

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**



**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANGULAR DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE  
POLOS SALIENTES**

Trabajo de Grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la  
obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

**Autor:**

Hernández Melo Bryan Alejandro

**Director:**

Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

Ibarra-Ecuador

Año 2022

# Autorización de uso y publicación a favor de la Universidad Técnica del Norte



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100311499-6
APELLIDOS Y NOMBRES:	Hernández Melo Bryan Alejandro
DIRECCIÓN:	Ibarra-Avenida Atahualpa y Carmen Guama
EMAIL:	<a href="mailto:bahernandezm@utn.edu.ec">bahernandezm@utn.edu.ec</a>
TELÉFONO MÓVIL:	0968168147

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANGULAR DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES
AUTOR (ES):	Hernández Melo Bryan Alejandro
FECHA: DD/MM/AAAA	27/10/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

#### 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de octubre del 2022

EL AUTOR:

Hernández Melo Bryan Alejandro  
C.I.: 100311499-6

## Aceptación del director



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

### CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Hernández Melo Bryan Alejandro, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ANGULAR DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES"**.

Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, aprobado la defensa, Impresión y empastado.

Ibarra, a los 27 días del mes de octubre del 2022

Lo certifico:

A handwritten signature in black ink, appearing to be "J. Barzola Iza", written in a cursive style.

Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**

## **Dedicatoria**

“Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la materia. Cuando se separan, el hombre no existe”

**Nikola Tesla**

Dedico este logro a mi madre Fabiola Melo, por verme inculcado buenos valores, apoyarme en todo momento y ser la luz que guía mi camino, a mi padre Julio Hernández, mi angelito, que desde el cielo me cuida e ilumina mis pensamientos, le dedico este sueño cumplido, ya que, por sus sabios consejos, y su amor incondicional, me he formado como un hombre de bien.

A mis hermanos Daysi, Andrés y Joselyn por ser un pilar fundamental, en esta etapa de realización académica, por brindarme su tiempo, fuerzas para seguir y cumplir esta meta tan anhelada.

**Bryan Hernández**

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios padre y a la Virgen María, por brindarme salud y fuerza para poder culminar con mis estudios universitarios, llenándome de sabiduría y experiencias que siempre llevare en mente y corazón, ya que, gracias a todo lo que me han brindado, pude seguir adelante y atravesar cualquier dificultad.

Doy gracias con toda mi alma, mente y corazón, y por ser la razón más grande de mi vida, a mi madre Fabiola Melo, por ser mi fortaleza, ya que, con su amor absoluto y arduo trabajo, me educó y apoyó en todo el transcurso de mi formación y a mi padre Julio Hernández, por todos sus esfuerzos realizados, enseñanzas, paciencia y su infinito amor.

Agradezco a mis hermanos Daysi, Andrés y Joselyn, por ser un ejemplo para seguir adelante e impulsarme a superarme todos los días, por ayudarme en todo el transcurso de mi vida y estar para mí siempre que los necesité.

A mi novia Alejandra Flores doy gracias, por ser esa persona tan especial que llego a mi vida, por demostrar su confianza en mí, brindándome su cariño, energía y aliento, y apoyarme en momentos difíciles y ser un pilar fundamental en mi vida.

A mi mejor amigo Alexander Yar, al cual guardo bastante aprecio y expreso mi gratitud, por ayudarme en buenos y malos momentos.

También agradezco a mis compañeros y docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, por todas las enseñanzas y ayuda que me han proporcionado, como también a mi director de tesis Ing. Jhonny Barzola MSc., por la orientación y guía brindada para completar el desarrollo de mi investigación.

## Índice de contenido

Autorización de uso y publicación a favor de la Universidad Técnica del Norte.....	II
Aceptación del director.....	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimiento.....	V
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
Antecedentes.....	XIV
Planteamiento del problema.....	XVI
Formulación del problema.....	XVI
Objetivos.....	XVII
Objetivo General.....	XVII
Objetivos específicos.....	XVII
Justificación.....	XVIII
Alcance.....	XIX
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Marco Teórico</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Generador síncrono de polos salientes</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.1. Principio de funcionamiento del generador síncrono de polos salientes</b> .....	<b>2</b>
1.1.1.1. Funcionamiento en vacío.....	2
1.1.1.2. Funcionamiento en estado estable.....	2
1.1.1.3. Funcionamiento bajo carga.....	3
<b>1.1.2. Partes que conforman el generador síncrono de polos salientes</b> .....	<b>3</b>
1.1.2.1. Rotor de polos salientes.....	3
1.1.2.2. Estator de polos salientes.....	6
<b>1.2. Parámetros eléctricos del generador síncrono de polos salientes</b> .....	<b>8</b>
<b>1.3. Modelo dinámico</b> .....	<b>10</b>
1.3.1. Utilidad del modelo dinámico.....	13
1.3.2. Varios modelos desarrollados.....	14
1.3.2.1. Modelo dinámico en sistemas eléctricos de potencia.....	14
1.3.2.2. Modelo en máquinas síncronas.....	14

1.4.	Estudio de estabilidad angular .....	15
1.4.1.	Tipos de perturbaciones en el ángulo .....	16
1.4.1.1.	Análisis de estabilidad angular de pequeñas señales .....	16
1.4.1.2.	Análisis de estabilidad angular de grandes señales .....	17
1.4.2.	Relación potencia-ángulo .....	19
1.4.2.1.	Análisis de igualdad de áreas .....	19
1.4.3.	Análisis del tiempo crítico.....	21
1.4.4.	Estabilidad para sistemas Multi-Máquinas.....	21
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>		<b>23</b>
<b>Determinación del funcionamiento del generador .....</b>		<b>23</b>
2.1.	Descripción general.....	23
2.1.1.	Lugar de estudio.....	23
2.1.2.	Metodología .....	24
2.2.	Recopilación de fundamentos matemáticos.....	26
2.2.1.	Dinámica de una maquina síncrona.....	26
2.2.2.	Oscilación.....	27
2.2.3.	Modelo de máquina simplificado .....	28
2.2.4.	Curva potencia ángulo .....	28
2.2.5.	Técnica de eliminación de nodos .....	29
2.2.6.	Sistemas simples .....	31
2.2.6.1.	Maquina conectada a bus infinito .....	31
2.2.6.2.	Sistema de dos máquinas .....	32
2.2.7.	Estabilidad en estado estacionario .....	33
2.2.8.	Estabilidad transitoria .....	34
2.2.9.	Criterio de igualdad de áreas .....	35
2.2.9.1.	Cambio repentino en la entrada mecánica .....	37
2.2.9.2.	Efecto del tiempo de despeje sobre la estabilidad.....	40
2.2.9.3.	Pérdida repentina de una de las líneas paralelas .....	43
2.3.	Solución por partes o punto-punto .....	46
2.4.	Otras soluciones o métodos numéricos para estudio de estabilidad angular .....	49
2.5.	Software MATLAB & SIMULINK.....	50
2.6.	Sistema de potencia de prueba para el generador.....	51
2.7.	Determinación del funcionamiento en estado estable .....	53

