ejemplo 13.1 "*Power System Estability and Control*" del Dr. Kundur, para analizar el sistema y comprender los criterios de resolución.

Ejemplo:

Se examina la estabilidad transitoria de una estación térmica generadora que consiste en cuatro unidades proveedoras de potencia de las siguientes características, 555 MVA, 24 KV, 60 Hz, acoplados a un bus infinito por medio de dos líneas de transmisión.

En este apartado se analizará el sistema con las ecuaciones de oscilación ya dadas de los diferentes estados de falla, prefalla, falla y postfalla, la determinación de las ecuaciones se desarrollarán en los apartados posteriores.

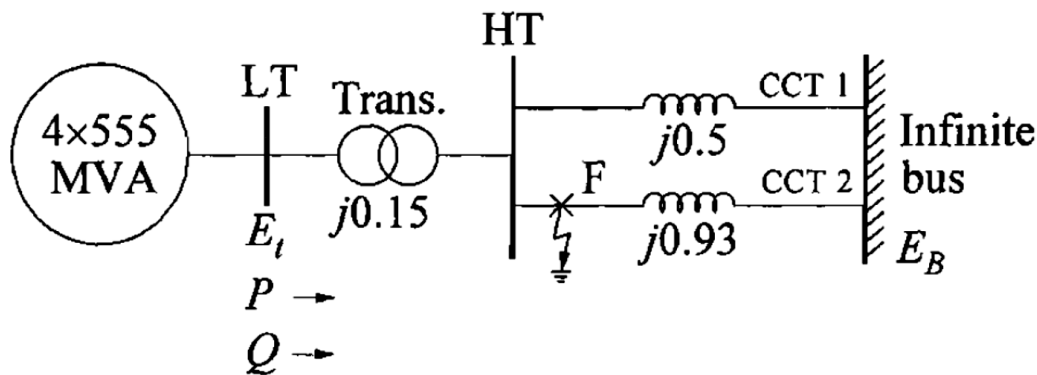


Figura 2.1 Representación del sistema a evaluar. [Kundur,1994]

Una de las consideraciones que se deben tomar, es que el método de igualación de áreas o criterio de áreas iguales únicamente es aplicable a sistemas sencillos como el modelo clásico ya mencionado anteriormente. Se observa en la imagen anterior, que el sistema se compone de cuatro máquinas unidas a un bus, seguidas de un transformador

elevador de potencial acoplado a él dos líneas de transmisión, con diferentes reactancias unidas a un bus infinito.

1.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Las ecuaciones de oscilación para el sistema a estudiar son las siguientes:

$$\text{Prefalla - } P_e = 1.351 \sin(\delta)$$

$$\text{Falla - } P_e = 0$$

$$\text{Post falla- } P_e = 1.1024 \sin(\delta)$$

Las ecuaciones anteriores describen el comportamiento de las máquinas en el sistema en las diferentes etapas de una falla, las ecuaciones dependen de las características del sistema y de la configuración.

Para desarrollar el método se graficarán las ecuaciones anteriores, se utilizó Matlab, para determinar el área bajo la curva de cada función.

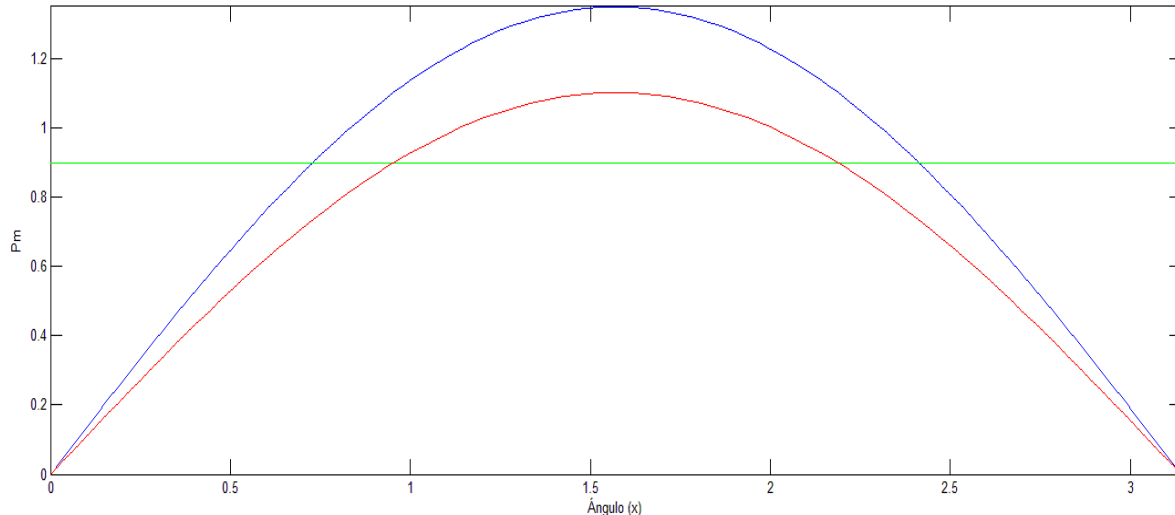


Figura 2.2 Gráficas de las diferentes etapas de falla en la máquina, prefalla(azul), postfalla(roja), estado estable(verde).

En la figura 2.2 se muestran los comportamientos del sistema, para el estado de prefalla(azul), para postfalla roja y la línea verde representa la potencia eléctrica entregada por el sistema.

Para determinar el área en el sistema se retoma lo ya mencionado con anterioridad.

$$A_1 = A_2$$

En la figura 2.3 los ángulos están representados en radianes en el eje (x), en el eje Pm se encuentra la potencia eléctrica entregada por el sistema en P.U.

La determinación de las áreas representadas en la figura anterior ayuda a identificar los límites de estudio del sistema. Para determinar las áreas se evaluarán los puntos importantes, que son, δ_0 , δ_{cr} y $\delta_{m\acute{a}x}$. El ángulo δ_0 se obtiene como condición inicial del sistema. Para el δ_{cr} es el tiempo crítico de liberación de la máquina para que no pierda la estabilidad. El siguiente punto de intersección es $\delta_{m\acute{a}x}$ que representa la unión entre los dos estados de la máquina de postfalla y estado estable.

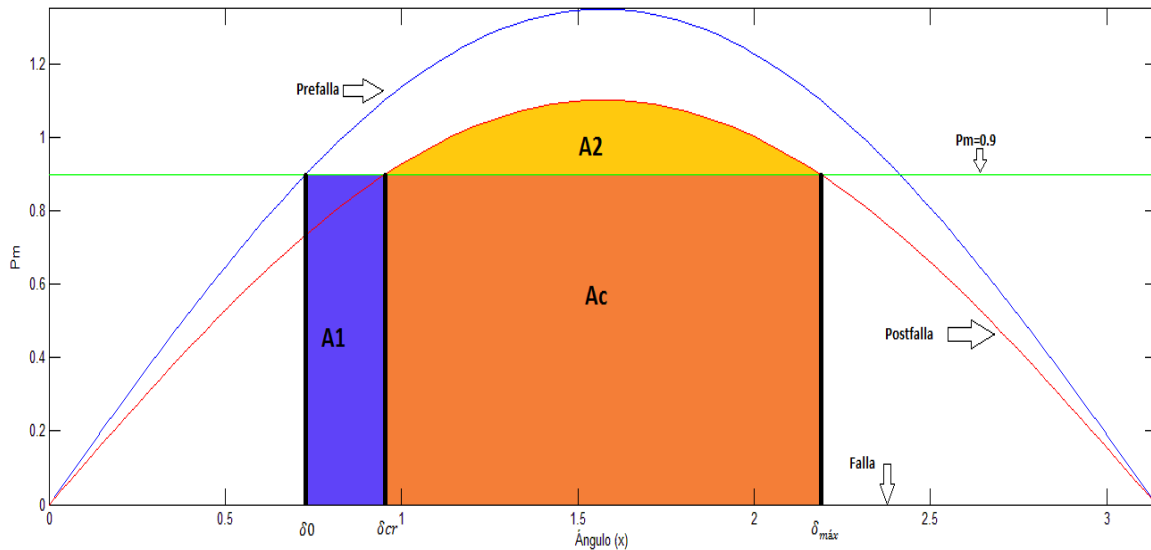


Figura 2.3 Determinación de áreas para determinar ángulo crítico de liberación δ_{cr} .

Para determinar el ángulo crítico de liberación δ_{cr} se aplican las fórmulas del apartado anterior, dependiendo de las áreas a encontrar bajo la curva, en este caso las anteriores ya establecidas en la figura 2.3, A_1 y A_2 .



En el área uno, A_1 , la figura es un rectángulo lo que para determinar su área la fórmula es $l \times l$. Para el área dos, A_2 , se debe integrar la ecuación de postfallo definida desde δ_{cr} a $\delta_{m\acute{a}x}$ menos el área A_c , para obtener solo la sección deseada.

Para el área A_1 ,

$$A_1 = 0.9(\delta_{cr} - \delta_0) \frac{\pi}{180}$$

$\delta_{m\acute{a}x}$ está dado por

$$1.1024 \sin \delta_{m\acute{a}x} = 0.9$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \sin^{-1} \frac{0.9}{1.1024} = 54.72^\circ$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 180^\circ - 54.72^\circ = 125.27^\circ$$

Para determinar el área A_2

$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{125.27} 1.1024 \sin \delta d\delta - 0.9(\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{cr}) \frac{\pi}{180}$$

Se integra la función coseno,

$$A_2 = -1.1024 \cos \delta_{m\acute{a}x} + 1.1024 \cos \delta_{cr} - 0.9(\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{cr}) \frac{\pi}{180}$$



Se sustituyen los valores de $\delta_{m\acute{a}x}$ y δ_0 en las ecuaciones anteriores A_1 y A_2 , y se igualan ambos t erminos.

$$0.9(\delta_{cr} - 41.77)\frac{\pi}{180} = -1.1024 \cos(125.27) + 1.1024 \cos \delta_{cr} - 0.9(125.27 - \delta_{cr})\frac{\pi}{180}$$

$$0.9(125.27 - \delta_{cr})\frac{\pi}{180} + 0.9(\delta_{cr} - 41.77)\frac{\pi}{180} = 0.6365 + 1.1024 \cos \delta_{cr}$$

$$\frac{0.9\pi}{180}(83.50) = 0.6365 + 1.1024 \cos \delta_{cr}$$

$$1.3116 = 0.6365 + 1.1024 \cos \delta_{cr}$$

$$1.3116 - 0.6365 = 1.1024 \cos \delta_{cr}$$

$$0.6751 = 1.1024 \cos \delta_{cr}$$

Se determina el ángulo crítico de liberación de despejando el coseno.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}\left(\frac{0.6751}{1.1024}\right) = 52.23^\circ$$

El  ngulo crítico de liberación para que la máquina pueda mantener una estabilidad transitoria es de 52.23° , gracias a esto se puede determinar el tiempo de liberación de la falla. De esta manera se determina el ángulo crítico por método de áreas iguales.



2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Fuera de la teoría existen sistemas multimáquinas que no pueden ser resueltos por métodos poco complejos como el visto anteriormente del criterio de áreas iguales. Para estos tipos de caso se cuenta con distintos y poderosos métodos como Runge-Kutta entre otros, el método gráfico explicado en el apartado anterior no es aplicable a sistemas generador bus infinito lo que limita mucho su rango de estudio.

Para poder entrar en el campo de los métodos numéricos para la resolución de problemas de estabilidad se debe conocer, como base para cualquier método, el proceso de formulación de la ecuación de oscilación de la máquina.

2.2.1 ECUACIÓN DE OSCILACIÓN

La ecuación de oscilación de un rotor es parte fundamental para el entendimiento de la dinámica rotor, en esta se representa de una manera abreviada el comportamiento que tendrá el rotor dependiendo de las condiciones de operación del mismo.

Su comportamiento se basa el par de aceleración es el producto del momento de inercia del rotor por la aceleración angular. Para un generador síncrono la ecuación está dada por

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e (N - m) \quad (2.22)$$



Donde:

J momento de inercia de la masa del rotor

θ_m desplazamiento angular el rotor, respecto al eje estacionario (rad)

t tiempo en segundos (s)

T_m par resultando suministrado por la flecha dado por la parte mecánica menos el par por pérdidas rotacionales

T_e par eléctrico total (N-m)

T_a par de aceleración total (N-m)

En la expresión anterior se considera que el par mecánico y el eléctrico, para que conserve su estabilidad, son de la misma magnitud y positivos, esto hará que el par resultante de aceleración T_a tendrá una dirección positiva con respecto al ángulo θ_m y su valor será cero. El par resultante T_a , dada su aceleración cero, mantendrá una velocidad constante que será la *velocidad síncrona*. El generador, que estará acoplado a la máquina que proporcionará la energía mecánica estará a la velocidad síncrona de igual manera. La fuente mecánica T_m para el caso de estudio se tomará como un valor constante, que se puede considerar como la forma más simple de la ecuación, pueden existir diferentes modelos con niveles de complejidad mayores que involucran otros factores en la variable. Para el par eléctrico T_e están involucrados la potencia entregada por el generador más la potencia neta del entrehierro más las pérdidas por efecto joule.



Con respecto al ángulo θ_m , se toma como punto de referencia el eje de referencia estacionario sobre el estator. Como el ángulo del rotor varia con respecto al tiempo incluso a velocidad constante, es necesario medir la posición angular del rotor con respecto al eje de referencia que rota a velocidad síncrona, con lo antes mencionado se obtiene

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.23)$$

En la ecuación anterior ω_{sm} representa la velocidad angular en rad/s, y δ_m es el desplazamiento angular del rotor en radianes, al derivar la expresión anterior con respecto al tiempo

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.24)$$

se realiza una segunda derivada

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.25)$$

La primera derivada representa que la velocidad la velocidad angular del rotor, si $\frac{d\delta_m}{dt}$ es igual a cero, $\frac{d\theta_m}{dt}$ es igual a la velocidad síncrona. La segunda derivada representa la aceleración media del rotor en rad/s².

Según la mecánica, la potencia de una máquina rotatoria está dada por el par en (N-m) por la velocidad angular ω_{sm} . Si se multiplica la velocidad angular ω_{sm} por



ambas partes de la igualdad de la ecuación de la dinámica de una máquina rotatoria, se obtiene.

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e (W) \quad (2.26)$$

Se observa que el ángulo denotado en la segunda derivada era " θ " que correspondía al desplazamiento angular de la máquina, ahora se en la segunda derivada se tiene " δ ", que corresponde a la posición inicial de la máquina en radianes mecánicos. El coeficiente "M" o "constante de inercia" es el resultado de multiplicar la velocidad angular por el momento de inercia del motor "J", de la misma manera con los pares T_a, T_e, T_m por la velocidad angular se obtiene la potencia P_a, P_e y P_m .

Para la constante de inercia "M" se debe tomar en cuenta que este no es un valor universal para todos los sistemas y que depende de las características propias de la máquina, además porque en ciertas ocasiones ω_m difiere con la velocidad síncrona. Otra manera de sustituir este elemento es con una "constante" dada por la máquina, la constante "H" y está dada por

$$H = \frac{\text{Energía cinética almacenada en megajoules a velocidad síncrona}}{\text{capacidad de la máquina en MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{máq}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{máq}} \quad (2.27)$$



Se despeja “M” y se sustituye en la ecuación 2.26, y se obtiene

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{m\acute{a}q}} = \frac{P_m - P_e}{S_{m\acute{a}q}} \quad (2.28)$$

Se observa que “ δ_m ” y “ ω_{sm} ” están en radianes mecánicos y radianes mecánicos por segundo, se puede cambiar a “ δ ” y “ ω_s ” que se encuentran representados en radianes eléctricos en ambos casos.

Puesto que la base de las potencias debe ser la misma que “H” obtenemos

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.29)$$

Ahora se tiene que

$$\omega_s = 2\pi f \quad (2.30)$$

Sustituimos ω_s en la ecuación anterior

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.31)$$

Lo anterior en radianes eléctricos, para grados eléctricos está dado por

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.32)$$



Las ecuaciones anteriores son las ecuaciones de oscilación en radianes eléctricos y grados eléctricos respectivamente, con ellas se obtienen las curvas de oscilación en una máquina, el estudio de estas curvas determinarán la estabilidad del sistema. (William D. Stevenson, 2002)

2.2.2 MÉTODO PASO A PASO

El método paso a paso es un sistema de resolución de ecuaciones iterativo en el que se van tomando los resultados previos obtenidos para que la aproximación sea cada vez más exacta, a partir de la ecuación de oscilación obtenida anteriormente, en este caso utilizando las ecuaciones en las diferentes etapas de falla, iniciando por prefalla, falla, y post falla, en cada una se hará una reducción del sistema a estudiar.

Se debe tomar en consideración que la ecuación está a la misma base o en PU. Una vez desarrollada la ecuación de oscilación, se desarrolla el método paso a paso. La solución $\delta(t)$ es obtenida en intervalos discretos de tiempo con intervalos de separación dados por Δt . Dado que la potencia de aceleración y cambio en la velocidad son funciones continuas del tiempo se describen como:

1. La potencia de aceleración P_a calculada al inicio del intervalo se considera que permanecerá constante desde la mitad del intervalo anterior hasta la mitad del intervalo a considerar.
2. La velocidad del rotor $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ (superior e inferior a la velocidad síncrona ω_s) se asume como constante a través de cualquier intervalo, en el valor calculado a la mitad del intervalo.

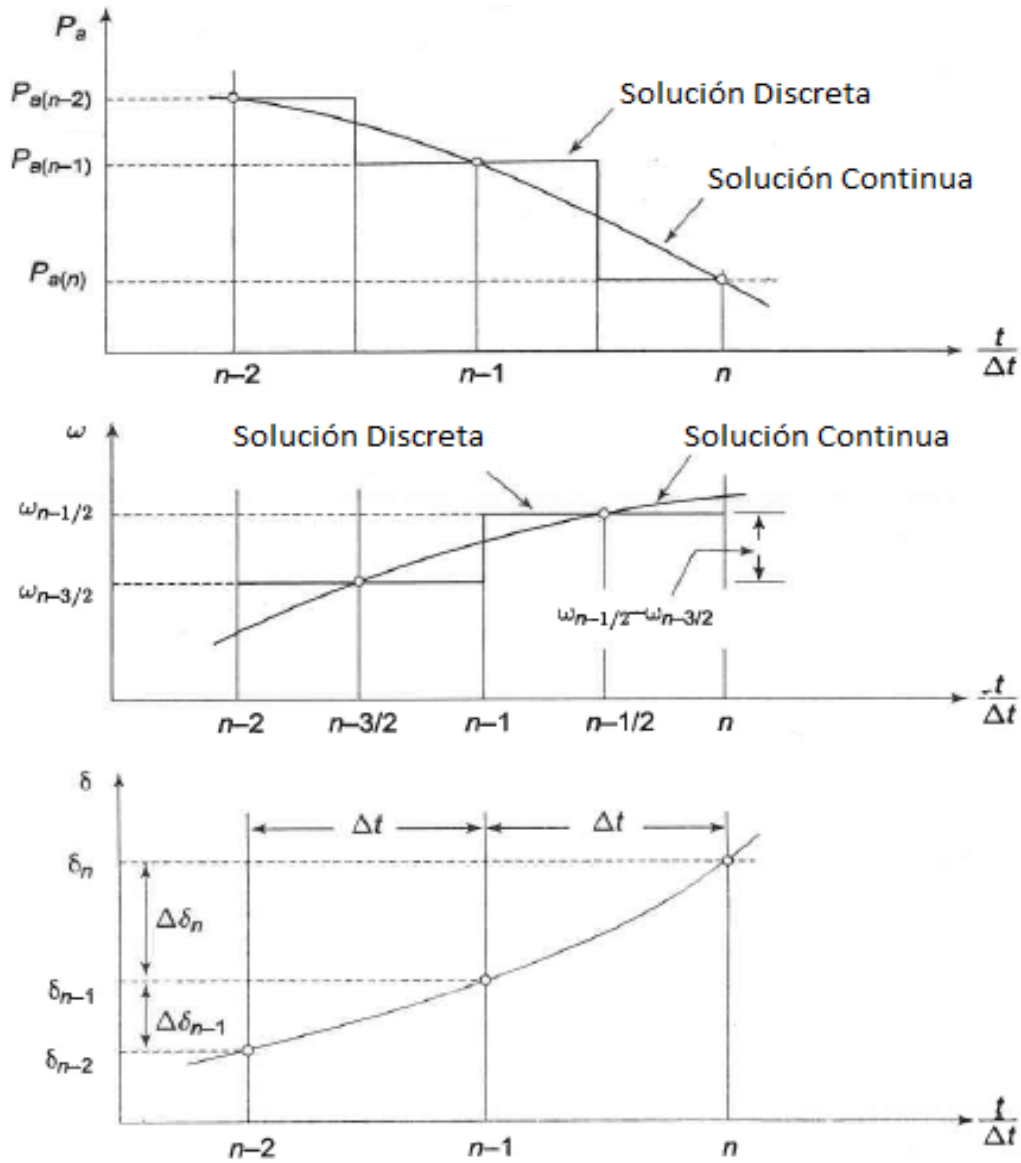


Figura 2.4 Solución a la ecuación de oscilación método paso a paso.
(Kothari, 2009)

Como se muestra en la figura 2.1, los ejes "x" denominados por $\frac{t}{\Delta t}$ pertenecen a los finales de los intervalos. En el final del $(n-1)$ intervalo, la potencia de aceleración está dada por potencia la potencia mecánica entregada que es un valor constante, ya explicado en el apartado anterior, menos la potencia eléctrica entregada en cada etapa



de la falla en el intervalo(n-1), lo que nos resultará en tres ecuaciones de diferentes (prefalla, falla y post falla).

$$P_{a(n-1)} = P_m - P_{e(n-1)} \quad (2.33)$$

En condiciones de estabilidad se tiene que la potencia de aceleración es 0, si $P_m = P_e$, y P_m como se vio con anterioridad es igual a $P_{m\acute{a}x} \sin(\delta_{n-1})$ se puede reescribir la ecuación

$$P_{a(n-1)} = P_m - P_{m\acute{a}x} \sin(\delta_{n-1}) \quad (2.34)$$

Donde δ_{n-1} es el calculado en el intervalo anterior. Para el cambio del intervalo en el ángulo $\Delta\delta_n$ se obtiene de la siguiente ecuación

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(n-1)} \quad (2.35)$$

Para $K = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$

Para obtener el valor del ángulo en la etapa "n" se tiene

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \quad (2.36)$$

Con las ecuaciones obtenidas anteriormente se puede iniciar el proceso del cálculo del ángulo de carga en el tiempo de liberación establecido. En el caso que existan sucesos tales como iniciación de una falla, la liberación de la misma o la apertura de un interruptor al inicio de un intervalo, se tiene que obtener el valor promedio de la

potencia de aceleración P_a . Así, el cálculo del ángulo con la discontinuidad será tomada en cuenta.

En el caso de que un suceso de este tipo se ubique en la mitad de un intervalo no será necesario un promedio de la potencia de aceleración. (Kothari, 2009)

2.2.3 MÉTODO DE LA REGLA TRAPEZIAL

La regla trapezoidal pertenece a un conjunto de métodos llamados, métodos explícitos de integración, que presentan una significativa limitación y es que no son numéricamente estable. Como consecuencia, el tamaño del paso de integración para (Δt) está limitado a las pequeñas constantes de tiempo del sistema.

Para la regla trapezoidal se debe considerar una ecuación diferencial

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad \text{con } x = x_0 \text{ a } t = t_0 \quad (2.37)$$

La solución para x en $t=t_1=t_0+\Delta t$ puede ser expresado en forma de integral

$$x_1 = x_0 + \int_{t_0}^{t_1} f(x, \tau) d\tau \quad (2.38)$$

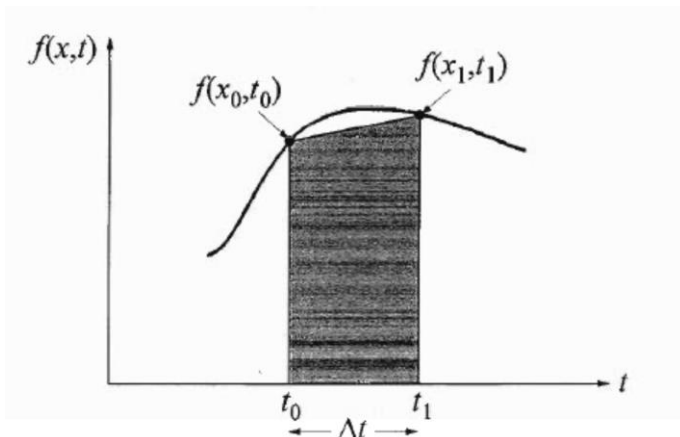


Figura 2.2 Representación gráfica del método trapezoidal. (Kundur, 1994)



Estos métodos utilizan interpolación de funciones para la expresión bajo la integral. La interpolación implica que las funciones deben pasar a través de los aún desconocidos puntos en el tiempo t_1 . El método es básicamente la aproximación del área bajo la curva por trapecios como se muestra en la figura 2.2.

La regla trapezoidal para la ecuación anterior está dada por

$$x_1 = x_0 + \frac{\Delta t}{2} [f(x_0, t_0) + f(x_1, t_1)] \quad (2.39)$$

Una fórmula general dada el valor de x en $t = t_{n+1}$ es

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2} [f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})] \quad (2.40)$$

Se observa que el término x_{n+1} se encuentra en ambos lados de la ecuación, lo que representa que x es un valor calculado como una función de su propio valor en un intervalo o paso calculado anteriormente. Esto indica que existe una ecuación implícita que debe ser resuelta. En sistemas que llevan simulaciones en las que los pasos de tiempo están limitados por consideraciones de estabilidad numéricas en lugar de exactitud, los métodos implícitos son generalmente más adecuados que los métodos explícitos. (Kundur, 1994)

2.2.4 MÉTODO DE RUNGE- KUTTA (R-K)

Este método es uno de los más poderosos a nivel práctica por su velocidad en la obtención de resultados. Este método es aproximado a la solución de las series de



Taylor, a diferencia de esta, el método R-K no requiere de la evaluación explícita de derivadas de mayor orden que la de orden uno.

A partir de la ecuación diferencial de primer orden, se tomará en cuenta únicamente el método R-K de cuarto orden para la solución de las ED. (Kundur, 1994)

La fórmula general da el valor de “ x ” en el paso (n+1)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (2.41)$$

$$K_1 = f(x_n, t_n)\Delta t \quad (2.42)$$

$$K_2 = f\left(x_n + \frac{K_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (2.43)$$

$$K_3 = f\left(x_n + \frac{K_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad (2.44)$$

$$K_4 = f(x_n + K_3, t_n + \Delta t)\Delta t \quad (2.45)$$



CAPÍTULO III

FORMULACIÓN DEL MODELO CLÁSICO Y SOLUCIÓN DEL SISTEMA.

“Las ideas no son responsables de lo que los hombres hacen de ellas.”

- Werner Karl Heisenberg-

3.1 FORMULACIÓN DEL MODELO CLÁSICO

La formulación del modelo clásico para los estudios de estabilidad es la base para poder desarrollar diferentes sistemas, el más sencillo es representado por “máquina-bus infinito”. Para el desarrollar el modelo se deben tomar en cuenta algunas consideraciones.

- **P_m** constante, la potencia de entrada de la máquina será considerada constante.
- El amortiguamiento no será despreciado.
- **P_e** , la potencia eléctrica, se calcula de la solución de la red en estado estable.



- Cada máquina se representa por un circuito de Thévenin (circuito equivalente) que consiste de una fuente de voltaje de magnitud constante en serie con la reactancia X_d' .
- Oscilación de una máquina contra un gran sistema.
- En la barra infinita se mantiene el voltaje, la frecuencia y la posición angular.
- Las perturbaciones en la red de transmisión provocan la oscilación del rotor de la máquina.

Las consideraciones mencionadas anteriormente se suponen de un sistema ideal, pero pueden ser tomadas para el análisis de sistemas más complejos de todos los estudios de estabilidad.

Para la realización de estudios de estabilidad se pueden tomar pasos a seguir describiéndolos de manera general para un sistema de una sola máquina conectada a un bus infinito. Se asume una *falla transitoria*, lo que será liberada en el tiempo de la primera apertura de las protecciones. Existen casos en que la falla es permanente, lo que resultaría en una situación catastrófica y el sistema perdería estabilidad completamente. El análisis se puede aplicar a cualquier sistema de una máquina y exceptuando los multimáquinas.

- 1.- Se determina el voltaje detrás de la reactancia transitoria y el ángulo de torque δ_0 de la máquina con referencia al bus infinito.
- 2.- Para el punto de falla, se determina la ecuación de potencia transferida $P_e(\delta)$.

- 3.- De la ecuación de oscilación, empezando con δ_0 como se obtuvo en el paso 1, se calcula δ como una función del tiempo usando métodos numéricos para ecuaciones diferenciales no lineales (paso a paso, runge-kutta, etc).
- 4.- Después de la liberación de la falla, una vez determinada $P_e(\delta)$ y resolver para el tiempo y obtener los valores del ángulo de carga $\delta(t)$.
- 5.- Una vez restaurado el sistema se vuelve a calcular la potencia eléctrica con la línea de transmisión reconectada, y se continúa el cálculo para el ángulo de carga $\delta(t)$.
- 6.- Si el valor del ángulo de carga δ llega a un valor máximo y seguido decrece, el sistema se considera transitoriamente estable, sin embargo, si el valor aumenta y no tiende a disminuir el sistema se considera inestable. (Kothari, 2009)

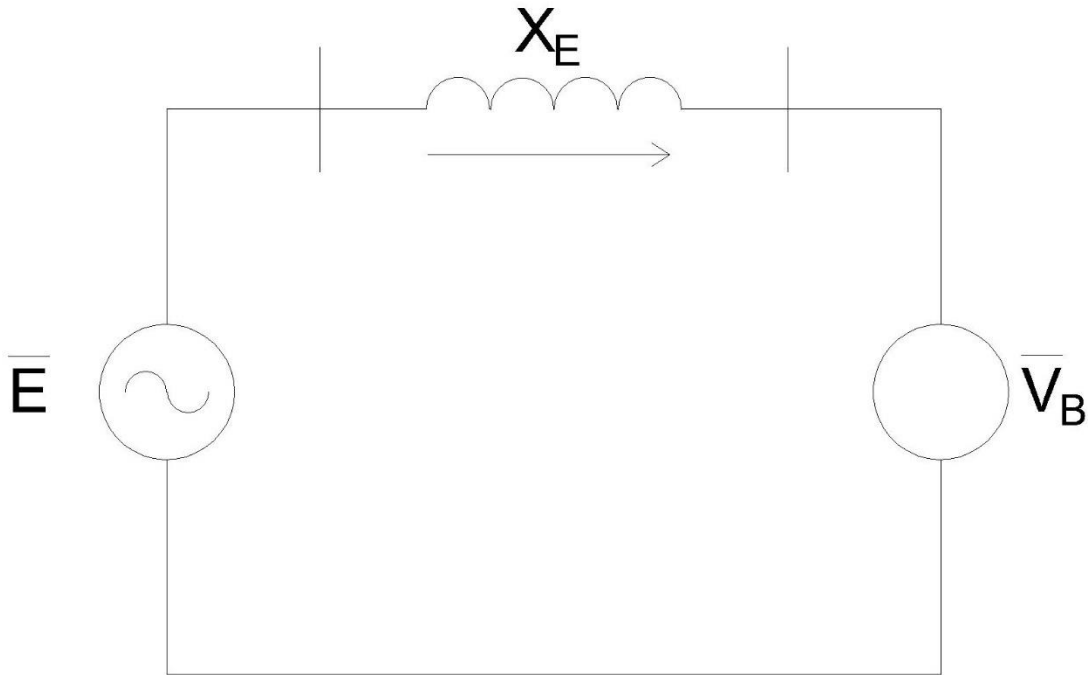


Figura 3.1 Representación del modelo clásico para la formulación de las ecuaciones de oscilación(G-LT-B).

3.2 ANÁLISIS DEL MODELO CLÁSICO

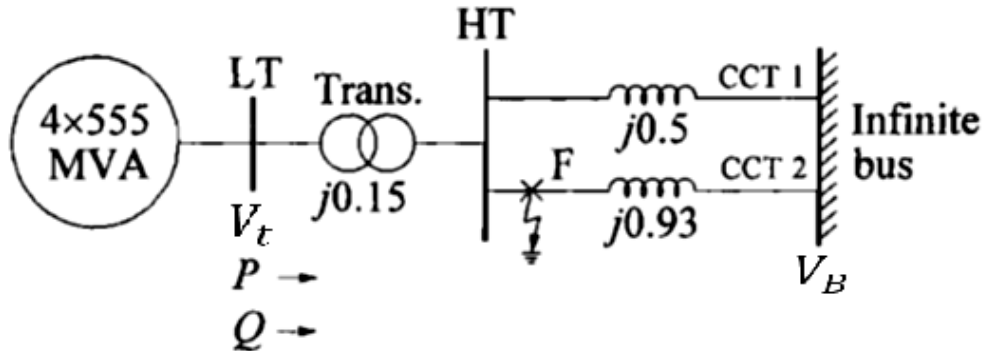


Figura 3.2 Modelo clásico para análisis. (Kundur, 1994)

El método de análisis para el modelo clásico para estudios de estabilidad está dado por la variable a determinar en la estabilidad correspondiente al ángulo de carga del “ δ ” también conocido como ángulo de interno de voltaje del generador.

Como se observa en la figura 3.1, la representación del modelo clásico está dado por un generador como fuente de voltaje E , una línea de transmisión representada por una reactancia en serie y el bus infinito representado como una fuente de voltaje que será referencia para la formulación de las simulaciones.

Para la resolución de modelos clásicos se definirán las componentes de un sistema.

Como se observa en la figura 3.2, se muestra un modelo con cuatro máquinas de una capacidad de 555 MVA que son la fuente de generación, las características propias de las máquinas son las mismas, las terminales están conectadas a un bus de baja tensión (LT) y este a un transformador elevador de voltaje (Trans) para poder transmitir la potencia a través de un arreglo de líneas de transmisión en paralelo de la misma reactancia (CCT1, CCT2), ambas conectadas a un bus infinito (E_B).

Para poder determinar las ecuaciones de oscilación en las diferentes etapas de una falla aplicada al sistema, se debe considerar lo siguiente:

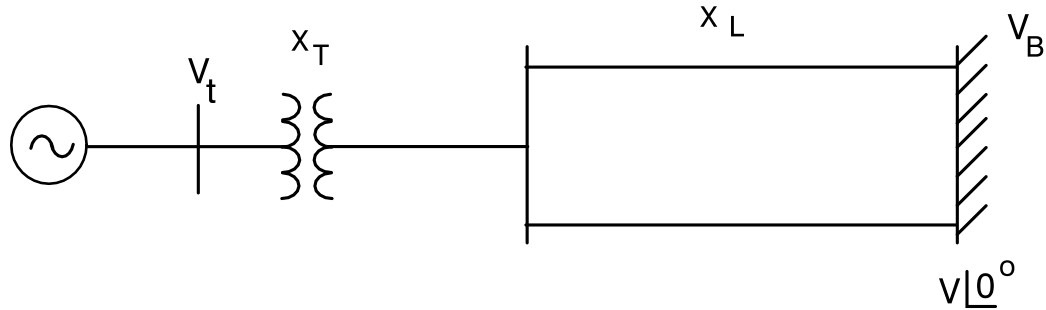


Figura 3.3 Representación simplificada del modelo de análisis.

Para la obtención de la potencia eléctrica de prefalla se debe obtener la reactancia X_E que es igual a:

$$X_E = X'_d + X_T + X_{Leq} \quad (3.1)$$

Donde:

X_E es la reactancia equivalente del sistema.

X'_d es la reactancia síncrona del generador.

X_T es la reactancia del transformador.

X_{Leq} es la reactancia equivalente en paralelo de la línea de transmisión.

En el sistema de la figura 3.3 la potencia eléctrica está dada por la ecuación 1.1

$$P_e = \frac{EV_B}{X_E} \sin \delta$$



Con base a lo anterior se aplica para los diferentes estados de la falla de la figura 3.2 donde se sabe que P_e es la potencia eléctrica entregada por la máquina en los diferentes estados de falla. Se ha hablado de tres estados diferentes los cuales son prefalla, falla y post falla, en las tres situaciones de la máquina se tendrán 3 diferentes estados de la red, es decir diferentes reactancias equivalentes totales (X_E) del sistema.

3.3 SOLUCIÓN DEL MODELO CLÁSICO

Retomando el modelo visto en la figura 3.2 se describe el sistema como lo siguiente:

Se examina la estabilidad transitoria de una estación generadora térmica que consiste en cuatro generadores de 555 MVA, 24 KV, 60 Hz, las unidades alimentan a un bus infinito a través de dos líneas de transmisión como se muestra en la figura.

Las reactancias de la red están en por unidad, con una base de 2220 MVA y 24 KV base (referido al lado de baja tensión del transformador elevador de voltaje). Las resistencias son considera despreciable.

Las condiciones iniciales de operación del sistema, tienen sus cantidades expresadas en P.U en 2220 MVA y 24 KV base.

$$P = 0.9 \quad Q = 0.436(\text{sobreexitado})$$

$$V_T = 1.0 \angle 28.34^\circ \quad V_B = 0.90081 \angle 0^\circ$$

Donde P , es la potencia mecánica entrante, Q , la potencia reactiva, E_T y E_B , el voltaje en terminales y del bus infinito respectivamente.

Los generadores están modelados como una sola máquina equivalente, representado por el modelo clásico con los siguientes parámetros en por unidad.



$$X'd = 0.3 \quad H = 3.5 \frac{MW \cdot s}{MVA} \quad K_D = 0$$

La línea CCT2 sufre una falla trifásica en el punto F, al inicio de la línea 2, el método de solución de la falla será liberando la línea y aislarla del sistema.

- a) Se debe determinar el ángulo crítico de liberación de la falla δ_{cr} .
- b) Se debe determinar el tiempo crítico de liberación t_{cr} .

1) Se determina valor de voltaje interno de la máquina.

Para determinar el voltaje interno se realiza un diagrama reducido del sistema a trabajar.

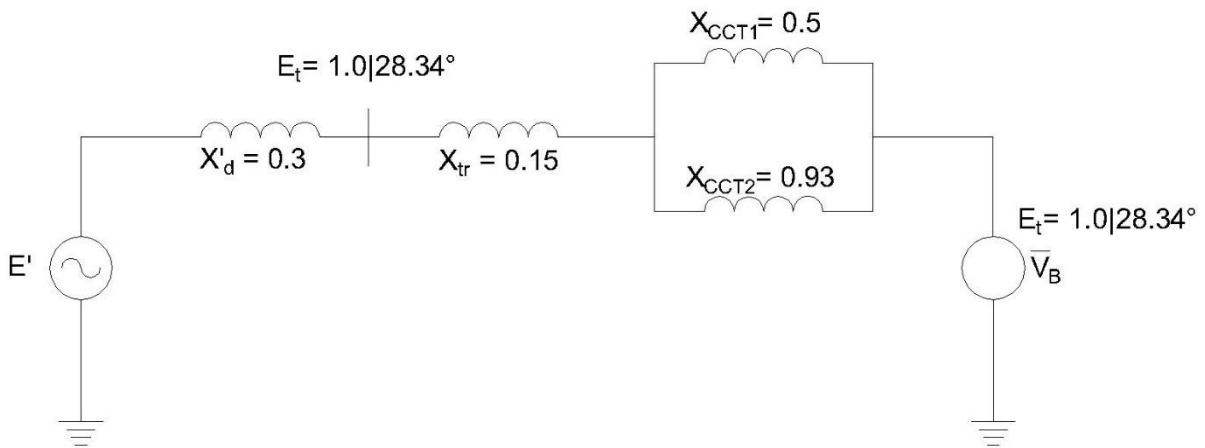


Figura 3.4 Circuito equivalente del diagrama unifilar.