2.7.1. Parámetros del sistema .....	53
2.7.2. Elementos que conforman el sistema dentro de MATLAB & SIMULINK .....	54
2.7.3. Desarrollo de la simulación de funcionamiento del sistema de potencia en estado estable .....	56
2.7.4. Resultados de la simulación .....	59
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>63</b>
<b>Análisis de estabilidad angular</b> .....	<b>63</b>
3.1. Diagrama de reactancias del sistema eléctrico de potencia en los diferentes estados .....	63
3.2. Proceso de elaboración para conocer la estabilidad angular del sistema eléctrico de potencia por medio de MATLAB .....	65
Conclusiones .....	80
Recomendaciones .....	81
Bibliografía .....	82
Anexos .....	86
<b>Anexo A: Generador síncrono de polos salientes.</b> .....	<b>86</b>
<b>Anexo B: Modelado del sistema eléctrico de potencia, con sus componentes en MATLAB &amp; Simulink para la simulación en estado estable.</b> .....	<b>86</b>
<b>Anexo C: Código.</b> .....	<b>87</b>

## Índice de figuras

Figura 1 Generador síncrono de polos salientes en el estator.....	1
Figura 2 Generador síncrono de polos salientes en el rotor.....	2
Figura 3 Esquema del generador síncrono bajo carga.....	3
Figura 4 Polo del rotor.....	4
Figura 5 Lámina del núcleo polar.....	4
Figura 6 Devanado de campo.....	4
Figura 7 Puentes del rotor.....	4
Figura 8 Elementos de sujeción.....	5
Figura 9 Ubicación del devanado amortiguador.....	5
Figura 10 Rotor de polos salientes.....	5
Figura 11 Cojinete.....	5
Figura 12 Anillos deslizantes.....	5
Figura 13 Escobillas.....	6
Figura 14 Estrella.....	6
Figura 15 Llanta polar.....	6
Figura 16 Carcasa.....	7
Figura 17 Núcleo.....	7
Figura 18 Devanado del estator.....	7
Figura 19 Acuña del estator.....	7
Figura 20 Aislamiento del devanado.....	8
Figura 21 Circuito equivalente en el marco dq0.....	10
Figura 22 Generador síncrono bipolar con rotor de polos salientes.....	11
Figura 23 Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes.....	11
Figura 24 Períodos de tiempo para las corrientes de cortocircuito.....	12
Figura 25 Respuesta del ángulo a una perturbación transitoria.....	18
Figura 26 Curva relación ángulo-potencia.....	19
Figura 27 Criterio de áreas iguales.....	20
Figura 28 Ubicación Física.....	24
Figura 29 Metodología empleada para la determinación del funcionamiento del generador en estado estable.....	25
Figura 30 Flujo de potencias eléctricas y mecánicas de una máquina síncrona.....	27
Figura 31 Red de estabilidad del sistema.....	28
Figura 32 Red de estudio de estabilidad de dos barras.....	29
Figura 33 Diagrama equivalente Thevenin.....	30
Figura 34 Diagrama de reactancia.....	30
Figura 35 Máquina conectada a un bus infinito.....	31
Figura 36 Sistema de dos máquinas.....	32
Figura 37 Sistema de barras colectoras infinitas en una sola máquina.....	35
Figura 38 Gráfica de $\delta$ vs t para sistemas estables e inestables.....	36
Figura 39 Máquina conectada a una barra colectora infinita.....	37
Figura 40 Repentino aumento en la entrada mecánica a un generador.....	38
Figura 41 Caso límite de régimen transitorio con entrada mecánica de aumento repentino.....	39
Figura 42 Sistema en operación.....	40

Figura 43 Ángulo de despeje. ....	41
Figura 44 Ángulo crítico de despeje. ....	42
Figura 45 Una sola máquina unida a un infinito a través de dos líneas paralelas. ....	43
Figura 46 Criterio de igual área aplicado a la apertura de una de las dos líneas en paralelo. ....	44
Figura 47 Cortocircuito repentino lejos de los extremos de las barras. ....	45
Figura 48 Solución por partes de la ecuación de oscilación. ....	48
Figura 49 Sistema eléctrico de potencia de prueba. ....	51
Figura 50 Esquema de reactancias del SEP. ....	52
Figura 51 Diagrama de reactancia del sistema simple de estudio (Pre-Falla). ....	52
Figura 52 Bloques de las librerías de SIMULINK. ....	55
Figura 53 Sistema de prueba implementado en SIMULINK. ....	56
Figura 54 Características del generador. ....	56
Figura 55 Características de $Z_t$ , $Z_{L1}$ , $Z_{L2}$ , Barra Infinita. ....	57
Figura 56 Características de la Barra 1, Barra 2, Barra 3. ....	58
Figura 57 Cálculo de las potencias activas y reactivas en cada nodo. ....	59
Figura 58 Gráfica P-Q barra 1. ....	60
Figura 59 Gráfica P-Q barra 2. ....	61
Figura 60 Gráfica P-Q barra 3. ....	62
Figura 61 Diagrama de reactancias antes de la falla. ....	63
Figura 62 Diagrama de admitancias, donde ocurre la falla en la mitad de una de las líneas de transmisión. ....	64
Figura 63 Diagrama de admitancias ocurrida la falla. ....	64
Figura 64 Diagrama ocurrida la falla en la mitad de la línea. ....	64
Figura 65 Diagrama método reducción de nodos (Equivalente Thevenin). ....	65
Figura 66 Parámetros del sistema. ....	67
Figura 67 Componentes para Y de barra y componentes para voltaje transitorio. ....	68
Figura 68 Cálculo de Pre-Falla. ....	69
Figura 69 Cálculo de Post-Falla. ....	69
Figura 70 Cálculo Durante la falla. ....	70
Figura 71 Criterio de áreas iguales. ....	71
Figura 72 Cálculo para la curva de oscilación. ....	72
Figura 73 Método de Runge Kutta. ....	73
Figura 74 Método de Runge Kutta para una falla liberada. ....	74
Figura 75 Método de Runge Kutta para una falla sostenida. ....	75
Figura 76 Curva de fallas ( $P-\delta$ ) y Curva de oscilación ( $\delta-t$ ). ....	76
Figura 77 Resultados de potencias, grados, áreas y tiempo crítico. ....	77
Figura 78 Curva de oscilación para una falla despejada. ....	77
Figura 79 Curva de oscilación para una falla sostenida. ....	78

## Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de generadores síncronos de polos salientes. ....	1
Tabla 2 Partes del generador con rotor de polos salientes.....	4
Tabla 3 Partes del generador con estator de polos salientes. ....	7
Tabla 4 Parámetros del generador síncrono.....	8
Tabla 5 Métodos Numéricos para el desarrollo de estudios de estabilidad.....	49
Tabla 6 Datos de las líneas de transmisión. ....	53
Tabla 7 Datos del transformador. ....	54
Tabla 8 Datos del generador síncrono de polos salientes.....	54
Tabla 9 Conversión de valores.....	66

## Resumen

El estudio de estabilidad angular para cualquier sistema de potencia es indispensable, debido a que otorga confianza y ayuda a determinar todos los parámetros y propiedades, para volver a estabilizar el sistema, ya que, al ocurrir una perturbación, este tiende a desequilibrar toda la red.

En el presente proyecto de investigación se analizó la estabilidad angular de un generador síncrono de polos salientes, dentro de un sistema eléctrico de potencia base, que entrega potencia nominal a la red, que tiene la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte.

El objetivo del trabajo de investigación, es el de analizar la estabilidad angular de un generador síncrono de polos salientes mediante sus parámetros eléctricos, el cual fue demostrado a través de la descripción de los parámetros eléctricos del generador para estudios de estabilidad, para consecuentemente determinar el funcionamiento de este en estado estable, con la ayuda de simulación del sistema de potencia y finalmente analizar la estabilidad angular en un pequeño sistema eléctrico de potencia.

Para la elaboración de este proyecto se utilizó el tipo de investigación descriptiva, que aplica el método de análisis, el cual estudió una situación específica, en este caso, una falla en la mitad de una de las líneas de transmisión del sistema de potencia, mostrando todas las características y estados del sistema, haciendo que valgan como punto de partida, para estudios que demanden aún más detalles.

En base a esta investigación se evidencia, mediante, los datos obtenidos, como proceder a realizar el análisis de estabilidad angular en el transcurso de los estados de funcionamiento del sistema eléctrico de potencia, logrando como resultado, valores de potencias eléctricas, ángulos del rotor del generador y curvas de oscilación.

**Palabras clave:** estabilidad angular, generador síncrono de polos salientes, simulación, sistemas eléctricos de potencia, MATLAB.

## Abstract

The study of angular stability for any power system is indispensable because it gives confidence and helps to determine all the parameters and properties, to restabilize the system, since, when a disturbance occurs, it tends to unbalance the entire network.

In the present research project, the angular stability of a salient pole synchronous generator was analyzed, within an electrical system of base power, which delivers nominal power to the network, which has the electricity career of the “Universidad Técnica del Norte”.

The objective of the research work is to analyze the angular stability of a salient pole synchronous generator through its electrical parameters, which was demonstrated through the description of the electrical parameters of the generator for stability studies, to consequently determine the operation of this in a stable state, with the help of simulation of the power system and finally analyze the angular stability in a small electrical system of power.

For the elaboration of this project the type of descriptive research was used, which applies the analysis method, which studied a specific situation, in this case, a failure in the middle of one of the transmission lines of the power system, showing all the characteristics and states of the system, making them worth as a starting point, for studies that demand even more details.

Based on this research, the data obtained are evidenced, such as proceeding to perform the angular stability analysis during the operating states of the electrical power system, achieving as a result, values of electrical powers, angles of the rotor of the generator and oscillation curves.

**Keywords:** angular stability, salient pole synchronous generator, simulation, electrical power systems, MATLAB.

## **Antecedentes**

La energía eléctrica es indispensable para los seres humanos, ya que es una fuente de energía primordial para alimentar maquinas eléctricas a nivel nacional, residencial, industrial, un claro ejemplo es el generador eléctrico, debido a que es el punto de partida de los sistemas eléctricos de potencia, en vista que cambia energía potencial de los recursos primarios en energía eléctrica, para a continuación ser usada por la demanda eléctrica. (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

La información estadística con respecto a la potencia nominal de generación de energía eléctrica con respecto al balance nacional es la siguiente: en energía renovable se tiene hidráulica 58.52%, eólica 0.24%, fotovoltaica 0.32%, biomasa 1.66% y biogás 0.08%, mientras que las no renovables térmica MCI 23.30%, térmica turbo gas 10.58% y térmica turbo vapor 5.30%. (Agencia de regulación y control de energía, 2021)

Las maquinas eléctricas son aparatos que ayudan a transformar un tipo de energía en otra, se divide en máquinas rotativas las cuales funcionan como motores o generadores y maquinas estáticas como son los transformadores. (Rodríguez Pozueta, Máquinas eléctricas I-G862, 2016). Los generadores eléctricos son una fuente de energía eléctrica de reserva aplicados en diferentes lugares independientemente del corte eléctrico o demanda energética, son los más comunes para generar energía. (Pahuanquiza Guamantica, 2015)

Un generador síncrono el cual es una maquina eléctrica rotatoria, se encarga de convertir energía mecánica en eléctrica. Este principio se denomina fenómeno de inducción electromagnética. (Mondragón Navarrete, Pineda Jiménez, & Trejo González, 2015). Este tipo de máquinas están compuestas principalmente por dos elementos, el rotor y el estator que vienen a ser la parte móvil y fija respectivamente. (Aguilar Rizzo, 2015).