Se utiliza la siguiente expresión que determina el voltaje interno de la máquina síncrona

$$E' = V_t + jX_d' I$$



Para obtener la corriente se necesita la corriente que fluye por el sistema, se obtiene con la ecuación:

$$I = \frac{(P + jQ)^*}{V_t^*} = \frac{(0.9 - j0.436)}{1.0 \angle -28.34^\circ}$$

$$\frac{1.0 \angle -25.84^\circ}{1.0 \angle -28.34^\circ} = 1.0 \angle 2.5^\circ$$

$$I = 0.999 + j0.0436$$

Se sustituye en la ecuación

$$E' = V_t + jX'_d I = 1.0 \angle 28.34^\circ + j0.3(0.999 + j0.0436)$$

$$E' = 0.8801 + j0.4747 + j0.2997 - 0.01308$$

$$E' = 0.86702 + j0.7744$$

$$E' = 1.1625 \angle 41.77^\circ$$

Este resultado es el voltaje interno de la máquina, el ángulo representa el valor inicial de operación de la máquina para el ángulo de carga, en otras palabras, son los parámetros de operación de la máquina en estado estable.

2.- Se determina la ecuación de potencia transferida en el punto de falla.

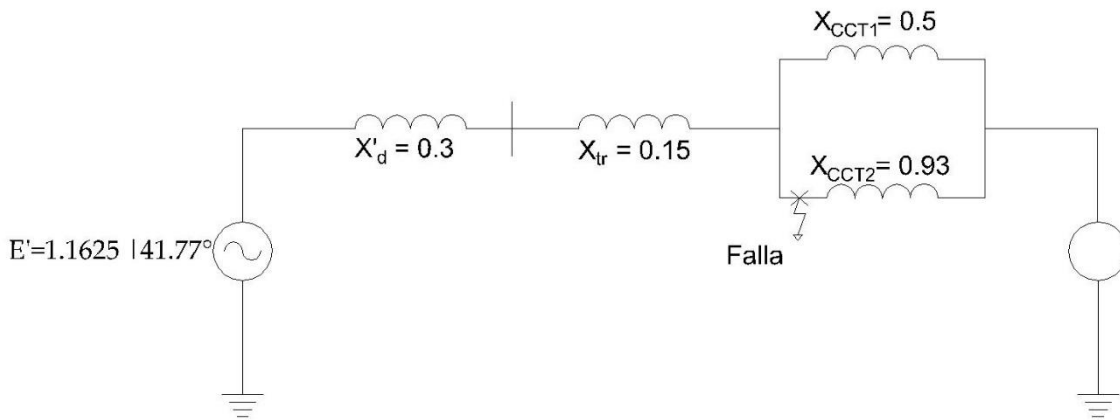


Figura 3.5 Diagrama unifilar de sistema con ubicación de punto de falla en la línea CCT2.

Para determinar la potencia transferida se debe realizar la reducción del diagrama unifilar del sistema con los diferentes estados de la falla para este (pre falla, falla y post falla). El análisis para obtener el diagrama unifilar de cada sistema se realiza de a partir de la posición de la falla y el comportamiento de la misma como se ve en la figura 3.5.

Se dispone a obtener la reactancia total equivalente X_E para una situación en la que el sistema trabaja en operación normal.

Para el sistema anterior la reactancia equivalente está dada por

$$X_E = X'_d + X_{tr} + \left(\frac{X_{CCT1} * X_{CCT2}}{X_{CCT1} + X_{CCT2}} \right)$$

$$0.3 + 0.15 + \left(\frac{0.5 * 0.93}{0.5 + 0.93} \right) = 0.7751$$

$$X_E = 0.7751 \text{ p.u}$$

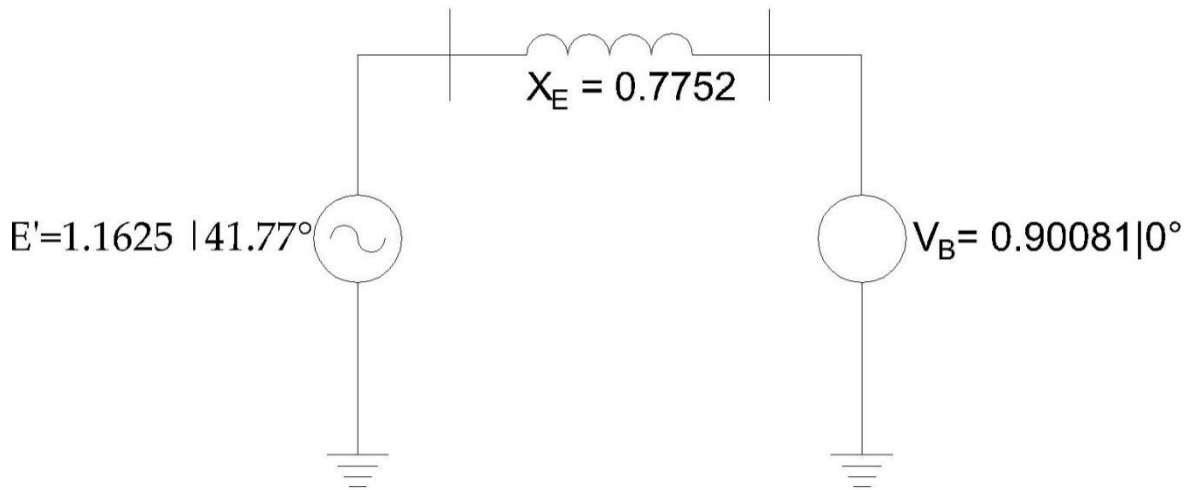


Figura 3.6. Circuito equivalente para condición de prefalla.

El análisis para la determinar los circuitos equivalentes para **falla** y **postfalla** se realizan con respecto a la situación, en el caso de estado de falla se creará momentáneamente un corto circuito, por lo que la línea dos se verá como un conductor sin reactancia. Para el caso de la línea post falla, el sistema habrá liberado la falla operando los interruptores correspondientes a la línea de transmisión CCT2, esto dejará en operación a una sola línea por donde se hará el flujo de la potencia a al bus infinito.

Para el análisis en “**falla**” se tiene

$$X_E = X'_d + X_{tr} + \left(\frac{X_{CCT1} * X_{CCT2}}{X_{CCT1} + X_{CCT2}} \right)$$

A diferencia de la reactancia equivalente para X_{CCT2} esta será cero por el efecto de corto circuito en la línea.

$$0.3 + 0.15 + \left(\frac{0.5 * 0.0}{0.5 + 0.0} \right) = 0.45$$

$$X_E = 0.45 p.u$$

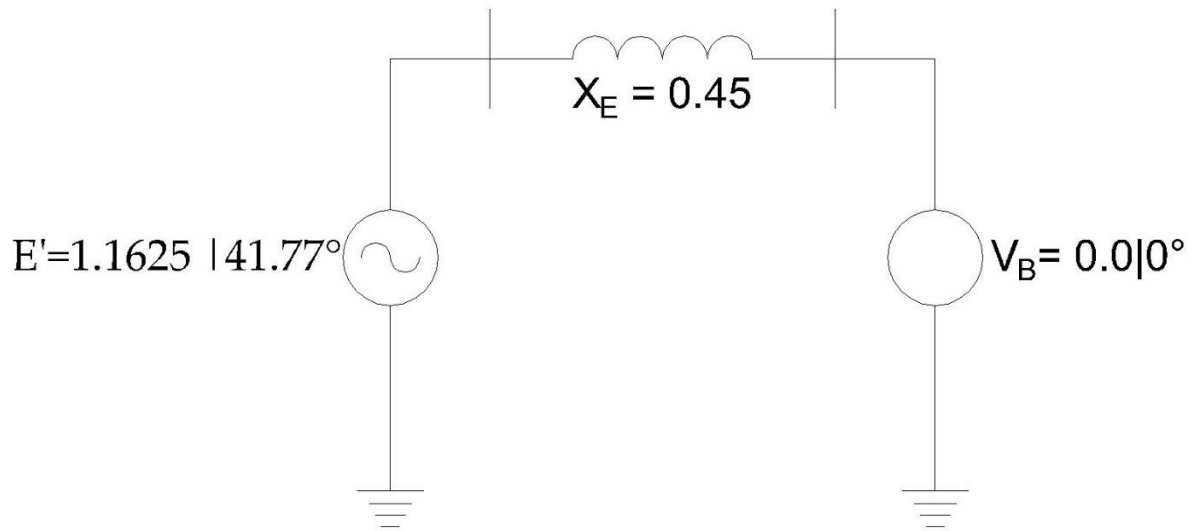


Figura 3.7. Circuito equivalente estado de falla.

Se obtendrá el circuito equivalente para el estado de liberación de falla, el análisis de será equivalente a un sistema con una sola línea de transmisión en serie con las reactancias del transformador y la máquina síncrona.

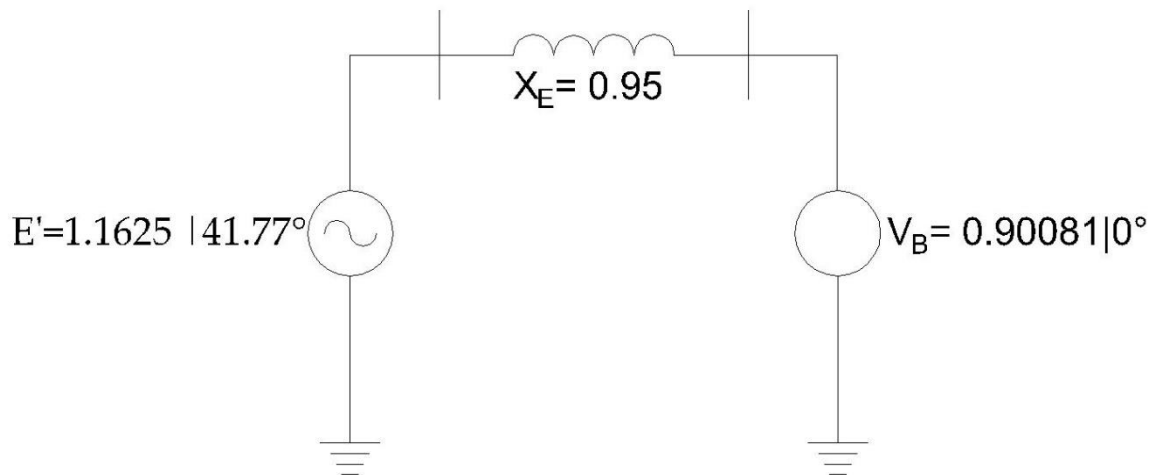


Figura 3.8 Circuito equivalente con falla liberada.



Una vez obtenidos los circuitos equivalentes se procede a determinar la potencia transferida en cada estado del sistema. Se utiliza la ecuación 1.1 para determinar la potencia eléctrica.

Para el estado de prefalla, se utilizarán únicamente las magnitudes de los voltajes

$$P_e = \frac{1.1625 * 0.90081}{0.7752} \sin \delta$$

$$P_e = 1.3509 \sin \delta \approx 1.351 \sin \delta$$

En estado de falla el flujo de la potencia eléctrica se desplomará, por lo que el voltaje en el bus de referencia V_B será igual a cero como consecuencia del corto circuito generado por la falla.

$$P_e = \frac{1.1625 * 0.0}{0.45} \sin \delta$$

$$P_e = 0$$

Con respecto a la potencia transferida para el estado de post falla se tiene

$$P_e = \frac{1.1625 * 0.90081}{0.95} \sin \delta$$

$$P_e = 1.1024 \sin \delta$$

Una vez determinada la potencia eléctrica transferida por el sistema para los tres estados de la falla, se obtiene la ecuación de oscilación para cada una de las anteriores.

$$\text{prefalla} \quad 0 = \frac{180f}{7} (0.9 - 1.351 \sin \delta)$$

$$\text{post falla} \quad 0 = \frac{180f}{7} (0.9 - 1.1024 \sin \delta)$$

Lo anterior en grados eléctricos.



3.- Solución de las ecuaciones diferenciales por el método de paso a paso.

Para dar solución al sistema, se hará uso del método paso a paso, un método numérico ya antes mencionado. Se obtendrán, primero, el factor K para la obtención de las iteraciones a partir de las siguientes ecuaciones

$$P_{a(n-1)} = P_m - P_{e(n-1)}$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(n-1)}$$

$$K = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$$

Se determina un paso de integración de 0.03 s a una frecuencia de operación de 60 Hz, por lo tanto

$$K = \frac{180(60)}{3.5} (0.029)^2 = 2.595$$

El análisis del método se basa en el cálculo del ángulo en el paso de integración n , utilizando los valores de la iteración $n-1$. Se inicia el cálculo en el intervalo antes de la falla, que se denominará como 0^- , en esta etapa, el sistema se encuentra en estado estable por el que el ángulo inicial es 41.77 lo que corresponde al ángulo interno de la máquina; y la potencia P_a , es 0.

Tabla 3.1 Tabla primera iteración método paso a paso.

Δt	P_m	$P_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\delta_n)$	P_a	$kP_{a(n-1)}$	$\Delta\delta_n$	δ_n
0-	0.9	0.9	0	0		41.77

Se tomará ahora el intervalo en 0^+ , que es el instante en el cual la falla será aplicada al sistema, se realizarán las mismas operaciones y se colocará la siguiente iteración con el mismo ángulo δ_n , la diferencia en la iteración en el intervalo 0^+ está en la utilización de la ecuación de oscilación en estado de falla del sistema.



Donde $P_{m\acute{a}x} * \text{sen}(\delta_n) = 0$ para el estado de falla. Siguiendo se obtendrá un promedio de P_a de las primeras dos iteraciones debido al cambio de estado de la máquina (prefalla a falla).

Tabla 3.2 Tabla primera iteración método paso a paso.

0-	-	0.9	0	-	-	41.77
0+	41.7700	0.0000	0.9000	-	-	41.77
0	-	-	0.4500	1.1678	-	41.77

Desde este punto se realizarán las iteraciones siguientes con intervalos de tiempo de 0.03 para obtener los valores del ángulo de carga.

Para 0.029 s

$$P_a = 0.9 - 0 = 0.9$$

$$KP_a = 1.1678 * 0.45 = 1.1678$$

Ahora se obtiene el incremento del ángulo $\Delta\delta_n$, que resulta de la suma del δ_{n-1} más el incremento $KP_{a(n-1)}$, por lo tanto.

$$\Delta\delta_n = 1.1678 + 0 = 1.1678$$

$$\delta_n = 41.77 + 1.1678 = 42.93^\circ$$

En el intervalo 0.087s se obtiene

$$\Delta\delta_n = 3.5033 + 2.3355 = 5.8388^\circ$$

$$\delta_n = 41.77 + 1.1678 = 52.27^\circ$$

Es el ángulo crítico de liberación antes determinado por el método de áreas iguales. Se observa que el tiempo crítico de liberación es de 0.087 segundos para mantener estabilidad. En este intervalo se obtendrá otro promedio del cambio de estado de la máquina.

El promedio se realizará de la misma manera en que se obtiene el promedio de la iteración en 0, para el cambio de estado de prefalla a falla.



Para la obtención de las demás iteraciones se realizan las iteraciones por medio de Excel para obtener la onda completa del comportamiento en los tres estados de la máquina por el método de paso a paso.

Tabla 3.3 Iteraciones del modelo clásico hasta 1.102 segundos después de la falla.

t,s	(sigma n)	pmax sen(sigma n)	pa	kpan-1	delta sigma n	sigma n
0-	-	0.9	0	-		41.77
0+	41.7700	0.0000	0.9000	-	-	41.77
0	-	-	0.4500	1.1678	-	41.77
					1.1678	
0.029	42.9378	0.0000	0.9000	2.3355	-	42.9378
					3.5033	
0.058	46.4410	0.0000	0.9000	2.3355	-	46.4410
					5.8388	
0.087	52.2798	0.8720	0.0280	0.0728	-	52.2798
					5.9115	
0.116	58.1913	0.9368	-0.0368	-0.0955	-	58.1913
					5.8160	
0.145	64.0073	0.9909	-0.0909	-0.2358	-	64.0073
					5.5803	
0.174	69.5876	1.0331	-0.1331	-0.3455	-	69.5876
					5.2348	
0.203	74.8224	1.0639	-0.1639	-0.4254	-	74.8224
					4.8094	
0.232	79.6318	1.0844	-0.1844	-0.4785	-	79.6318
					4.3309	
0.261	83.9627	1.0963	-0.1963	-0.5093	-	83.9627
					3.8216	
0.29	87.7843	1.1016	-0.2016	-0.5231	-	87.7843
					3.2985	
0.319	91.0829	1.1022	-0.2022	-0.5247	-	91.0829
					2.7738	
0.348	93.8567	1.0999	-0.1999	-0.5188	-	93.8567
					2.2550	
0.377	96.1117	1.0961	-0.1961	-0.5090	-	96.1117
					1.7460	
0.406	97.8577	1.0921	-0.1921	-0.4984	-	97.8577
					1.2476	
0.435	99.1054	1.0885	-0.1885	-0.4892	-	99.1054
					0.7584	
0.464	99.8637	1.0861	-0.1861	-0.4830	-	99.8637



					0.2754	
0.493	100.1391	1.0852	-0.1852	-0.4806	-	100.1391
					-0.2052	
0.522	99.9339	1.0859	-0.1859	-0.4824	-	99.9339
					-0.6876	
0.551	99.2462	1.0881	-0.1881	-0.4881	-	99.2462
					-1.1758	
0.58	98.0705	1.0915	-0.1915	-0.4969	-	98.0705
					-1.6727	
0.609	96.3978	1.0955	-0.1955	-0.5075	-	96.3978
					-2.1802	
0.638	94.2176	1.0994	-0.1994	-0.5175	-	94.2176
					-2.6977	
0.667	91.5200	1.1020	-0.2020	-0.5242	-	91.5200
					-3.2219	
0.696	88.2981	1.1019	-0.2019	-0.5240	-	88.2981
					-3.7458	
0.725	84.5522	1.0974	-0.1974	-0.5123	-	84.5522
					-4.2581	
0.754	80.2941	1.0866	-0.1866	-0.4842	-	80.2941
					-4.7424	
0.783	75.5517	1.0675	-0.1675	-0.4347	-	75.5517
					-5.1770	
0.812	70.3747	1.0383	-0.1383	-0.3590	-	70.3747
					-5.5360	
0.841	64.8387	0.9978	-0.0978	-0.2537	-	64.8387
					-5.7897	
0.87	59.0490	0.9454	-0.0454	-0.1178	-	59.0490
					-5.9075	
0.899	53.1416	0.8820	0.0180	0.0467	-	53.1416
					-5.8608	
0.928	47.2808	0.8099	0.0901	0.2339	-	47.2808
					-5.6269	
0.957	41.6539	0.7326	0.1674	0.4343	-	41.6539
					-5.1926	
0.986	36.4613	0.6551	0.2449	0.6355	-	36.4613
					-4.5571	
1.015	31.9043	0.5826	0.3174	0.8237	-	31.9043
					-3.7334	
1.044	28.1709	0.5204	0.3796	0.9850	-	28.1709
					-2.7483	
1.073	25.4226	0.4732	0.4268	1.1075	-	25.4226
					-1.6408	
1.102	23.7817	0.4445	0.4555	1.1820	-	23.7817