Las maquinas síncronas de polos salientes presenta expansiones que dan lugar a un entrehierro variable, con gran número de polos, comúnmente utilizadas para bajas velocidades como por ejemplo en turbinas hidráulicas e hidro generadores, una de las ventajas de este tipo de máquinas es debido a que pueden ser empleadas para gran potencia y por la versatilidad de este. (Boldea, Synchronous Generators, 2016)

La estabilidad en sistemas eléctricos de potencia es un tema muy importante, debido a que este debe tener la facultad para que, dado inicio de operación se mantenga en condiciones normales y/o permita un recobro de equilibrio posteriormente de estar inmerso a perturbaciones. (Mircea Eremia & Mohammad Shahidehpour, 2013). La estabilidad es monitoreada por instituciones de control y transmisión, para realizar acciones que eviten colapsos en los sistemas regionales o nacionales. La inestabilidad puede presentarse por problemas de ángulo, voltaje y frecuencia en sistemas eléctricos de potencia. (Barrera & Játiva, 2014)

El concepto de estabilidad angular consiste en conservar la sincronización y equilibrar el par mecánico y par electromagnético de la máquina, disminuyendo las oscilaciones de ángulo del generador. (Gallardo Quingatuña, 2009). La estabilidad establece si los ángulos de los generadores se conservan en valores menores a los 90 grados luego de estar sujeto a una alteración. Las perturbaciones que se encuentran por inestabilidad angular son la de señal pequeña y la transitoria en el sistema eléctrico de potencia. (Espinoza San Martín, 2012)

## **Planteamiento del problema**

La estabilidad angular es la destreza de que un sistema eléctrico de potencia sostenga sincronismo al existir fallas simples o graves. Como consecuencia de las alteraciones, ya sea por pérdidas de cargas significativas, fallas de red de transmisión, etc., el sistema manifiesta flujos de potencia, variaciones del ángulo del rotor del generador, etc. Es fundamental tener en cuenta que, la inestabilidad angular es una función por parte de las perturbaciones como también de los estados de operación. Al momento de analizar este tipo de estabilidad tenemos que los desórdenes más importantes son los de cortocircuito causando mayor aceleración o desaceleración del generador síncrono.

A causa de que se tiene perturbaciones mecánicas o eléctricas, la gran dificultad de la estabilidad angular se denomina no lineal, ya que estas distorsiones son de naturaleza dinámica y cambian por las circunstancias de operación al que está sujeto el generador.

El análisis del generador en un sistema eléctrico de potencia al que esté acoplado se realiza por medio de simulaciones durante el diseño del sistema. Esto, es debido a la complejidad que se encuentra al experimentar mediante módulos, incluso cálculos o ecuaciones matemáticas.

Por medio de simulaciones, se logra desarrollar estudios de estabilidad en laboratorio con la ayuda de una herramienta computacional. Sin embargo, el estudio a realizarse debe ser delimitado al tipo de estabilidad y condiciones de operación de interés.

## **Formulación del problema**

¿Cómo analizar la estabilidad angular de un generador síncrono de polos salientes mediante sus parámetros eléctricos?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar la estabilidad angular de un generador síncrono de polos salientes mediante sus parámetros eléctricos.

### **Objetivos específicos**

- Describir los parámetros eléctricos de un generador síncrono de polos salientes para estudios de estabilidad.
- Determinar el funcionamiento del generador síncrono de polos salientes en estado estable.
- Analizar la estabilidad angular del generador síncrono de polos salientes en un pequeño sistema eléctrico de potencia.

## **Justificación**

El presente proyecto se encuentra orientado en la línea de investigación tecnológica de la Universidad Técnica del Norte, dado que es un tema de estudio relevante y en constante desarrollo en la actualidad para las maquinas síncronas en sistemas de potencia.

Se debe considerar que el sistema eléctrico de potencia debe tener una regulación en los niveles de ángulo, voltaje y frecuencia buena, manteniendo los factores de operación normales o reajustando las condiciones de las variables por disturbios en el generador síncrono de polos salientes, logrando funcionar efectivamente.

Un análisis de estabilidad angular se puede llevar a cabo por medio de simulaciones ya que una gran ventaja de utilizar este tipo de herramientas es a causa de que los parámetros eléctricos y lógica constructiva se pueden modificar inmediatamente, permitiendo analizar las diferentes condiciones, con el fin de evitar colapsos en el sistema.

Así mismo, el estudio de la estabilidad por medio trabajos en laboratorio posibilitará determinar opciones para mostrar en sistemas eléctricos de potencia la respuesta de los generadores síncronos al estar sometidos por perturbaciones y así basarse para próximos análisis de estabilidad aumentando un equilibrio total del sistema.

## **Alcance**

El proyecto de investigación se limitará a la elaboración del análisis de estabilidad angular mediante simulaciones de operación del generador síncrono de polos salientes de la carrera de electricidad en un pequeño sistema eléctrico de potencia con una herramienta computacional para reducir las problemáticas asociadas con la implementación.

Se realizará la obtención de curvas en relación potencia-ángulo, así como también se explicarán los límites de potencia máxima y tiempo crítico. Además, en base a los estudios alcanzados, se presentará un reporte técnico.

El generador síncrono de polos salientes a analizar para el trabajo de investigación con el que cuenta la carrera de electricidad posee unas características técnicas de placa de 6.5 KVA de potencia y voltaje de 220V. Sus parámetros eléctricos para estado estable y transitorios serán determinados y simulados dentro de un pequeño sistema de potencia.

El programa para utilizar será MATLAB 2020a & Simulink, como una interfaz gráfica de resultados, ya que su lenguaje de programación es de clase tipado dinámico y de entorno visual mediante diagramas de bloque.

# CAPÍTULO 1

## Marco Teórico

Este capítulo está enfocado a la parte teórica del proyecto de investigación, donde se detallará toda la información de los generadores síncronos de polos salientes como de la estabilidad angular en estos, recopilando diferentes conceptos y características importantes para el desarrollo del análisis de estabilidad angular en el generador síncrono de polos salientes.

### 1.1. Generador síncrono de polos salientes

Los generadores síncronos de polos salientes transforman como toda máquina eléctrica la energía mecánica en eléctrica, manifiestan un entrehierro mayor en el eje de cuadratura, esto da a entender que su entrehierro no es uniforme. (Mazariego Elías, Morales Machuca, & Vásquez Roque, 2017).

Se puede tener dos tipos de diseños de generadores síncronos de polos salientes los cuales se detallan en la tabla 1:

Tabla 1 Tipos de generadores síncronos de polos salientes.

Fuente: (Isla Martín, 2019)

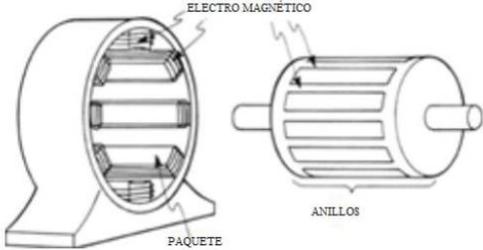
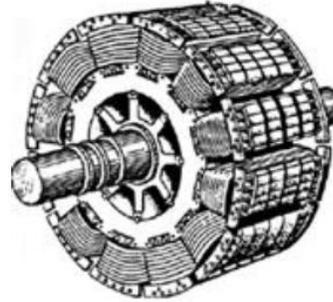
Tipo	Características	Modelo
<b>En el estator</b>	Construido por una especie de hojas de acero al silicio para conducir flujo magnético, los polos magnéticos son producidos por el metal y los devanados. El inducido se encuentra en el rotor y el número de anillos es proporcional al número de fases.	