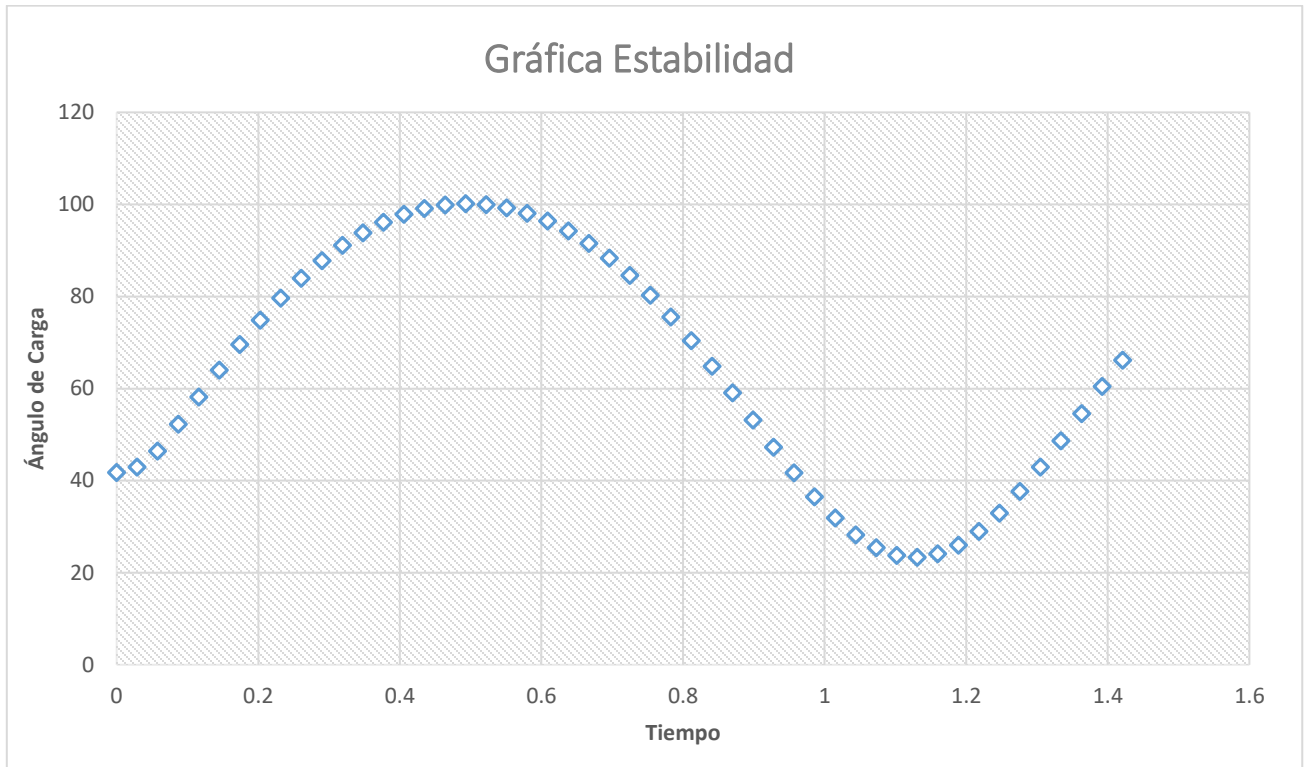


Figura 3.9 Gráfica tiempo-ángulo de carga del sistema.

3.4 SOLUCIÓN DEL MODELO CLÁSICO CON PSAT

Una manera más eficaz de dar solución a los modelos clásicos para los diferentes estudios es el uso de herramientas computacionales, en este PSAT. Para el desarrollo de estudios en la herramienta de Matlab se realizará el modelado de la red y sus características propias de cada elemento.

Se realizan, una vez terminado el modelado, tres diferentes simulaciones del sistema, una donde se observe el comportamiento de cuando la máquina entre se encuentre en estabilidad transitoria, la segunda simulación se obtendrá partir de una liberación de la falla temprana y la última donde la falla se mantenga o sea liberada después del *tiempo crítico* ya establecido con anterioridad y se compararán las tres curvas generadas y tener un mayor conocimiento de cómo realmente funciona el estudio de estabilidad transitoria.



3.4.1 MODELADO DE RED EN PSAT

Primero se procede a entrar a la ventana de PSAT donde se realiza el diseño de los modelos y se inserta un modelo de generador síncrono de la librería de máquinas.

De igual manera se agrega un modelo *generador PV* (Potencia-Voltaje) para poder resolver los estudios de flujo de potencia requeridos también para la solución de estudio de estabilidad, esto no significa que los estudios de flujo de potencia sean estrictamente necesarios para obtener los resultados de estabilidad, como ya se mostró con anterioridad.

Una vez colocados los elementos de *máquina síncrona* y *generador PV*, se les darán valor a los parámetros solicitados por los mismos. Para acceder a los parámetros de cada modelo se hace un doble clic sobre cada uno. En el apartado de parámetros del generador tiene opciones muy amplias para estudios más sofisticados, los que se serán introducidos son

$$[MVA, KV, Hz] = [2220 \ 24 \ 60]$$

Estos valores indican la potencia de la máquina, que es la ya obtenida de la suma de las cuatro máquinas de 555 MVA cada una, el voltaje de operación de 24 KV mencionadas en la descripción del problema y la frecuencia base de la máquina, en nuestro país la frecuencia de operación es de 60 Hz.

En el apartado de *Machine Dynamic Order* se seleccionará 2, que para estudios de estabilidad es lo óptimo.

Los apartados de *resistence ra* y *leakeage reactance xl*, puesto que son despreciables en el estudio se establecerá un valor de 0 para ambos. En estudios de estabilidad se utiliza la reactancia síncrona el eje directo $X'd$ con un valor dado de 0.3 p.u.

Otro dato importante es la *inerencia M* de la máquina, donde $M = 2H$, por lo tanto

$$M = 2H = 3.5 * 2 = 7.0$$

Las características siguientes de la máquina se dejan con valor 0, debido a que no son necesarias para el análisis. Cambiando al bloque *PV*, donde se describirá el tipo de bus

que es la barra siguiente al generador (en este caso, potencia activa-voltaje), se cambiarán los potencia y voltaje de la siguiente manera y la potencia activa.

$$[MVA, KV] = [2220 \ 24]$$

$$[p.u] = [0.9]$$

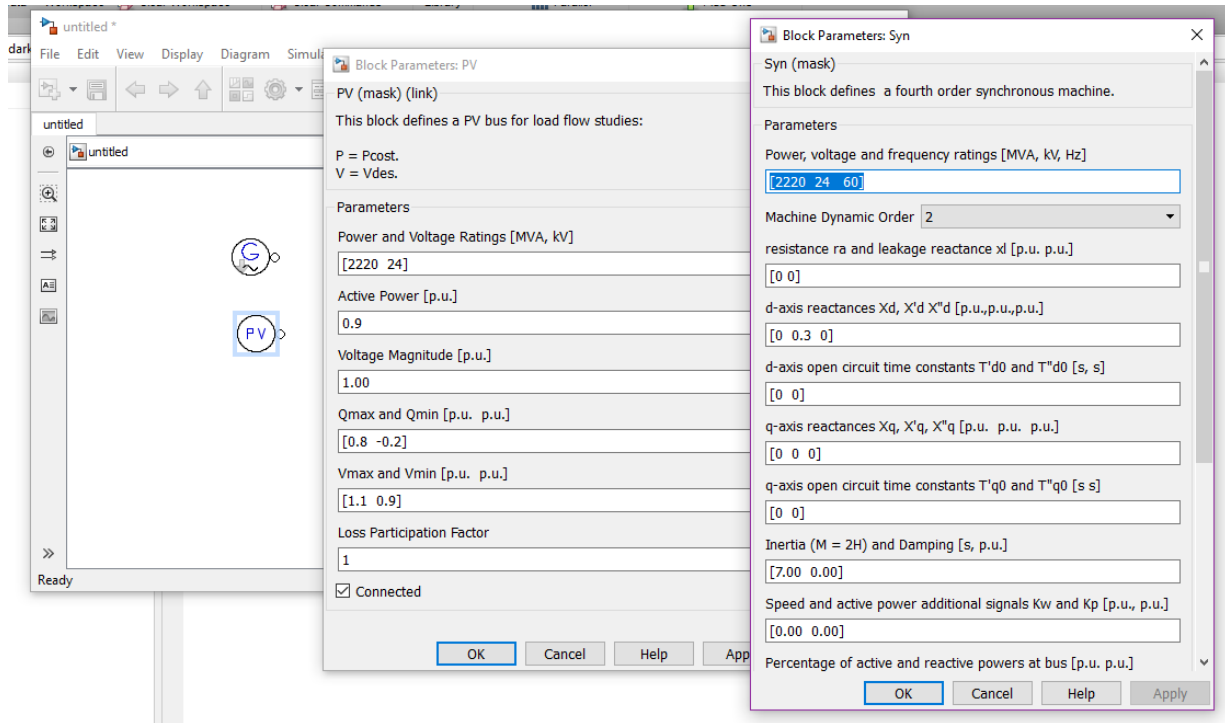


Figura 3.10 Modelado de generador y cambio de características en PSAT.

Ahora se agrega un bus, el transformador elevador de voltaje y el primer bus de HV. Los buses se agregarán de la librería de *connections* y el transformador elevador de la sección *power flow*, el bus que está después del generador se le asignará su voltaje de operación de 24 KV, para el transformador elevador ya que no se ha dado un dato específico de la potencia se establecerá como 2220 MVA de operación, el voltaje de operación será la misma del generador y la frecuencia del sistema.

$$[MVA, KV, Hz] = [2220 \ 24 \ 60]$$

La relación de transformación se representará de la siguiente manera

$$\left[\frac{KV_p}{KV_s} \right] = \left[\frac{24}{400} \right]$$

La resistencia del transformador será despreciable, y la reactancia del mismo es de 0.15 p.u de los valores dados en la descripción del problema. El bus de HV ubicado después del transformador, se le cambiará el número de salidas y entradas a tres y 1 respectivamente, el número de salidas es tres por las líneas de transmisión en paralelo y la falla que se aplicará en el mismo bus.

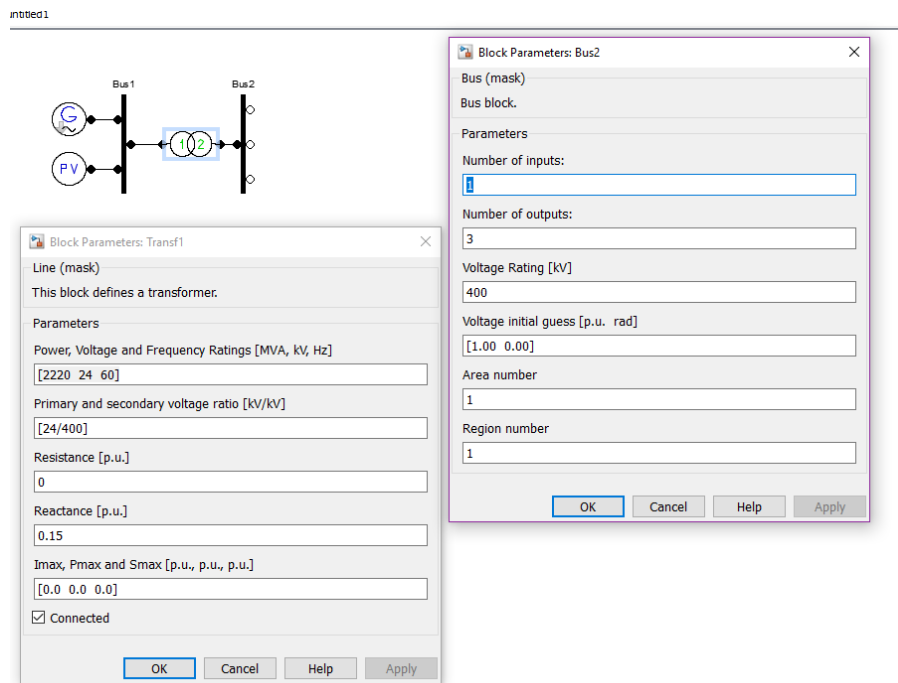


Figura 3.11 Modelado de buses de baja y alta tensión y transformador elevador de voltaje.

El modelado de las líneas de transmisión a utilizar será el modelo pi, que consta en una reactancia en serie con dos capacitancias en derivación o *shunt*, debido al efecto espejo. En este caso la susceptancia capacitiva es despreciable, la reactancia de las líneas se muestra en el diagrama para la X_{CCT1} la reactancia es 0.5 p. u, para X_{CCT2} la reactancia es 0.93 p.u. La potencia, el voltaje y la frecuencia de operación también deben ser incluidas en los parámetros de ambas líneas, corresponden a los valores de potencia y frecuencia del sistema como los de la máquina, el voltaje corresponde al lado de HV.

$$[MVA, KV, Hz] = [2220 \ 400 \ 60]$$

Antes de que la línea X_{CCT2} se agregue, se debe colocar un dispositivo de liberación *breaker* en serie, el cual fija el tiempo de liberación de la falla, sus parámetros son potencia voltaje y frecuencia de operación son los mismo que los de la línea en cuestión. El tiempo de liberación de la falla se establece en 1.087 segundos como primera intervención.

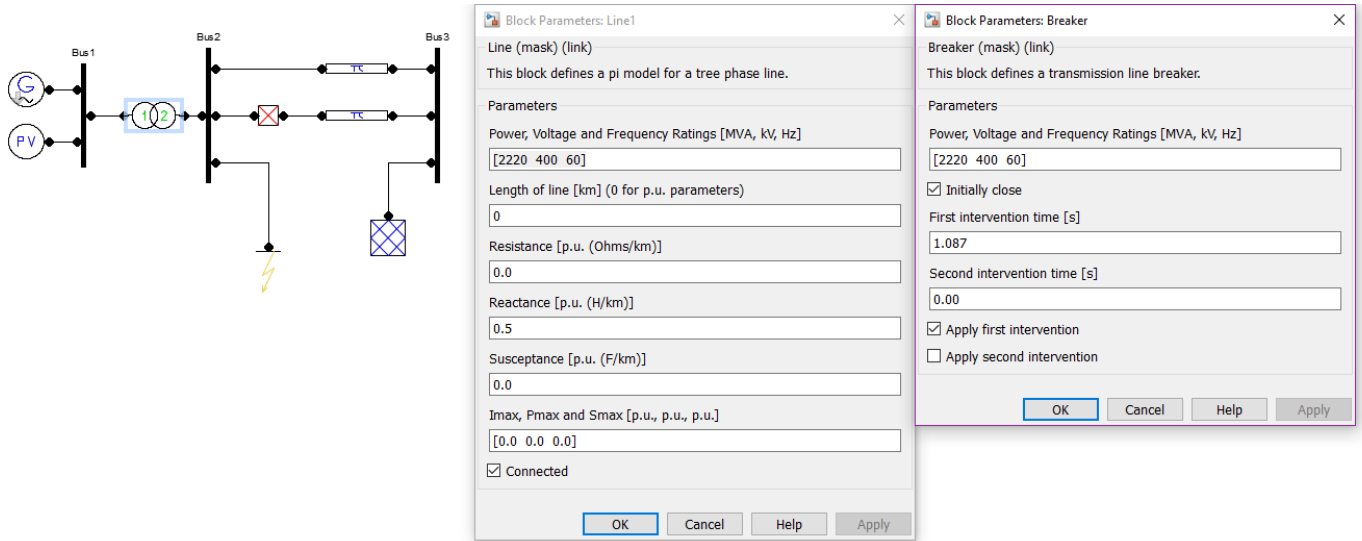


Figura 3.12 Parámetros de línea de transmisión Xcc2 y breaker.

Los modelos siguientes son la falla aplicada en el denominado bus dos, una barra infinita, donde se conecta el sistema a la red, y un *slack bus*, que servirá para parametrizar al bus tres como referencia para el sistema.

La falla tendrá los mismos parámetros de potencia, voltaje y frecuencia de operación que los del resto del sistema de lado de alto voltaje. El inicio de la falla se establece en un segundo. El tiempo de liberación de la falla se establece en 1.087 segundos, es el tiempo que en la falla deja de ser aplicada. El bus tres se establece con tres entradas y cero salidas, dos de ellas corresponden a la parte final de las líneas de transmisión la tercera salida corresponde a el bloque de *slack bus*, para referenciar el sistema. El voltaje del bus tres es 400 KV. En el bloque de *slack bus*, solicita parámetros de potencia y

voltaje de operación con 2220 MVA y 400 KV respectivamente, la magnitud del voltaje del bloque es

$$V_B = 0.90081 pu$$

Que es la magnitud del voltaje dada para el bus infinito en la descripción del problema. El ángulo de referencia es 0 radianes, los parámetros restantes se dejan por defecto.

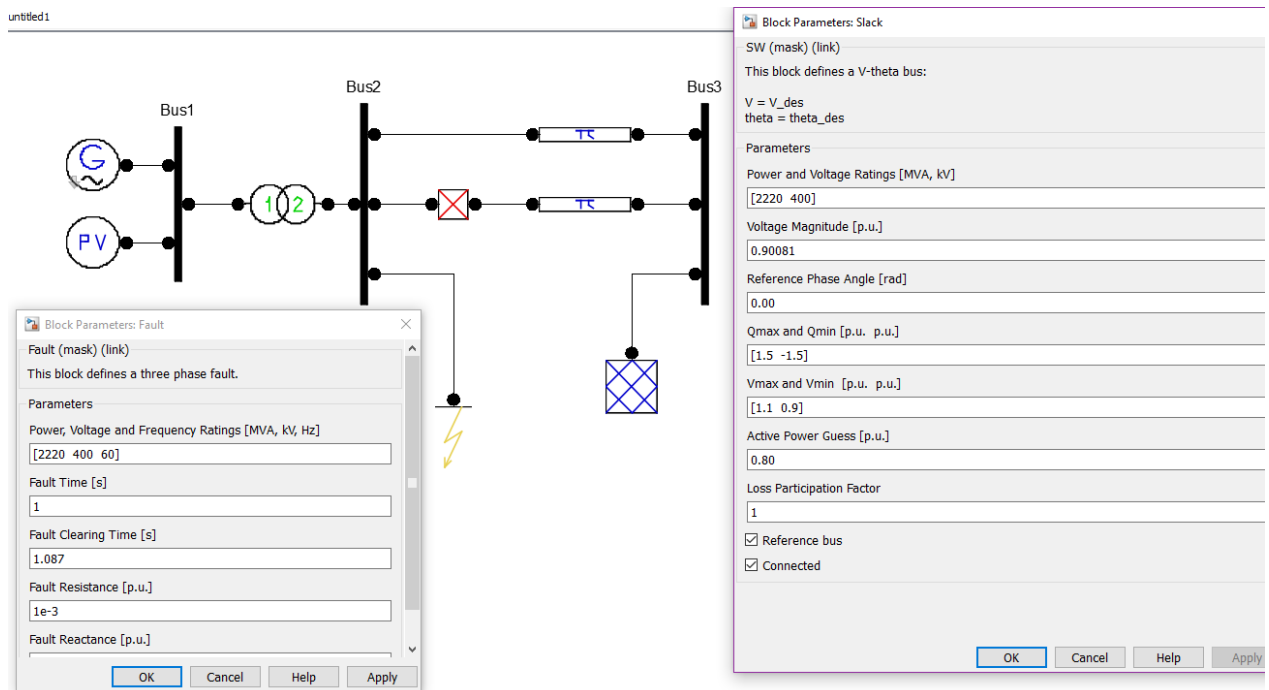


Figura 3.13 Parámetros de falla y bus de referencia.