Figura 1 Generador síncrono de polos salientes en el estator.

---

**En el rotor**

La característica principal es debido a que el inducido se encuentra en el estator, cuenta con un par de anillos de dimensiones reducidas para meter el voltaje de campo.



*Figura 2 Generador síncrono de polos salientes en el rotor.*

---

### **1.1.1. Principio de funcionamiento del generador síncrono de polos salientes**

El funcionamiento de las máquinas síncronas se basa en la ley de Faraday, esto quiere decir que el fenómeno empieza en el momento de que la tensión inducida al circuito eléctrico es equitativa a la variación del flujo del campo magnético en un conductor, sin embargo, se necesita de una espira para que permita el paso de corriente y así producir la fuerza electromotriz. (Ponce Sandoval & Montufar Chata, 2014)

#### **1.1.1.1. Funcionamiento en vacío**

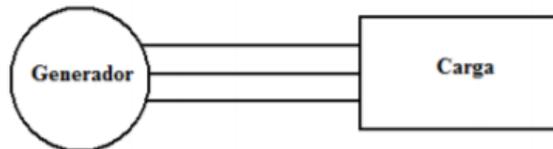
La máquina síncrona se encuentra funcionando en vacío al no producirse caída de tensión, al momento de medir el voltaje en los terminales de la máquina, este será igual a la fuerza magnetomotriz inducida, se debe mencionar que al no tener carga el valor de la corriente del inducido será cero. (Tonato Muñoz, 2020)

#### **1.1.1.2. Funcionamiento en estado estable**

Para el funcionamiento del generador en estado estable se tiene que el rotor de las máquinas síncronas interconectadas a la red se encuentran sincronizadas por medio de una velocidad. Cabe indicar que la estabilidad angular permite que el estado se mantenga estable, como también de recobrar luego de perturbaciones la sincronización. (Tonato Muñoz, 2020)

### 1.1.1.3. Funcionamiento bajo carga

Al hallarse en este estado el flujo se altera y cambia su valor debido a la corriente de campo, al aumentar la carga esta es directamente proporcional y dando como resultado una alteración en la potencia real, en la figura 3 se muestra el generador bajo carga. (Nizama Valdez, 2013)



*Figura 3 Esquema del generador síncrono bajo carga.*

*Fuente: (Nizama Valdez, 2013)*

### 1.1.2. Partes que conforman el generador síncrono de polos salientes

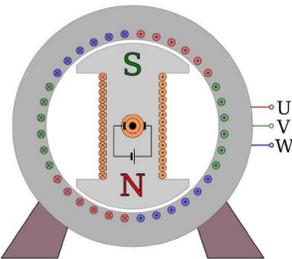
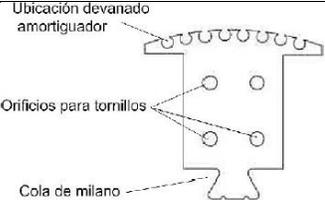
El generador síncrono de polos salientes se encuentra conformado por determinadas unidades o elementos, los cuales varían dependiendo de su configuración o aplicación a la que va a ser sometido o utilizado. Estos se dividen en dos, las cuales son generador síncrono con rotor de polos salientes y el generador síncrono con estator de polos salientes.

Cabe mencionar que este tipo de generadores se encuentran en turbinas hidráulicas, como también en motores Diesel debido a su velocidad reducida y números de polos. (Rodríguez Pozueta, Máquinas eléctricas I-G862, 2016)

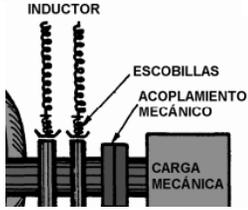
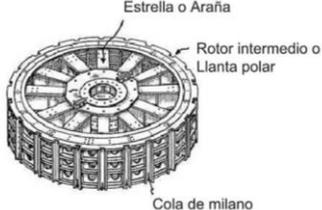
#### 1.1.2.1. Rotor de polos salientes

Uno de los elementos principales de la máquina síncrona es el rotor, debido a que es el componente rotativo del generador, la función principal es originar el campo magnético con la ayuda de la inducción de corriente directa, la cual se encuentra en el devanado. A continuación, se detallarán en la tabla 2 las partes de esta máquina. (Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)

Tabla 2 Partes del generador con rotor de polos salientes.

Elemento	Descripción	Referencia	Modelo
<b>Polo del rotor</b>	La característica o función que cumple este elemento es de trasladar el campo magnético. Debe estar construido con un material resistente de chapas de acero.	(Valdeperas Nieva, 2015)	 <p data-bbox="1133 573 1365 596">Figura 4 Polo del rotor.</p> <p data-bbox="1109 625 1398 674">Fuente: (Rodríguez Pozueta, Máquinas Eléctricas II, 2018)</p>
<b>Núcleo polar</b>	Este elemento tiene como trabajo principal cerrar el circuito magnético, también conservar el devanado de campo en un estado correcto.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p data-bbox="1117 909 1390 957">Figura 5 Lámina del núcleo polar.</p> <p data-bbox="1109 989 1398 1041">Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>
<b>Devanado de campo</b>	La misión de este elemento es establecer flujo magnético en el entrehierro y está formada por espiras y la bobina.	(Calero Freire, 2008)	 <p data-bbox="1105 1318 1398 1341">Figura 6 Devanado de campo.</p> <p data-bbox="1109 1373 1398 1419">Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>
<b>Puente del rotor</b>	El objetivo de este elemento es conectar de manera progresiva los bobinados a la fuente y están constituidos por platinas de cobre aisladas.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p data-bbox="1117 1654 1390 1682">Figura 7 Puentes del rotor.</p> <p data-bbox="1109 1709 1398 1755">Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>

<p><b>Elementos de sujeción del devanado de campo</b></p>	<p>Son utilizados básicamente para asegurar la forma y posición de los conductores.</p>	<p>(Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>	
<p><b>Devanado amortiguado or</b></p>	<p>El trabajo que realiza este elemento es reducir los armónicos, ayuda al sincronismo evitando variaciones y amortigua las oscilaciones pendulares.</p>	<p>(Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>	
<p><b>Eje</b></p>	<p>Es la estructura que se asocia a las bobinas, genera todo el movimiento, construidas de un material con una gran resistencia mecánica.</p>	<p>(Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>	
<p><b>Cojinete</b></p>	<p>El objetivo principal es llevar carga al estar en contacto con respecto a otra parte de la máquina.</p>	<p>(Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>	
<p><b>Anillos deslizantes</b></p>	<p>Su función es enlazar el devanado con el sistema de excitación. Constituidos de cobre o bronce.</p>	<p>(Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>	

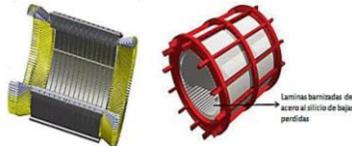
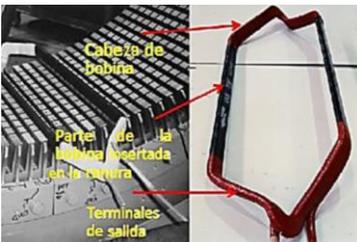
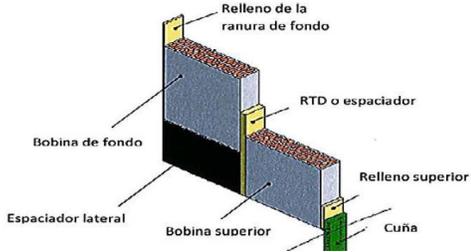
<b>Escobillas y porta escobillas</b>	Las escobillas son usadas para el deslizamiento produciendo el movimiento rotatorio, mientras que los porta carbones sujetan y presionan las escobillas, fabricadas a partir de grafito.	(Pahuanquiza Guamantica, 2015)	 <p>INDUCTOR ESCOBILLAS ACOPPLAMIENTO MECÁNICO CARGA MECÁNICA</p> <p><i>Figura 13 Escobillas.</i></p> <p><i>Fuente: (Rodríguez Pozueta, Máquinas Eléctricas II, 2018)</i></p>
<b>Araña o estrella</b>	Este elemento tiene como objetivo ventilar y conservar su posición para poder transferir de la llanta al eje su torque.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p>Estrella o Araña Rotor intermedio o Llanta polar Cola de milano</p> <p><i>Figura 14 Estrella.</i></p> <p><i>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</i></p>
<b>Llanta o rotor intermedio</b>	Construidos de un material de alta resistencia debido a que debe transferir a los polos de la maquina el torque.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p>Estrella o Araña Rotor intermedio o Llanta polar Cola de milano</p> <p><i>Figura 15 Llanta polar.</i></p> <p><i>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</i></p>

### 1.1.2.2. Estator de polos salientes

El estator de un generador síncrono de polos salientes es la parte fija de la máquina, el cual sirve para transmitir las corrientes y potencias eléctricas, fabricados generalmente de láminas de acero para que a través de ellas se dirija el flujo magnético de la máquina. (Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)

En la tabla 3 se detallarán las partes que forman parte de esta máquina síncrona con estator de polos salientes:

Tabla 3 Partes del generador con estator de polos salientes.

Elemento	Descripción	Referencia	Modelo
<b>Carcasa</b>	Este elemento tiene como misión mantener apretado el núcleo y está construido de acero específicamente de láminas.	(Martínez Arias & López Hincapié, 2008)	 <p>Figura 16 Carcasa.</p> <p>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>
<b>Núcleo del estator</b>	El núcleo del estator tiene alta resistencia para presiones y temperaturas elevadas, fabricadas de láminas de acero para permitir el flujo magnético.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p>Figura 17 Núcleo.</p> <p>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>
<b>Devanado del estator</b>	Su función principal es debido a que la fuerza electromotriz es inducida en él. Los aislamientos de este elemento son construidos de diferentes materiales.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p>Figura 18 Devanado del estator.</p> <p>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>
<b>Cuñas del estator</b>	Son fabricadas para soportar altas temperaturas, y su propósito es que el devanado se mantenga asegurado.	(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)	 <p>Figura 19 Acuña del estator.</p> <p>Fuente: (Castillo Monsalve &amp; Garzón Vizcayo, 2016)</p>

**Sistema de aislamiento del devanado**

Este tipo de sistema tiene como funciones principales asegurar que no exista cortocircuitos, que exista aislamientos entre las espiras y/o hilos, también que los conductores mantengan su posición independientemente de las vibraciones de la máquina y conservar el aislamiento a tierra.

(Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)

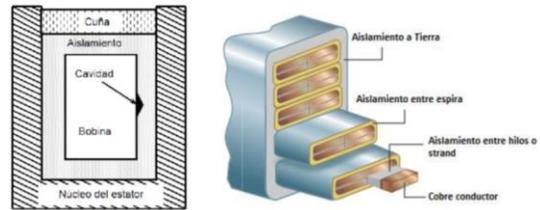


Figura 20 Aislamiento del devanado.

Fuente: (Castillo Monsalve & Garzón Vizcayo, 2016)

**1.2. Parámetros eléctricos del generador síncrono de polos salientes**

Toda máquina eléctrica ocupa de ciertos parámetros o características nominales, los cuales permiten identificar los valores operacionales del generador síncrono. El objetivo de estas prestaciones o propiedades eléctricas son para determinar el tipo de aplicación donde la máquina pueda funcionar sin ningún problema, evitando el daño que se pueda presentar si es utilizado para trabajos inadecuados.

Tabla 4 Parámetros del generador síncrono.

Parámetro	Descripción	Referencia
<b>Voltaje nominal</b>	El voltaje o tensión nominal es uno de los parámetros principales de las máquinas síncronas en vista que depende de la fabricación mecánica del generador, como también del flujo o carga para poder trabajar de forma continua de un punto a otro, el Instituto de	(Tonato Muñoz, 2020)

	Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) recomienda que los generadores deben estar diseñados para funcionar de modo óptimo a un +5% de su valor nominal como también de -5%.	
<b>Frecuencia</b>	Esta prestación eléctrica depende del sistema o red al que se encuentra conectado la máquina síncrona, estas funcionan a una frecuencia específica, entre las más habituales se tiene que en el caso de Estados Unidos de América 60 Hz, en Europa y algunos lugares de Latinoamérica 50 Hz y, por último, pero no menos importante en aplicaciones especiales se maneja frecuencias elevadas en el orden de los 400 Hz.	(Mazariegos Morales, 2005)
<b>Velocidad</b>	La velocidad es la propiedad que se encuentra en relación con la frecuencia, considerando que se conoce dicho parámetro, su velocidad es síncrona y única, tomando en cuenta el número de polos de la máquina.	(Chapman, 2012)
<b>Potencia aparente</b>	La potencia aparente nominal se encuentra en unidades de VA, consiste en la multiplicación entre la tensión y la corriente, siendo la capacidad que indican las máquinas síncronas.	(Comisión Federal de Electricidad, 2016)
<b>Potencia real nominal</b>	Este parámetro se representa en el sistema de unidades como Watt (W), es parte de la potencia aparente, sin embargo, la diferencia que caracteriza esta potencia es debido a que se denomina como, la energía aprovechada o útil al operar una máquina eléctrica.	(Navarrete Vele, 2017)
<b>Factor de potencia</b>	Esta propiedad eléctrica describe el ángulo que existe entre las potencias antes mencionadas (Potencia real-Potencia aparente), se debe tomar en consideración que si el desfase de estas potencias es mayor el factor de potencia será menor.	(Navarrete Vele, 2017)