3.4.2 SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE ESTABILIDAD

Los estudios de estabilidad en PSAT facilitan los métodos de cálculo y obtención de valores en un rango de tiempo determinado, como ya se ha mencionado antes. En este caso, se realizarán las simulaciones correspondientes que resultará en tres gráficas con mismos tiempos de simulación, diferentes tiempos de apertura o liberación de la falla, y se graficarán para comparar y analizar el comportamiento en los diferentes tiempos.



Para iniciar con las simulaciones, se debe cargar el archivo .mdl en la pantalla principal de PSAT del modelo creado anteriormente. Una vez agregado el modelo de la red se cambian algunas opciones sobre la simulación, los parámetros de los intervalos de tiempo también pueden ser cambiados en las opciones generales del programa.

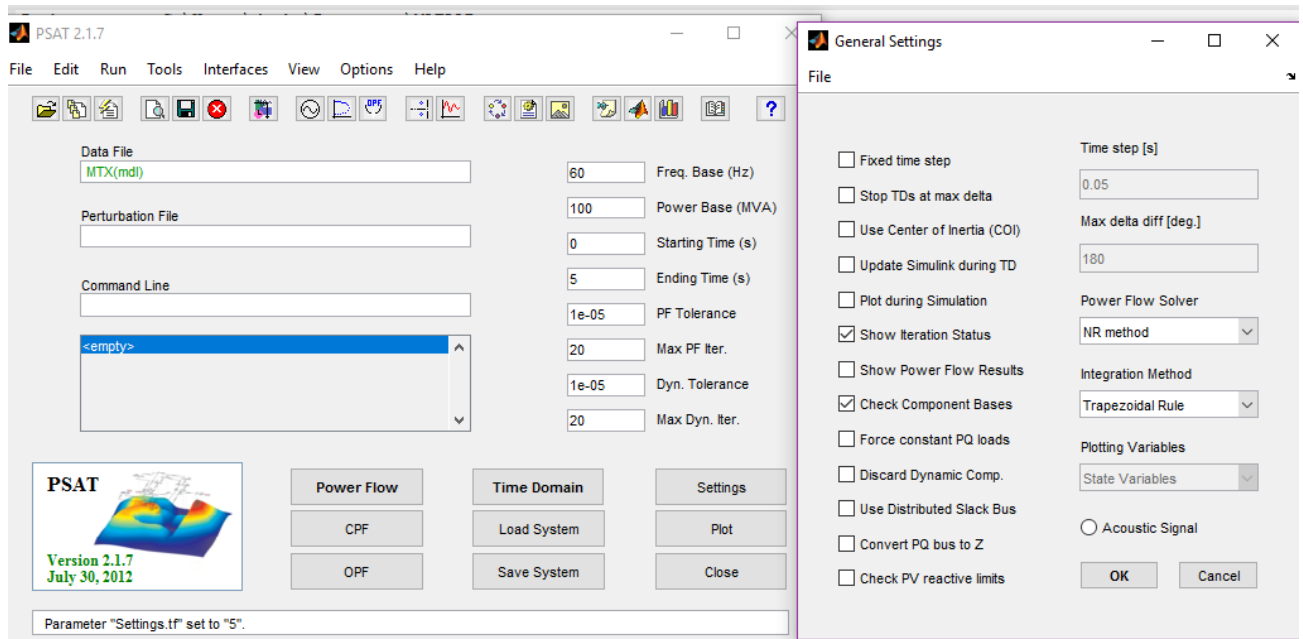


Figura 3.14 carga de modelo y cambio de parámetros.

Para el análisis se cambiará la frecuencia base a 60 Hz en la pantalla de inicio. El tiempo de simulación se establece en 5 segundos, en el apartado de opciones generales los parámetros no son modificados. Se procede a iniciar la simulación en el botón de *time domain*. Una vez terminada la simulación en la parte inferior de la ventana indicará que esta ha terminado. Se procede ir a la pantalla de Plot, donde se encuentran todos los resultados obtenidos en la simulación.

Se realiza el mismo procedimiento con cambio en el tiempo de liberación con tiempos mayores y menores a 1.087 segundos. Para tener un manejo de los datos, se exportan los archivos como fichero de Matlab (.m), ubicado en la parte inferior del botón plot.

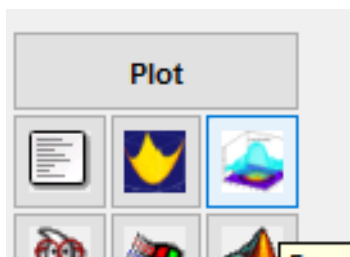


Figura 3.15 Botón para exportar datos a fichero (.m).

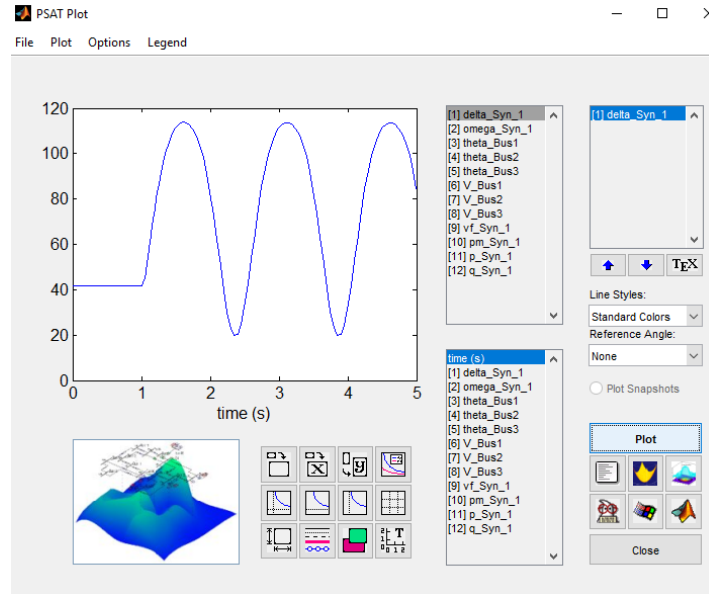


Figura 3.16 Gráfica ángulo de carga-tiempo para liberación en 1.087 segundos.

Una vez exportado todos los datos obtenidos de los tres diferentes tiempos de liberación de la falla. Los archivos generados se guardan en la ruta donde se encuentren los archivos de simulación para PSAT. Para observar poder modificar las gráficas se utilizará Matlab.

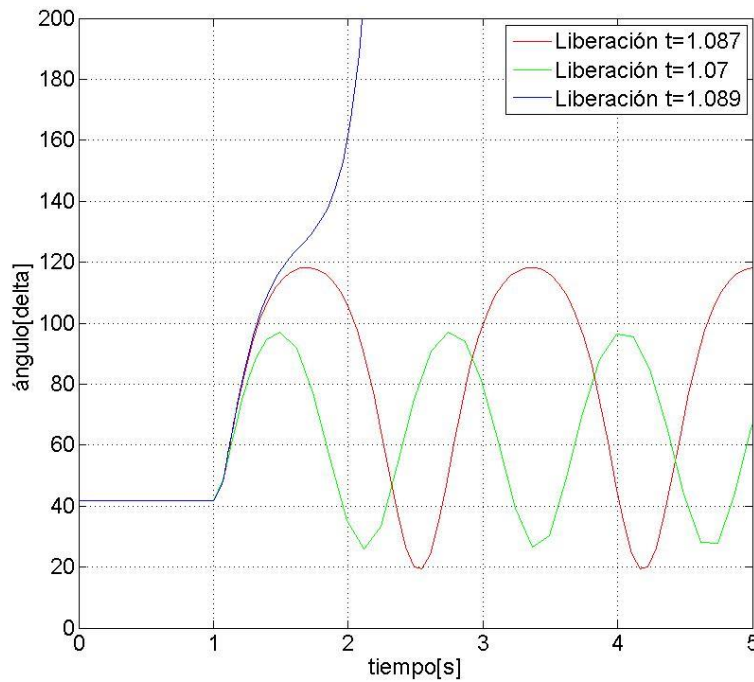


Figura 3.17 Gráficas ángulo de carga-tiempo en diferentes tiempos de liberación.



En la comparación de gráficas en la figura 3.17 se puede observar lo sensible que es el sistema al tiempo de liberación. Se observa que en el tiempo 1.087 el ángulo de carga máximo obtenido es de 118 grados eléctricos, en el instante de liberación, la máquina es capaz de recuperar su estabilidad y el ángulo interno de la máquina comienza su descenso para para entrar en estado transitoriamente estable. Un tiempo de liberación considerablemente menor resulta en la disminución del ángulo de carga máximo, para una liberación de 1.07 segundos. En un tiempo de liberación de 1.089 segundos, la máquina pierda completamente la estabilidad, lo que resulta en el incremento acelerado de la máquina con una diferencia de 0.002 segundos en el tiempo crítico de liberación.



CAPÍTULO IV

SOLUCIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO MULTIMÁQUINAS Y SOLUCIÓN DEL SISTEMA.

“Para las personas creyentes, Dios está al principio. Para los científicos está el final de todas sus reflexiones.”

-Max Planck -

4.1 SOLUCIÓN AL PROBLEMA MULTIMÁQUINA

El análisis del sistema multimáquina es en desarrollo similar al sistema de una sola. Como se mencionó antes, el criterio de áreas iguales no puede ser utilizado. Aunque el fenómeno físico que se observa en dos máquinas es el mismo que en el caso de multimáquinas, la complejidad de los cálculos numéricos se incrementa con el número de máquinas consideradas. Cuando un sistema de múltiples máquinas opera bajo condiciones electromecánicas transitorias, ocurren oscilaciones entre máquinas a través del sistema de transmisión que conecta a las máquinas. Si cualquiera de las máquinas se pudiera considerar actuando como única fuente de oscilación, enviaría al sistema interconectado una oscilación electromecánica determinada por su inercia.

Los estudios de estabilidad en primera oscilación (1 segundo) para sistemas multimáquina aumenta la complejidad del sistema, por el aumento en el número de barras, líneas y cargas en el sistema. Los pasos para la resolución del sistema, son en su mayoría las misma que en sistema de una solo máquina.



Para sistemas multimáquinas la reducción del sistema resulta en una matriz de admitancias, que es una manera de representar las interacciones entre líneas, barras y cargas de manera numérica.

En caso de que el sistema no cuente con los valores de voltaje de en barras se realiza previamente un estudio de flujos de potencia para obtener los datos necesarios, que no solo van de voltaje, sino que incluyen potencia activa y reactiva generada en cada punto. (Kundur, 1994) (William D. Stevenson, 2002)

4.1.2 DESARROLLO DEL PROBLEMA MULTIMÁQUINA

Un sistema de transmisión a 60 Hz , 230 kV , mostrado en la figura, tiene dos generadores y una barra infinita. Los datos de los transformadores y líneas se muestran en las tablas. Una falla trifásica ocurre en la línea 4-3 cerca de la barra 4. La falla se libera al quitar la línea 4-3. La falla permanece en el sistema 0.225 segundos.

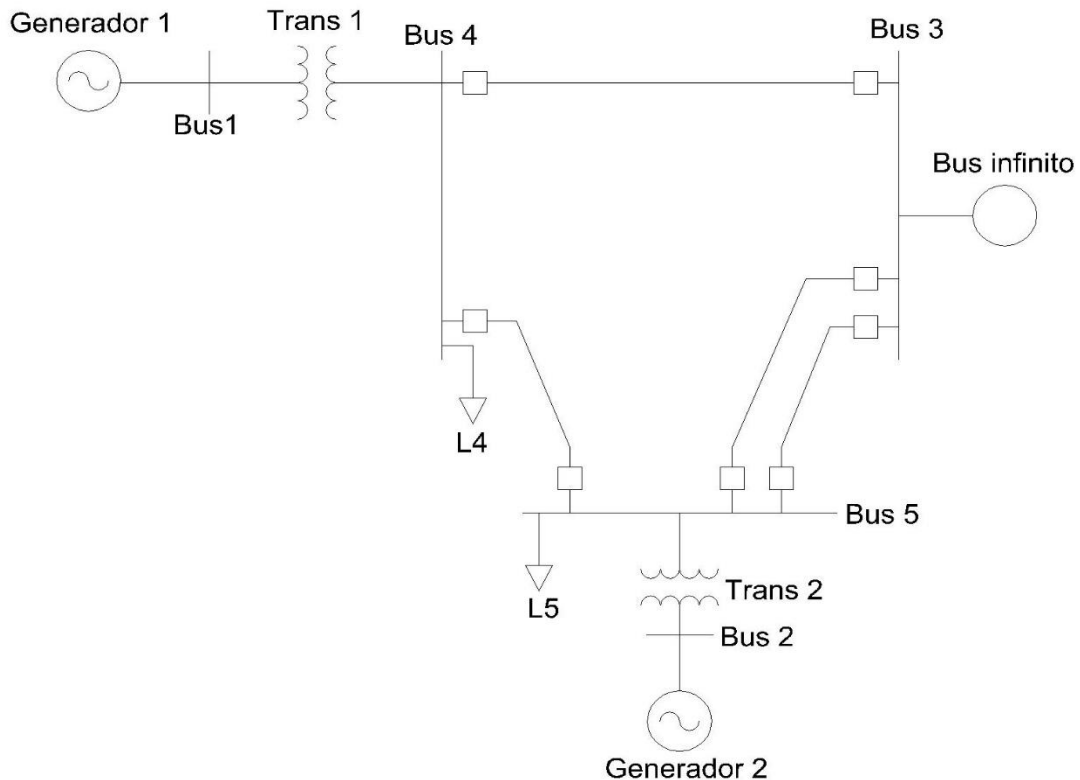


Figura 4.1 Modelo de análisis para el sistema multimáquinas



Generador 1: 400 MVA, 20 kV, $X'd=0.067 p.u$ H=11.2 MJ/MVA

Generador 2: 250 MVA, 18 kV, $X'd=0.100 p.u$ H= 8.0 MJ/MVA

Tabla 4.1 Datos de líneas de transmisión y transformadores.

Bus a Bus	Impedancia Z		Suceptancia B
	R	X	
Trans 1	-	0.022	-
Trans 2	-	0.040	-
Línea 3-4	0.007	0.040	0.082
Línea 3-5(1)	0.008	0.047	0.098
Línea 3-5(2)	0.008	0.047	0.098
Línea 4-5	0.018	0.110	0.226

Tabla 4.2 Valores de voltaje-potencia en buses y capacidad de cargas.

Bus	Voltaje	Ángulo(rad)	Generación		Carga	
			P	Q	P	Q
1	1.030	-	3.5	0.712	-	-
2	1.020	-	1.85	0.298	-	-
3	1.000	0.00	-	-	-	-
4	-	-	-	-	1.00	0.44
5	-	-	-	-	0.50	0.16

1) Obtención de los datos de barra

Para dar solución al problema de estabilidad, es necesario tener los datos de voltajes y potencia de los buses. Se necesita para obtener los datos restantes realizar estudios de flujo de potencia, en los estudios no es necesaria la inclusión de los valores de reactancias de los generadores, así como tampoco las cargas conectadas a las barras.



El método de resolución para flujos de potencia que se utiliza será Gauss-Seidel, para esto es necesario el reordenamiento de las barras, el bus infinito debe ser la barra 1 (compensación), que hará converger el sistema de mejor manera con un número de iteraciones menor.

El orden que se asume para cada barra temporalmente es:

Tabla 4.3 Reordenamiento de barras para estudios de flujos de potencia.

# Barra Actual	# Barra Temporal
3	1
4	2
5	3
1	4
2	5

Para la solución de método de los estudios de flujos de potencia en sistemas multimáquina es necesario desarrollar una matriz de admitancias para el desarrollo de las ecuaciones de oscilación para el sistema en estado de prefalla. Esta matriz representa las interacciones que tienen los elementos del sistema con cada bus, el número de buses será la dimensión de la misma.

$$Y = \begin{bmatrix} 11.2842 - 65.4732j & -4.2449 + 24.257125j & -7.039155 + 41.35508j & 0 & 0 \\ -4.2449 + 24.257125j & 5.69 - 78.411502j & -1.44808 + 8.8583j & 45.4545 & 0 \\ -7.039155 + 41.35508j & -1.44808 + 8.8583j & 8.4879690574997868 & 0 & 25j \\ 0 & 45.4545 & 0 & -45.4545 & 0 \\ 0 & 0 & 25j & 0 & -25j \end{bmatrix}$$

Figura 4.2 Matriz de admitancias del sistema en estado estable, representa como está conectado la red entre sí.

Una vez realizada la matriz, se utilizará un script en Matlab para la resolución por este método. Se introducen los valores de la matriz, y voltajes de barra conocidos. Se considerará un inicio plano para los voltajes desconocidos, lo que equivalen a tener la misma magnitud y ángulo que el bus infinito.

Se carga Matlab y se corre el programa, externo a PSAT, y se corre el modelo de la red para obtener los valores.



```

9 - u = fopen(filename,'w'); %Abre el archivo
10
11
12
13
14 %MATRIZ DE LA ADMITANCIA DE BARRAS
15 Y=[11.2842-65.4732i -4.2449+24.257125i -7.039155+41.35503i 0 0
16 -4.2449+24.257125i 5.693805-78.4115022i -1.44808+8.85383i 45.4545i 0
17 -7.039155+41.35503i -1.44808+8.85383i 8.48796905-74.997868i 0 25i
18 0 45.4545i 0 -45.4545i 0
19 0 0 25i 0 -25i]
20
21
22 %Tabla 9-3
23 % barra PG QG PD QD V,pu
24 Dat=[ 1 ne ne ne ne 1.00+0j
25 2 0 0 1.0 0.44 1.00+0j
26 3 0 0 0.5 0.16 1.00+0j
27 4 3.5 ne 0 0 1.03+0j
28 5 1.85 ne 0 0 1.02+0j]
29 %Voltajes en las barras iniciales
30 V0=[ 1+0j 1.02+0j 1.00+0j 1.03+0j 1.02+0j]
31
32 %PPROGRAM2=PG2-PD2
33 PPROGRAM2=Dat(2,2)-Dat(2,4)
34 %QPROGRAM2=QG2-QD2
35 QPROGRAM2=Dat(2,3)-Dat(2,5)
36
37 %Inicio de la Iteración 1
38 V1(1)=V0(1);
39
40 V2(1)=(1/Y(2,2))* ( ((PPROG2-(QPROGRAM2)*j)/conj(V0(2))) - (Y(2,1)*V1(1) +Y(2,3)*V0(3)+Y(2,4)*V0(4)+Y(2,5)*V0(5))

```

Figura 4.3 Introducción de datos en programa de Matlab.

El programa genera un archivo con el nombre que se solicite, en este caso 'test.m', se abre el archivo desde Matlab directamente.