---

**Corriente**

Denominada intensidad de corriente es la cantidad de carga eléctrica que atraviesa la sección de un conductor por unidad de tiempo, en otros términos, cuantos electrones circulan, la unidad que representa a este parámetro es el Amperio (A). (Verduga Toala & Zambrano Gallardo, 2017)

---

**1.3. Modelo dinámico**

El modelado dinámico de las maquinas síncronas se relacionan directamente a los estados temporales de las mismas, debido a las alteraciones que se producen en el flujo a través del tiempo, los comportamientos tomados en cuenta para el estudio dinámico vendrían a ser los periodos transitorios, sub transitorios y sostenidos, ya que experimentan cambios de cargas y fallas. (Bedriñana Aronés, 2016)

Este modelado está representado por medio del eje directo y el eje de cuadratura para conocer el lugar del rotor en relación con el estator, cabe mencionar que los modelos dinámicos realizados por medio de programas son un estimado de los modelos reales. (Ninazunta Anaguano, 2019)

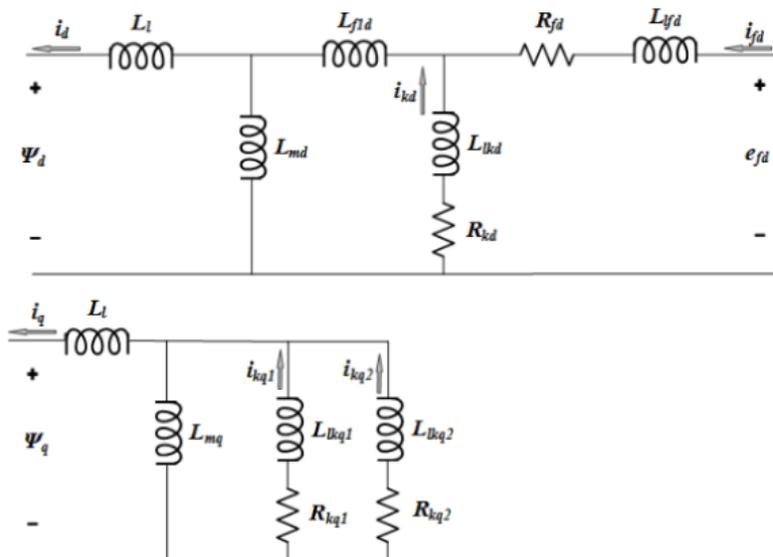


Figura 21 Circuito equivalente en el marco dq0.

Fuente: (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

Un ejemplo del circuito equivalente de la maquina síncrona se simboliza en la figura 21, el cual expresa el cuadro del rotor de la transformada en los ejes directos y de cuadratura cero. Las expresiones que se observan como R, L son inductancias de magnetización y dispersión, los subíndices F, K son conjuntos de los devanados de campo y amortiguamiento. (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

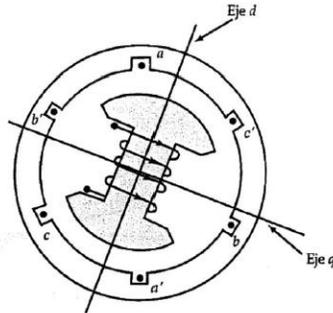


Figura 22 Generador síncrono bipolar con rotor de polos salientes.

Fuente: (Mazariego Elías, Morales Machuca, & Vásquez Roque, 2017)

Para este modelo de generadores síncronos, como se muestra en la figura 22, se fracciona en dos tipos de reactancias, la primera vendría hacer la componente de la reactancia a lo largo del eje polar el cual tiene como nombre eje directo, mientras que la segunda a lo largo del eje entre los polos se lo conoce como eje de cuadratura, además se tiene que la corriente en este caso denominada de armadura, como la reactancia, también se divide en dos, las cuales son la directa y la de cuadratura. La primera provoca el campo a lo largo del eje polar teniendo en cuenta el retraso respecto a la tensión directa en 90 grados, y la segunda componente provoca el campo a lo largo del eje entre los polos y está en fase con la tensión sin carga. (Mazariego Elías, Morales Machuca, & Vásquez Roque, 2017)

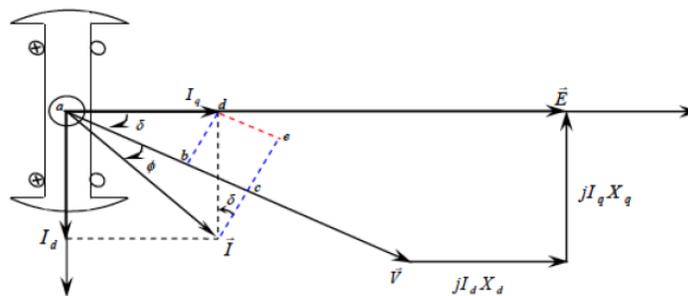


Figura 23 Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes.

Fuente: (Estrada Cruz, 2018)

En el diagrama fasorial del generador de polos salientes de la figura 23 se puede observar las proyecciones del flujo magnético que está en dos caminos relacionados al eje d y al eje q, representando sus reactancias con las expresiones  $X_q$  y  $X_d$  (eje de cuadratura y directo) y sus corrientes de armadura simbolizadas como  $I_q$  e  $I_d$ . (Estrada Cruz, 2018)

Al momento de producirse algún aumento de intensidad o suceso se considera que la energía pase de un estado a otro inmediatamente, viceversa está un ciclo donde los valores cambian en un tiempo determinado para que el sistema se adapte o establezca a las variables nuevas de funcionamiento.