3	+1.000000	+0.000000	+1.014572	+3.756110	+1.011295	+2.095359	+1.030000	+7.953237	+1.020000	+6.208093
4	+1.000000	+0.000000	+1.019044	+4.329010	+1.010985	+2.217199	+1.030000	+8.528763	+1.020000	+6.331215
5	+1.000000	+0.000000	+1.016539	+4.546277	+1.010699	+2.248196	+1.030000	+8.760316	+1.020000	+6.364397
6	+1.000000	+0.000000	+1.018033	+4.633115	+1.011145	+2.265025	+1.030000	+8.843423	+1.020000	+6.379629
7	+1.000000	+0.000000	+1.017259	+4.662885	+1.010732	+2.268161	+1.030000	+8.877092	+1.020000	+6.384560
8	+1.000000	+0.000000	+1.017650	+4.675780	+1.011050	+2.271510	+1.030000	+8.888706	+1.020000	+6.386646
9	+1.000000	+0.000000	+1.017481	+4.679971	+1.010829	+2.271412	+1.030000	+8.893695	+1.020000	+6.387465
10	+1.000000	+0.000000	+1.017541	+4.681780	+1.010972	+2.272189	+1.030000	+8.895303	+1.020000	+6.387666
11	+1.000000	+0.000000	+1.017532	+4.682457	+1.010885	+2.272027	+1.030000	+8.896033	+1.020000	+6.387859
12	+1.000000	+0.000000	+1.017522	+4.682645	+1.010935	+2.272205	+1.030000	+8.896270	+1.020000	+6.387836
13	+1.000000	+0.000000	+1.017537	+4.682798	+1.010908	+2.272157	+1.030000	+8.896363	+1.020000	+6.387896
14	+1.000000	+0.000000	+1.017523	+4.682786	+1.010922	+2.272187	+1.030000	+8.896408	+1.020000	+6.387873
15	+1.000000	+0.000000	+1.017534	+4.682834	+1.010916	+2.272184	+1.030000	+8.896413	+1.020000	+6.387893
16	+1.000000	+0.000000	+1.017527	+4.682816	+1.010918	+2.272183	+1.030000	+8.896426	+1.020000	+6.387884
17	+1.000000	+0.000000	+1.017531	+4.682832	+1.010917	+2.272187	+1.030000	+8.896422	+1.020000	+6.387890
18	+1.000000	+0.000000	+1.017528	+4.682825	+1.010917	+2.272183	+1.030000	+8.896426	+1.020000	+6.387887
19	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682830	+1.010918	+2.272187	+1.030000	+8.896424	+1.020000	+6.387888
20	+1.000000	+0.000000	+1.017529	+4.682827	+1.010917	+2.272184	+1.030000	+8.896426	+1.020000	+6.387888
21	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682829	+1.010917	+2.272186	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
22	+1.000000	+0.000000	+1.017529	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896426	+1.020000	+6.387888
23	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
24	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
25	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888

Figura 4.5 iteraciones iniciales para solución de flujos de potencia con el método Gauss-Seidel.



26	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
27	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
28	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
29	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
30	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
31	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
32	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
33	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
34	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
35	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
36	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
37	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
38	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
39	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
40	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
41	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
42	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
43	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
44	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
45	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
46	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
47	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
48	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
49	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888
50	+1.000000	+0.000000	+1.017530	+4.682828	+1.010917	+2.272185	+1.030000	+8.896425	+1.020000	+6.387888

Figura 4.6 Iteraciones finales para solución de flujos de potencia con el método Gauss-Seidel.

Se observa que el sistema converge en la iteración 23, a partir de ella los valores no hacen cambio en magnitud y ángulo, estos representan los voltajes de cada barra con la numeración en diferente posición para este estudio.

Tabla 4.4 Valores de voltaje de las barras, necesarios para estudios de estabilidad.

# Barra Actual	# Barra Temporal	Voltaje
3	1	1.0 ∠0.00°
4	2	1.0175 ∠4.6828°
5	3	1.01091 ∠2.2721°
1	4	1.03 ∠8.89°
2	5	1.02 ∠6.387°

2) Obtención de voltaje interno y ángulo de carga de los generadores.

Para obtener las ecuaciones de oscilación se necesitan los ángulos de carga de las máquinas en t=0 segundos, o estado estable.



Primero se determina la corriente de cada máquina, con las potencias entregadas por cada generador y el voltaje en terminales, posterior a eso multiplica por las reactancias síncronas propias de las máquinas.

$$I_1 = \frac{P_1 + jQ_1}{V_1} = \frac{3.50 - 0.712j}{1.03 \angle -8.89^\circ} = 3.4975 \angle -2.6086^\circ$$

$$I_2 = \frac{P_2 + jQ_2}{V_2} = \frac{1.85 - 0.298j}{1.02 \angle -6.387^\circ} = 1.837 \angle -2.71^\circ$$

Se sustituye en la ecuación (enumerar ecuación #).

$$E_1 = 1.03 \angle 8.89^\circ + 0.067j * (3.4975 \angle -2.6086^\circ) = 1.1 \angle 20.82^\circ$$

$$E_2 = 1.02 \angle 6.387^\circ + 0.1j * (1.837 \angle -2.71^\circ) = 1.065 \angle 16.19^\circ$$

3) Obtención de matriz aumentada

La matriz aumentada representa la interacción que tiene el sistema, a diferencia de la matriz realizada en el paso 1 esta tiene incluida los valores de reactancia síncrona de la máquina, transformadores y susceptancia de la línea. El método utilizado es inspección de red, donde determina el valor del elemento de la matriz, sumando las componentes que coinciden en un bus.

$$Y = \begin{bmatrix} -11.236j & 0 & 0 & 11.236j & 0 \\ 0 & -7.1429j & 0 & 0 & 7.1429j \\ 0 & 0 & 11.2841 - 65.473j & 4.2450 + 24.257j & -7.039155 + 41.3550j \\ 11.236j & 45.4545 & 4.2450 + 24.257j & 6.6588 - 44.6175j & -1.4488 + 8.8538j \\ 0 & 7.1429j & -7.039155 + 41.3550j & -1.4488 + 8.8538j & 8.9772 - 57.2972j \end{bmatrix}$$

Figura 4.7 Matriz de aumentada para estudios de estabilidad.

Con la matriz de la figura 4.7 se obtienen las ecuaciones de oscilación para los estados estables de las máquinas, así como también para los demás estados de falla.



Para obtener la potencia en los de los generadores se tiene

$$P_{e1} = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{12}| \cos(\delta_{12} - \theta_{12}) + |E'_1||E'_3||Y_{13}| \cos(\delta_{13} - \theta_{13})$$

$$P_{e2} = |E'_2|^2 G_{22} + |E'_2||E'_1||Y_{21}| \cos(\delta_{21} - \theta_{21}) + |E'_2||E'_3||Y_{23}| \cos(\delta_{23} - \theta_{23})$$

Donde los elementos G_{an} , son valores obtenidos de la matriz aumentada y los valores de δ y θ , son valores obtenidos de la resta del ángulo de carga con el ángulo del bus de referencia.

4) Reducción de Kron para falla y postfalla

- Estado falla

La reducción de Kron es un método para obtener la matriz equivalente que represente las conexiones existentes en el sistema de manera reducida. La falla es aplicada en el bus número cuatro, lo que implica en la eliminación del reglón y columna cuatro para ambos casos directamente resultando en una matriz 4x4.

$$Y = \begin{bmatrix} -11.2360j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7.1429j & 0 & 7.1429j \\ 0 & 0 & 11.2841 - 65.473j & -7.039155 + 41.35503j \\ 0 & 7.1429j & -7.039155 + 41.35503j & 8.9772 - 57.2972j \end{bmatrix}$$

Figura 4.8 Matriz 4x4 resultado de la falla aplicada en el bus 4.

Por método de reducción de Kron se obtiene la matriz reducida de la matriz de falla para obtener el sistema equivalente para la red en ese estado. Es necesario la reducción del sistema para igualar al número de generadores existentes en él.

$$Y_{falla} = \begin{bmatrix} -11.2360j & 0 & 0 \\ 0 & 0.1362 - 6.2737j & -0.0681 + 5.1661j \\ 0 & -0.0681 + 5.1661j & 5.7986 - 35.6299j \end{bmatrix}$$

Figura 4.9 Matriz 3x3 resultado de la reducción por método Kron.



- **Estado postfalla**

Para estado post falla el sistema abre el interruptor para liberar la línea afectada 4-3, los elementos correspondientes Y_{34} y Y_{43} cambian su valor a 0 así como eliminar los efectos capacitivos de los elementos Y_{33} y Y_{44} en la matriz de admitancias aumentada. Una vez aplicada la reducción de Kron se obtiene la siguiente matriz.

$$Y_{postfalla} = \begin{bmatrix} 0.750 - 4.6889 j & 0.0694 + 0.6443 j & -0.2333 + 3.7988 j \\ 0.0694 + 0.6443 j & 0.1426 - 6.2104 j & -0.0936 + 5.5396 j \\ -0.2333 + 3.7988 j & -0.0936 + 5.5396 j & 1.0382 - 9.2770 j \end{bmatrix}$$

Figura 4.10 Matriz 3x3 resultado de la reducción por método Kron para estado de liberación de falla.

5) Obtención de ecuaciones de oscilación para estados de falla y postfalla.

Con las ecuaciones ya vistas en el apartado (3), se obtienen la potencia eléctrica entregada por cada generador para poder determinar la ecuación de oscilación que represente el comportamiento del sistema.

- **Falla**

En estado de falla la conexión del bus 4 se pierde del resto del sistema, representado en la matriz de admitancias del estado de falla, por lo que la potencia suministrada por el generador 1 es nula.

$$P_{e1} = 0$$

$$P_{e2} = 0.1545 + 5.5023 \sin(\delta_2 - 0.755)$$

- **Postfalla**

Los valores solicitados para las potencias eléctricas entregadas una vez liberada la falla se toman de la matriz de admitancias en estado postfalla.



$$P_{e1} = 1.0480 + 4.1787 \sin(\delta_1 - 3.52)$$

$$P_{e2} = 0.1818 + 5.8997 \sin(\delta_2 - 0.968)$$

Las ecuaciones de oscilación del sistema se desarrollan, como se puede recordar

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Para la máquina 2 en estado de falla la ecuación de oscilación está dada por

$$\text{Máq(2)} \quad \frac{8}{180 * 60} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 1.85 - (0.1545 + 5.5023 \sin(\delta_2 - 0.755))$$

Para el estado de postfalla

$$\text{Máq(1)} \quad \frac{11.2}{180 * 60} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 3.5 - (1.0480 + 4.1787 \sin(\delta_1 - 3.52))$$

$$\text{Máq(2)} \quad \frac{8}{180 * 60} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 1.85 - (0.1818 + 5.8997 \sin(\delta_2 - 0.968))$$

6) Solución de ecuaciones diferenciales por método paso a paso

La solución del método se realiza con un script de Matlab para la solución de los sistemas multimáquinas con el método paso a paso. En el programa se deben ingresar los parámetros para cada máquina. Se establece para la máquina un tiempo de liberación de 0.225 segundos después de aplicada la falla.

```
Pm=3.5;

H=11.2;
dt=0.05; % paso de integraciOn
deltas=0;
delta=20.82; % Angulo inicial del rotor
t=0;
ti=0
tf=1.05; % tiempo final de estudio
n=(tf-t)/dt;
gamma=0
tlf=0.225 % tiempo de liberaciOn de la falla
```

Figura 4.11 Introducción de datos en el script de Matlab.



Tabla 4.5 Valores de ángulo de carga de generadores 1 y 2 en un tiempo de liberación $t=0.225$ segundos.

Tiempo [segundos]	δ máquina 1	δ máquina 2
0	20.28	16.19
0.05	24.4988	16.58
1	37.155	17.6281
0.15	58.2488	19.0085
0.2	87.78	20.2946
0.25	125.7488	21.092
0.30	179.894	20.669
0.35	242.3314	19.1638
0.40	303.8061	17.071
0.45	364.2369	15.0857
0.50	432.4488	13.8739
0.55	517.7158	13.845
0.60	615.0227	15.0088
0.65	710.4314	16.972
0.70	811.2139	19.0757
0.75	929.7168	20.621
0.80	1051.4276	21.0998
0.85	1175.4415	20.3556
0.90	1317.1782	18.6318
0.95	1458.4557	16.4964
1	1609.9845	14.6606

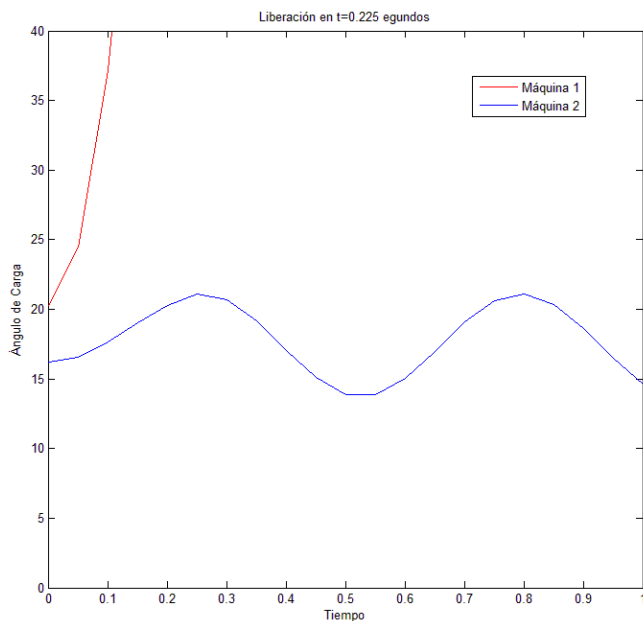


Figura 4.13 Gráfica de comportamiento de máquinas de tabla 4.

Se puede observar en los valores de ángulo de la máquina 1 como tiene a perder estabilidad en primeros instantes después de la liberación de la falla, debido a la cercanía de esta al punto de falla. A diferencia de la máquina 2, se puede ver como la perturbación apenas si es percibida, lo que se traduce en un pequeño cambio en el ángulo máximo alcanzado.

4.2 MODELADO DE SISTEMA MULTIMÁQUINA EN PSAT

El modelado de la red multimáquinas se realiza de la misma manera que el método para una sola. En este caso se debe realizar estudio de flujos de potencia previamente al estudio de estabilidad para encontrar los voltajes existentes en las barras restantes, así como también los ángulos de carga.

Primero se introducirán los elementos de la *máquina síncrona 1*, como se ha hecho anteriormente, y el elemento *generador PV* y se cambian los valores de operación

$$[MVA, KV, Hz] = [400 \ 20 \ 60]$$

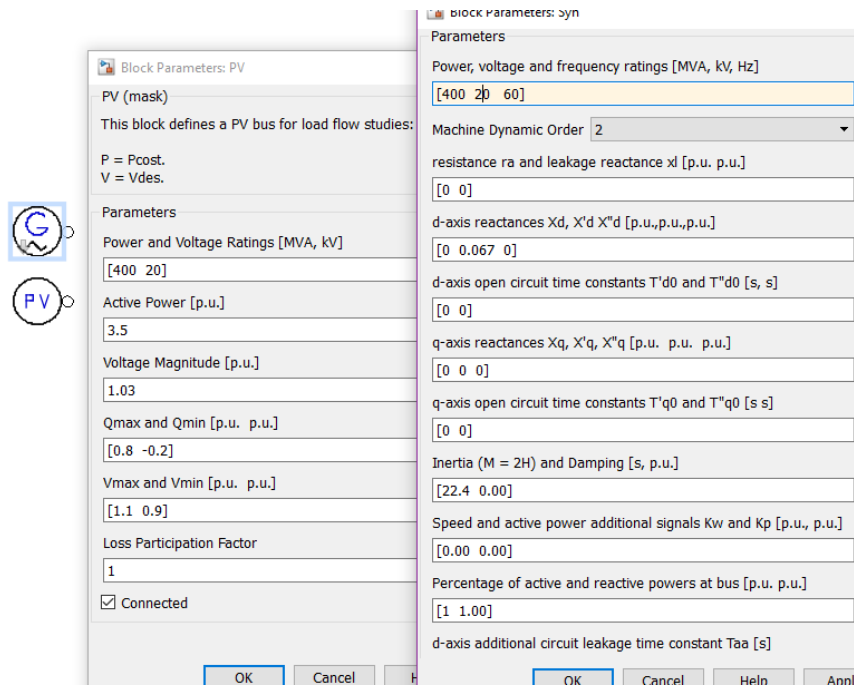


Figura 4.13 Introducción de parámetros para máquina 1 y elementos PV para flujos de potencia.

Para el *generador 2* se colocan los mismos bloques, cambiando la reactancia síncrona y los valores de operación de la máquina.

$$X'_d = 0.1 \text{ p.u}$$

$$[MVA, KV, Hz] = [250 \ 18 \ 60]$$

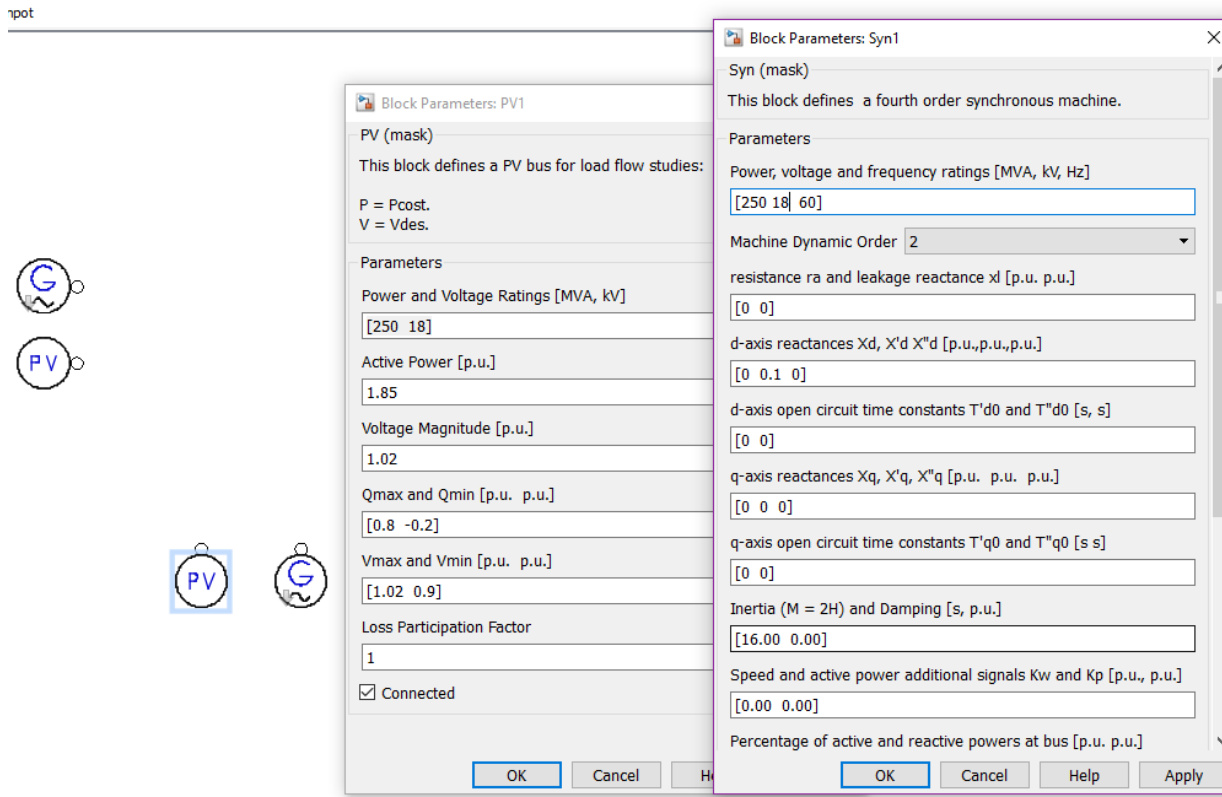


Figura 4.14 Modelo de generador 2 y bloque PV para flujos de potencia.

A continuación, se modela el elemento que representa al *bus infinito*, con un bus de referencia, denominado *slack bus*, se definen los parámetros del bloque con la potencia base, se establece la potencia base y el voltaje de operación, así como también la magnitud del voltaje de referencia en *p.u* y el ángulo del mismo.

$$[MVA, KV] = [100 \ 230]$$

$$\text{Magnitud de voltaje}[p.u] = [1.0]$$

$$\text{Ángulo de referencia}[rad] = [0.0]$$

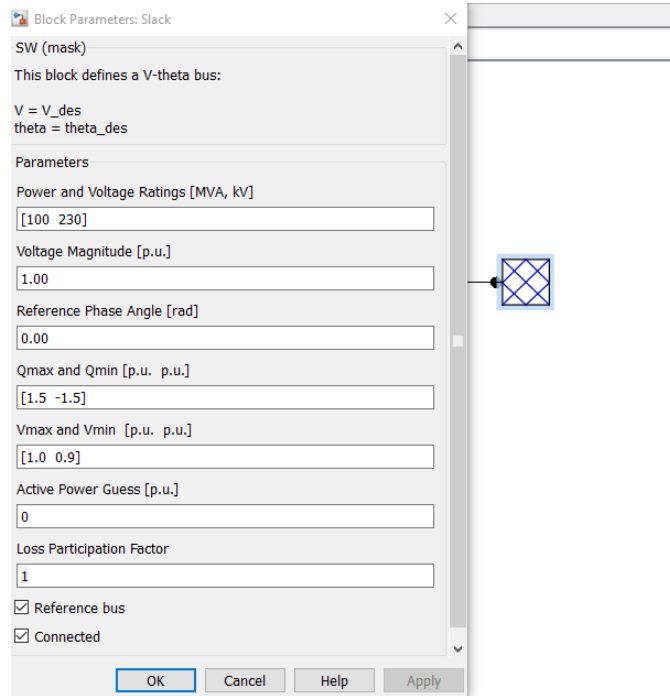


Figura 4.15 Modelado de slack bus, para referenciar el sistema.

Siguiente, se modelan los buses del sistema, los cinco existentes, y se aplican los voltajes de operación, así como también los ángulos de referencia y la magnitud del voltaje.

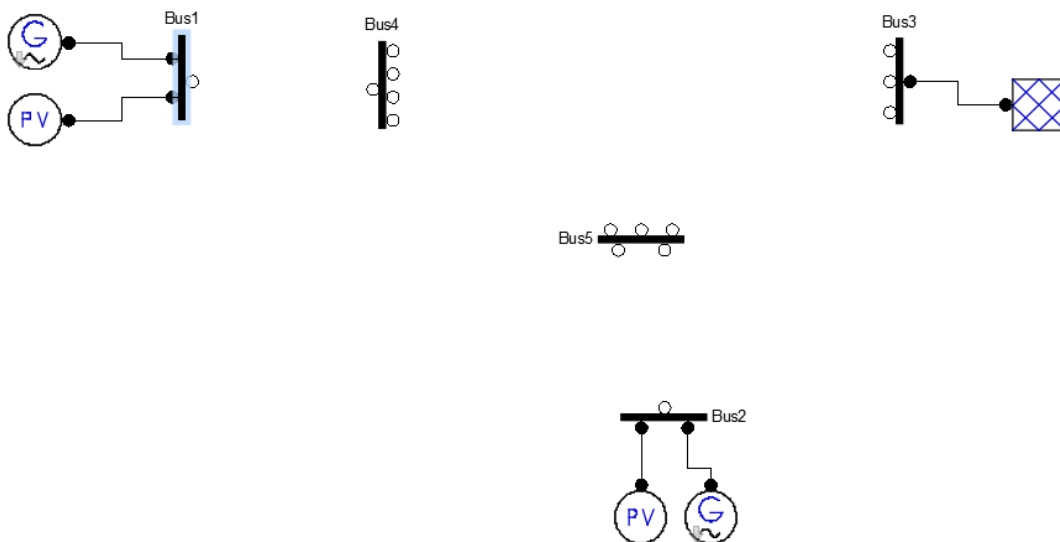


Figura 4.16 Colocación de buses del sistema e interconexión con los generadores.

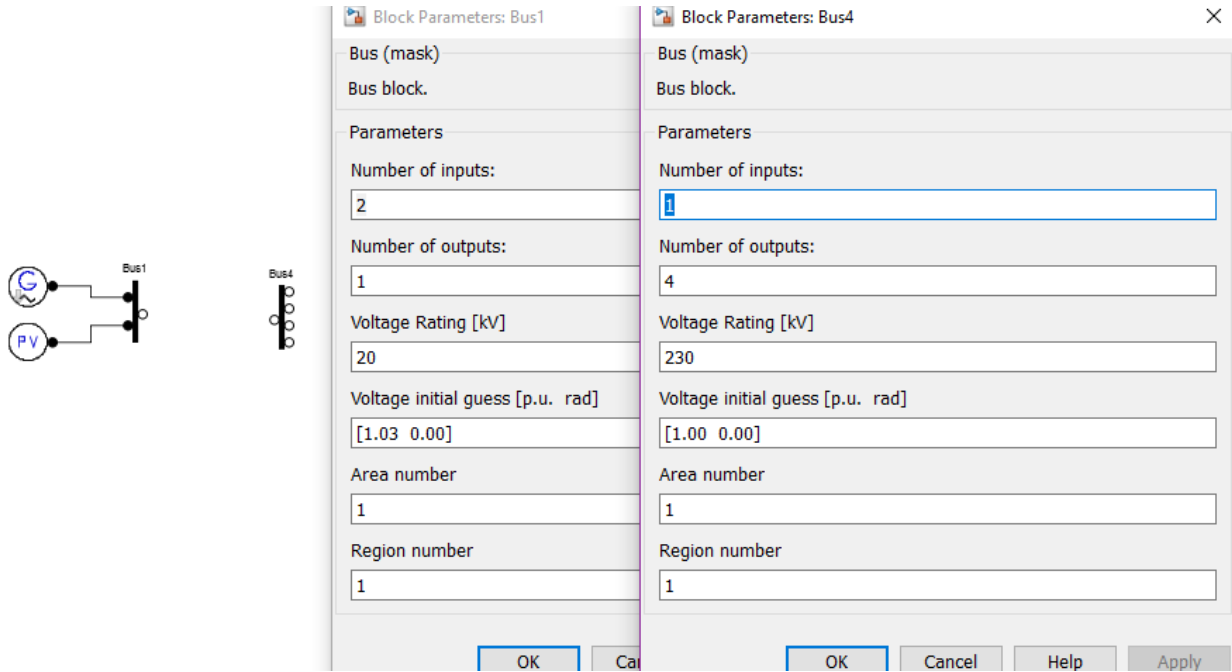


Figura 4.17 Parámetros en bus 1 y 4(izquierda y derecha respectivamente).

Como se observa en la figura 4.17, se colocan los valores de voltaje de operación de los buses, para el bus 1 conectado al generador 1 y el 4 conectado a la salida del lado de alto voltaje en el secundario del transformador de la máquina 1. Como se ve en la tabla 4.2, la magnitud del voltaje en el bus 1 es 1.03 *p.u.*, para el bus 4 no se tiene una magnitud de voltaje específica, por lo que se estable un inicio plano para el voltaje, de 1.00 *p.u.* Entonces, los buses 1 y 2 en los que se especifica la magnitud de voltaje inicial debe ser puesta en los parámetros de su respectivo bus. En el caso del bus 3, que es donde está referenciado el sistema y este se une al bus infinito se parametriza según su voltaje inicial y ángulo.

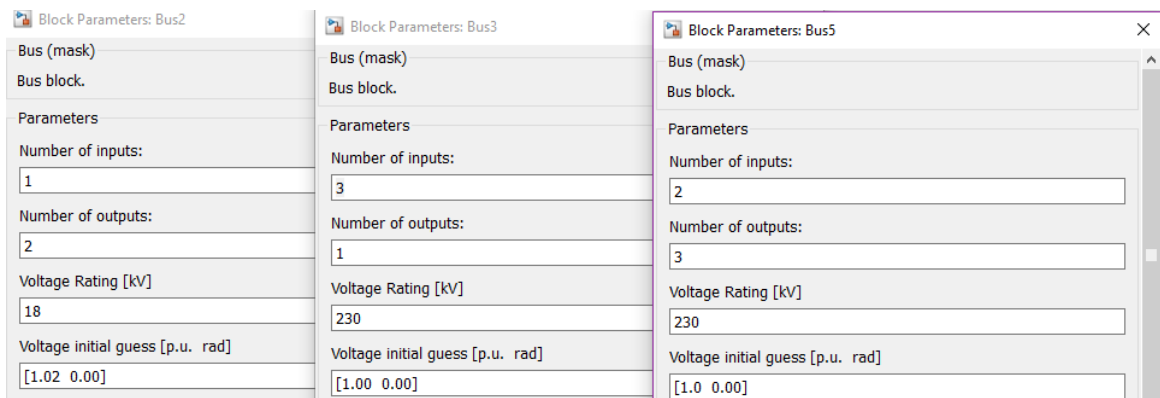


Figura 4.18 Parámetros en bus 2, 3 y 5(de izquierda a derecha).

Ahora se colocan los transformadores elevadores de voltaje, para la máquina 1 y 2. Los parámetros de operación de los transformadores están dados por, la potencia de los generadores y los voltajes de operación de los mismos.

Para el transformador 1, se fijará una potencia de 400 MVA con un voltaje de operación de 20 KV, la reactancia está dada en la tabla 4.1, con un valor de 0.022 p.u.

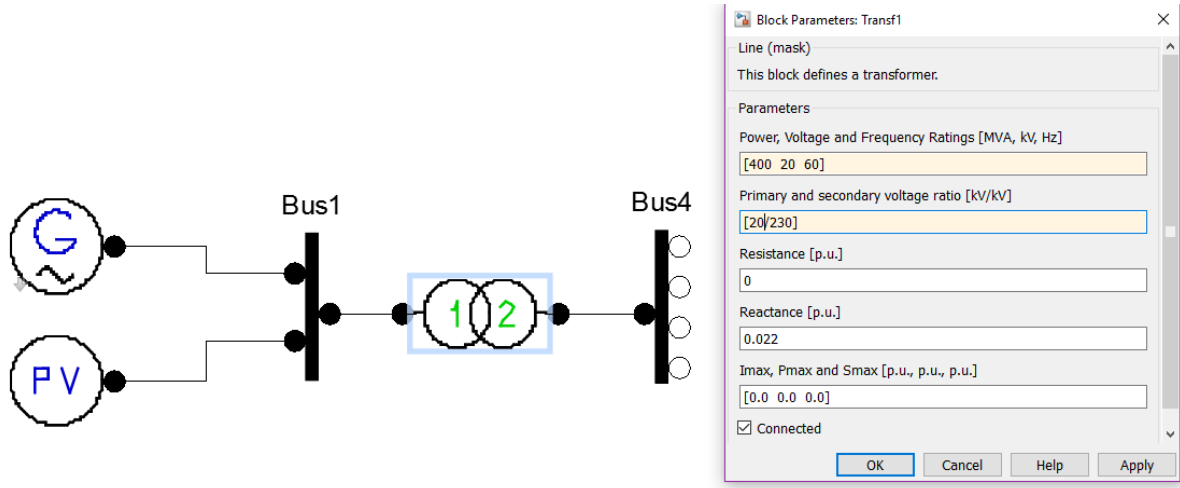


Figura 4.19 Definición de parámetros para transformador elevador 1.

Para el transformador 2, se fijará una potencia de 250 MVA con un voltaje de operación de 18 KV, la reactancia está dada en la tabla 4.1, con un valor de 0.040 p.u.

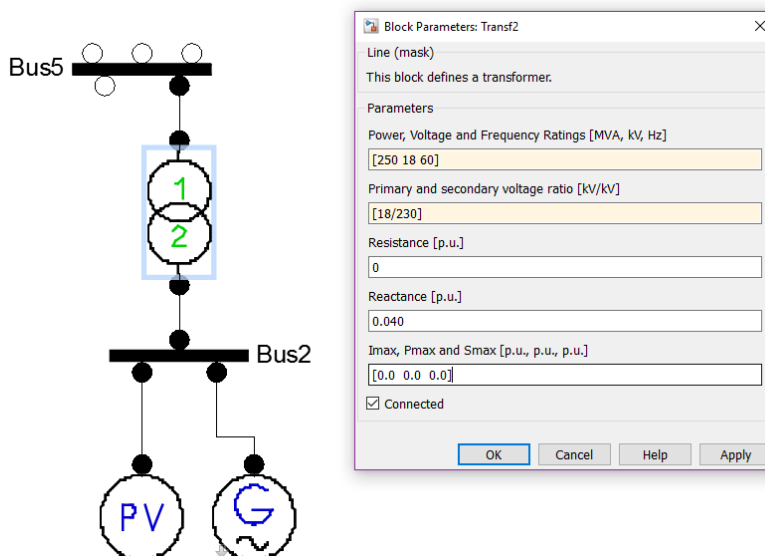


Figura 4.20 Definición de parámetros para transformador elevador 2.

Para la conexión de las líneas de transmisión se empieza con la colocación de la línea fallada entre los buses 3 y 4. Los parámetros de la línea están dados en la tabla 4.1, es este sistema está dada la impedancia total, así como también el valor de la susceptancia capacitiva de la línea.

El valor de la resistencia de la línea es 0.007 p.u. , la reactancia es de 0.040 p.u. y la susceptancia capacitiva 0.082 p.u. . En el caso de la potencia, voltaje y frecuencia, estás están dadas por el enunciado del ejercicio.

$$[MVA, KV, Hz] = [100 \ 230 \ 60]$$

También se incluye en la red un sistema de liberación de falla dada por un interruptor, que libera la falla en el tiempo establecido. Los parámetros de del interruptor son.

$$[MVA, KV, Hz] = [100 \ 230 \ 60]$$

El tiempo de liberación será definido en con 0.225 segundos para el primer estudio, en los estudios siguientes el tiempo de liberación de la falla se cambia por tiempos mayores y menores para observar el comportamiento del sistema.

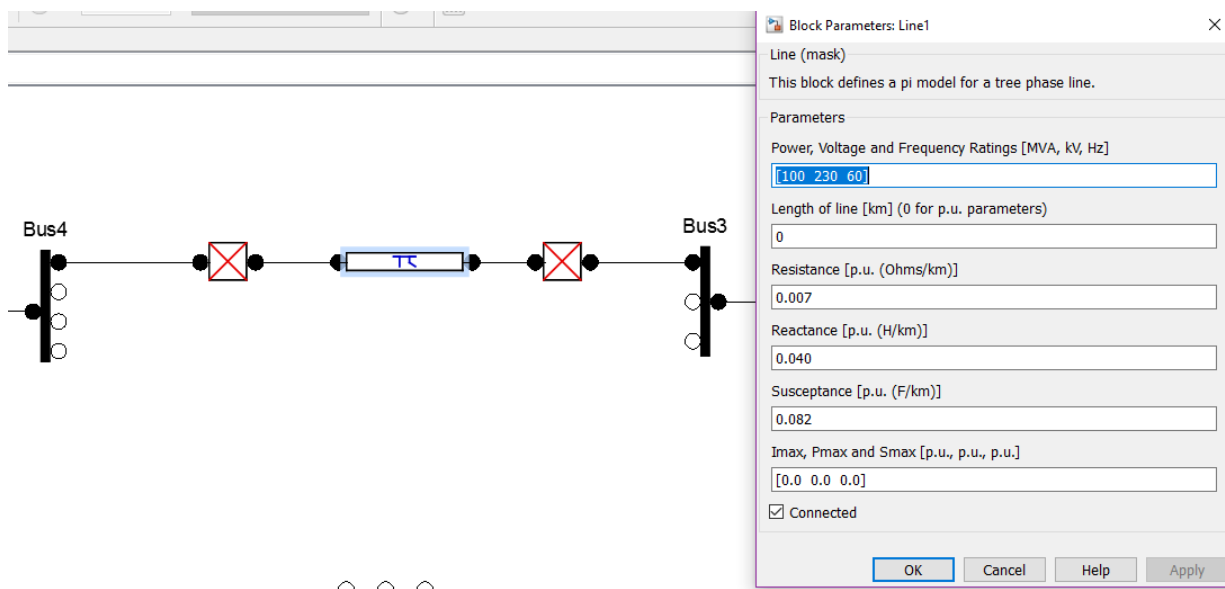


Figura 4.21 Definición de línea de transmisión entre buses 3 y 4.



Se modelan las líneas de transmisión restantes, con el mismo modelo pi por el efecto capacitivo presente en el sistema.

Para la línea 4-5, de igual manera que las anteriores, los parámetros están dados en la tabla 4.1, el valor de la resistencia de la línea es 0.018 p.u. , la reactancia es de 0.11 p.u. y la susceptancia capacitiva 0.226 p.u.

Para las líneas en paralelo 3-5, el valor de la resistencia de la línea es 0.008 p.u. , la reactancia es de 0.047 p.u. y la susceptancia capacitiva 0.098 p.u.

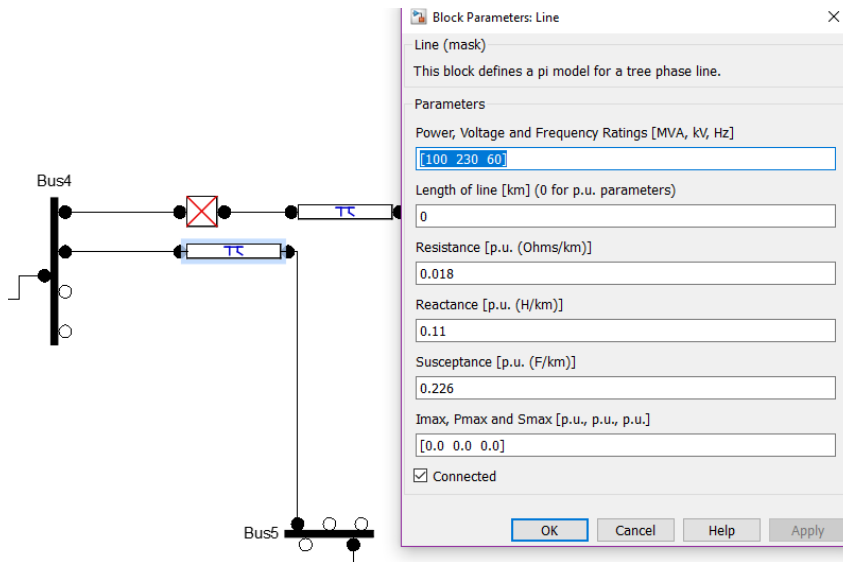


Figura 4.22 Definición de línea de transmisión entre buses 4 y 5.

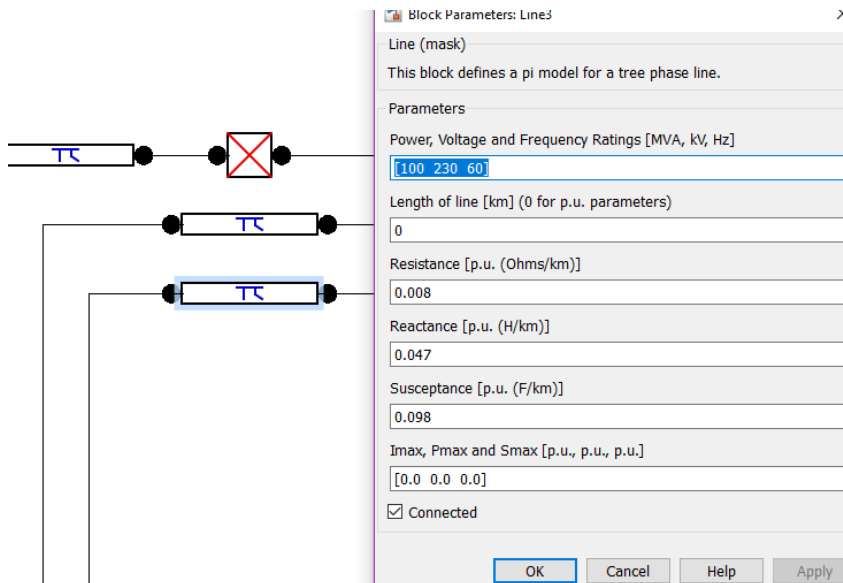


Figura 4.23 Definición de línea de transmisión en paralelo entre buses 3 y 5.

A continuación, se introducirán las cargas de la librería *Static components & devices*, en el sistema existen dos bloques que representan cargas conectadas al sistema, una demanda de *impedancias constantes conectadas* a los buses 4 y 5. En la librería se toma el bloque *constant PQ load*, y se conectan a sus fuentes.

Para la carga conectada en el bus 4, se establece que el voltaje de operación y la potencia base de operación son las mismas que el sistema completo.

$$[MVA, KV] = [100 \ 230]$$

En el apartador de potencia activa y reactiva se establece lo presentado en la tabla 4.2, donde indica el consumo de la carga.

$$Active \ and \ Reactive \ powers[p.u, p.u] = [1.0 \ 0.44]$$

En la carga conectada en el bus 5, el voltaje de operación y potencia permanecen igual al anterior. En el apartador de potencia activa y reactiva se establece lo presentado, de la misma manera, en la tabla 4.2, donde indica el consumo de la carga.

$$Active \ and \ Reactive \ powers[p.u, p.u] = [0.5 \ 0.16]$$

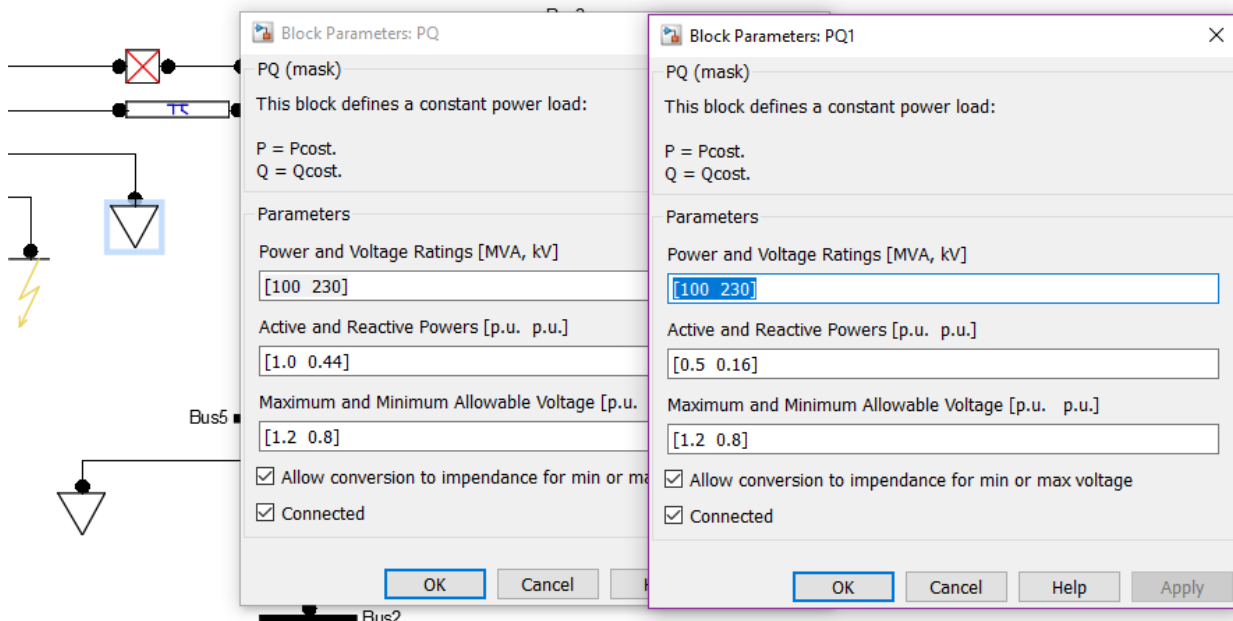


Figura 4.24 Definición de cargas constantes en buses 4 y 5.

La falla aplicada en el sistema se representa con un bloque de falla. Los valores de potencia, voltaje de operación y frecuencia son las mismas del sistema. El tiempo de liberación se establece en 0.225, como primera prueba del comportamiento del sistema.

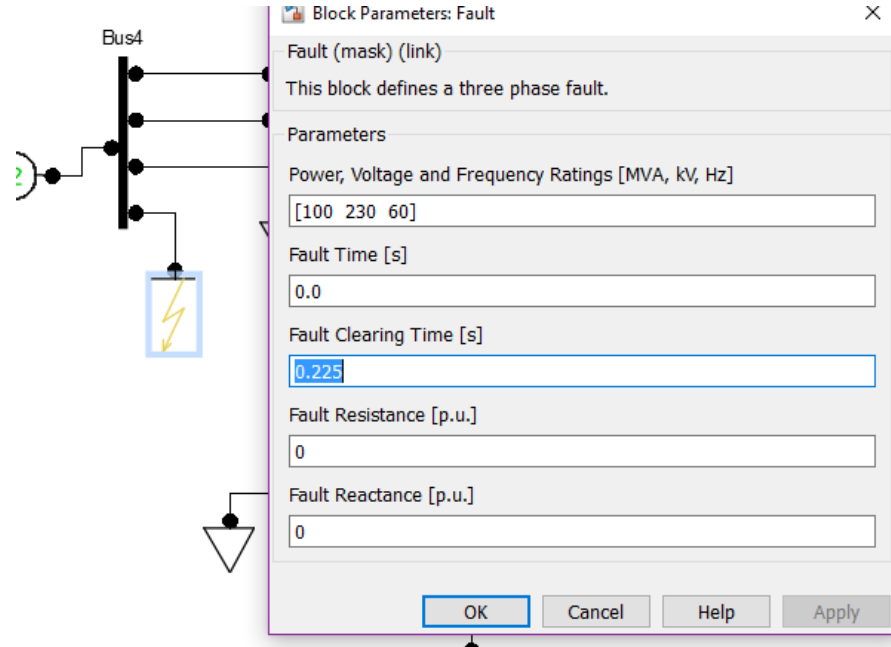


Figura 4.25 Definición de bloque de falla.

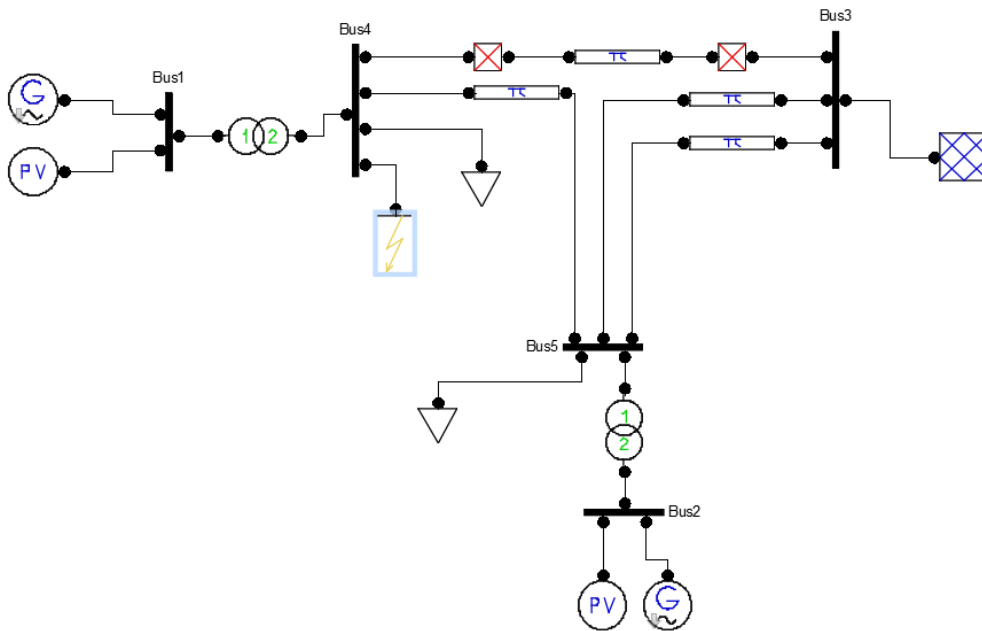


Figura 4.26 Modelo de sistema multimáquinas final.

El modelo se procede a cargar en PSAT, en la pantalla principal, y se fija la potencia base del sistema en 100 MVA y la frecuencia del sistema en 60 Hz, se establece ahora el tiempo final de simulación en 2 segundos.

Para obtener los valores de voltaje del sistema se puede hacer un estudio de flujos de potencia, es necesario para esto en la ventana principal de PSAT se hace selección en el botón de *Power Flow* y se entra al reporte estático con el comando *ctrl+v*.

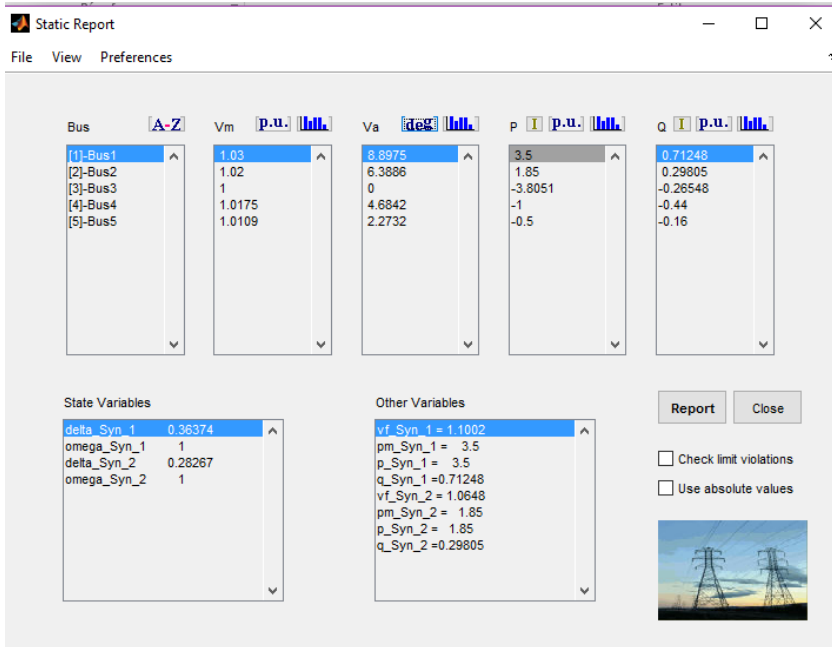


Figura 4.27 Reporte estático de flujos de potencia del sistema.

Se puede observar que los valores de voltaje en cada barra coinciden con los valores obtenidos con el método Gauss-Seidel, utilizado anteriormente, también se puede ver el flujo de potencia reactiva y activa en los buses, que concuerdan con los establecidos en por el enunciado.

La simulación se hará en primera instancia en base al tiempo de liberación establecido en la solución anterior de 0.225 segundos, esto con el fin de comparar los resultados de un método de solución a otro.

- Liberación t=0.225 segundos

Una vez realizado el estudio de flujos de potencia se selecciona el botón *time domain*, para obtener el comportamiento del sistema en falla y liberación. En

el apartado de *plot*, se selecciona en este caso los ángulos *delta_Syn_1* y *delta_Syn_2*, correspondientes a las máquinas 1 y 2 respectivamente seguido se selecciona la opción *plot*. Una vez exportada la gráfica se obtiene lo siguiente.

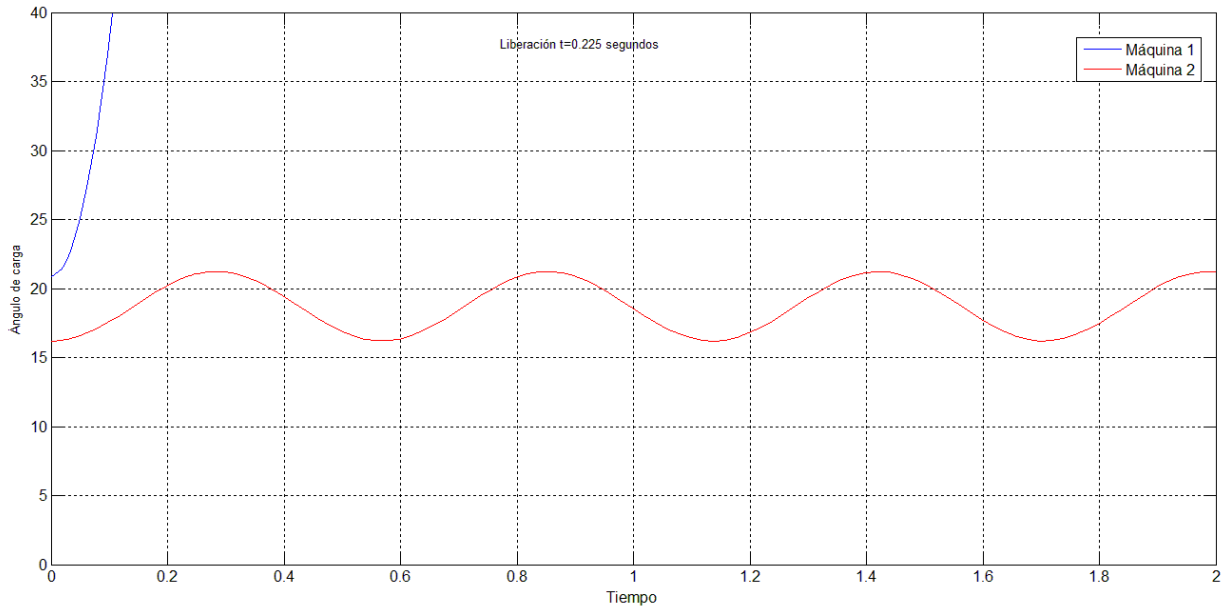


Figura 4.28 Comportamiento de sistema multimáquinas para liberación en $t=0.225$ segundos

Se puede observar que el sistema, como se había visto anteriormente, pierde su estabilidad por lo que se realiza una simulación con un nuevo tiempo de liberación. La liberación del sistema puede ser determinada por cálculos, en este caso se realizaron pruebas cambiando el tiempo de liberación de los interruptores y la falla y observar el comportamiento del sistema.

Se determina que el tiempo $t=0.150$ segundos es el tiempo crítico de liberación de la falla del sistema, como se puede observar en la figura 4.29 a continuación.

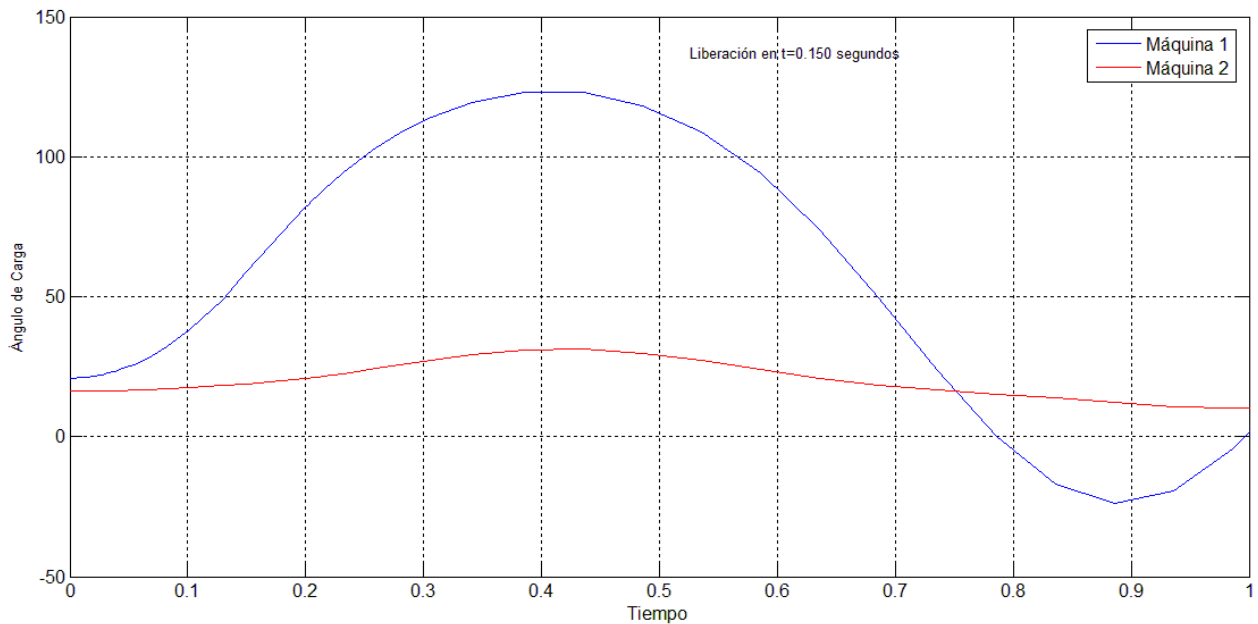


Figura 4.29 Comportamiento del sistema en un tiempo de liberación en $t=0.150$ segundos.

Se puede observar que el sistema, en la figura 4.29, para la máquina 1 su curva de oscilación es menos grave que en el tiempo de liberación anterior. La estabilidad del sistema en este caso se mantiene incluso para la máquina 2, que en el estudio anterior presentó una estabilidad transitoria, se muestra que se ha atenuado más, disminuyendo la gravedad de la falla.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES.

“Las ideas no son responsables de lo que los hombres hacen de ellas.”

- Werner Karl Heisenberg-

5.1 CONCLUSIÓN

Los estudios de estabilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia son necesarios para la determinación de los tiempos críticos de liberación de falla, esto con el fin de mantener el flujo de energía de manera constante para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Los SEP cada vez crecen aumentando su capacidad de demanda abastecimiento de demanda energética, para esto es necesario aumentar la eficiencia y disminuir el número de interrupciones en él. Es importante tener en cuenta los principios de solución para los estudios de estabilidad transitoria, como el antes utilizado método paso a paso, para poder entender el funcionamiento de los programas de diseños comerciales para estudios de estabilidad tales como PSAT, PSS/E, PSCAD.

Los métodos numéricos juegan un papel importante en la solución de los programas computacionales para la resolución de SEP, como se vio en el capítulo II, existen varios métodos de solución con ellos los programas son capaces de resolver de manera más eficiente los sistemas estudiados. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, el uso de cada uno de ellos en diferentes situaciones puede facilitar el cálculo



y solución de ciertos sistemas. En el sistema máquina bus infinito, el uso del método de áreas iguales puede proporcionar una solución al problema de manera práctica y más rápida que si se hace uso de un método numérico.

El aprendizaje del uso y comprensión de los programas computacionales para dar solución a diferentes estudios en Sistemas Eléctricos de Potencia, es una gran herramienta, desde flujos de potencia, estabilidad de voltaje, estabilidad transitoria, etc. De este modo, junto con las bases teóricas se pueden dar soluciones a problemas reales en situaciones que comprometan la estabilidad de los sistemas de una manera rápida y eficiente, disminuyendo pérdidas en la red de elementos como generadores, líneas etc. Los sistemas de liberación de falla (interruptores, seccionadores) la pieza clave de los datos obtenidos en los diferentes estudios, ya que gracias a ellos nos ayudan a garantizar medios de desconexión eficientes y prácticos.



REFERENCIAS

- Arrillaga, J. C. (1991). *Computer Modelling of Electrical Power Systems* (Wiley-Interscience Publication). Wiley.
- CFE. (2014). *Informe Anual*.
- Glover, J. D. (2003). *Sistemas de Potencia, análisis y diseño, 3a. edición*. Thomson.
- Gómez, A., Martínez, J. L., Rosendo, J. A., & Romero, E. y. (2003). *Sistemas eléctricos de potencia. Problemas y ejer.res.(ph)*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Kothari, D. P. (2009). *Modern Power Systems Analysis*. McGraw Hill.
- Kundur, D. P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education.
- Walter Brokeing Christie, R. P. (2008). *Ñom Lűfke(EL rayo domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia*. Santiago de Chile: Prentice Hall.
- William D. Stevenson, J. (2002). *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw Hill.