Los mecanismos de la maquina son trascendentales para su funcionamiento durante los periodos transitorios, sub transitorios y estables ya que constituyen el circuito equivalente del generador. Si se produce en los terminales de la maquina una descarga, el estudio que se realiza es localizar la respuesta de los ejes tanto el eje d como el eje q, en primer punto de cada uno y en segundo combinando sus ejes. (Calero Freire, 2008)

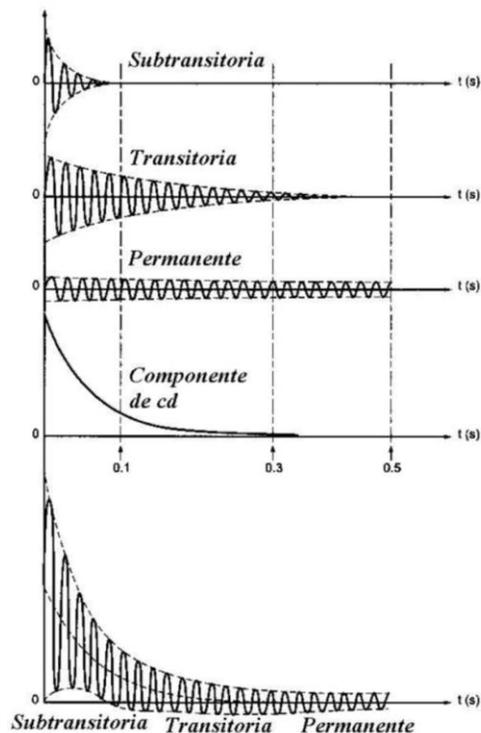


Figura 24 Períodos de tiempo para las corrientes de cortocircuito.

Fuente: (Trinidad Hernández, 2010)

Las cualidades fundamentales para el modelo dinámico están enfocadas en las reactivancias del generador síncrono con sus respectivas corrientes, teniendo presente el estado que se encuentra la máquina, como se muestra en la figura 24. Los estándares logran ser establecidos por medio de los términos para las características de funcionamiento las cuales podrían ser: la inductancia operacional del eje directo en transformada Laplace, la inductancia operacional del eje de cuadratura en transformada Laplace y la función de transferencia del estator con respecto al campo. Un método que se debe tener en cuenta es que las variables del sistema eléctrico de potencia estén expresadas en sistema de por unidad, por su facilidad de visualización y manejo para ser compatibles con softwares computacionales. (Trinidad Hernández, 2010)

- a) Periodo transitorio: Para este ciclo el campo del rotor es el causante, debido a que se produce en un tiempo más grande la descarga de la corriente. Mientras sucede la descarga se conduce una corriente alterna en el bobinado de campo el cual procede a ser una especie de amortiguador en la descarga. (Martínez Ferrán, 2017)
- b) Periodo sub transitorio: El causante es el arrollamiento el cual va en la parte superior de los polos del rotor del generador, al momento de producirse un cortocircuito por las conmutaciones del campo del estator y el campo del rotor, las intensidades que toman trayectoria hacia el amortiguador forman una especie de impedimento para que exista cierta estabilidad. (Martínez Ferrán, 2017)
- c) Periodo sostenido: En esta fase se extiende el ciclo permanente hasta cuando las protecciones se accionan y libran el aumento de intensidad entre la fuente de excitación del campo y la motriz. (Martínez Ferrán, 2017)

### **1.3.1. Utilidad del modelo dinámico**

El uso del modelo dinámico es relevante debido a que nos permite componer el generador o máquina síncrona por medio de programas computacionales implantando las constantes más significativas y descartando las que no lo son, también hay que examinar que parámetros son fáciles de adquirir para la simulación y para la realidad. Los modelos dinámicos contemplan las particularidades cambiantes en el tiempo y sus interacciones en estados y sub transitorios. (Vanfretti Fumagalli, 2005)

Estos modelos son generalmente manipulados para el análisis en sistemas eléctricos de potencia, ya que puede existir cierta variedad de acontecimientos o comportamientos que afectan al sistema y maquinas conectadas a la red. Debido a que se utiliza factores generales el modelo dinámico trabaja perfectamente con softwares, estructurando simulaciones con diferentes métodos o técnicas efectivas. (Ninazunta Anaguano, 2019)

### **1.3.2. Varios modelos desarrollados**

Existen diferentes modelos desarrollados para el análisis de estabilidad en sistemas de potencia, los cuales tienen sus propias características y ventajas frente a otros, estos nos permiten trabajar tanto en sistemas reales como simulados. Entre los más comunes se tiene los siguientes:

#### **1.3.2.1. Modelo dinámico en sistemas eléctricos de potencia**

Los sistemas eléctricos de potencia están conformados por varios componentes, por esta razón es primordial portar de un modelo que consideren los estados dinámicos, entre las complicaciones que se estiman están: magnitudes de perturbaciones, naturaleza dinámica, componentes del SEP. Estas dificultades deben ser limitadas para un modelo eficaz, teniendo en cuenta las inestabilidades de frecuencia, voltaje y velocidad, centrando el trabajo en el modelado y simulado para pequeñas y grandes señales de perturbación. (Lange Verdugo, 2020)

#### **1.3.2.2. Modelo en máquinas síncronas**

Estos generadores necesitan de modelos para realizar el análisis de las respuestas electromecánicas en evaluaciones de estabilidad del sistema, para esto es fundamental comprender la fórmula del movimiento angular del rotor. (Lange Verdugo, 2020)

Existen distintas configuraciones para el modelado dinámico del generador síncrono, algunas parten de la transformación de Park, de modo que consiste en que todas las fases de la maquina se conviertan en un par de ejes (d, q). (Cayón Orozco, 2017)

- a) Modelo dinámico simplificado: Para este método el generador síncrono de polos salientes se puede representar por medio de bloques básicos en Matlab & Simulink, donde se

implantan las propiedades mecánicas como eléctricas, siendo idóneo de mostrar su desempeño dinámico. (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

- b) Modelo dinámico detallado: Se realiza con la misión de erradicar la dependencia de la inductancia en el punto de vista del rotor. Considerando que el modelo es específico se ejecuta por medio de simulaciones y ecuaciones diferenciales. (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

#### **1.4. Estudio de estabilidad angular**

Al hablar de estudio de estabilidad del ángulo del rotor se hace referencia a que es la destreza del generador de continuar sincronizado y de recobrar la igualdad después de haber sido sometido por perturbaciones, caso contrario se originan cambios de velocidad en los rotores de los generadores vinculados. Se crea un traspaso de cargas entre los rotores que están desnivelados con respecto a su velocidad de rotación este fenómeno se llama diferencia angular, si se pierde la sincronización entre el generador y la red del sistema de potencia al que este acoplado, produce que la rapidez del rotor aumente o disminuya, deteriorando su equilibrio con respecto a la generación de voltajes a la frecuencia de la red. Todas estas desigualdades en el sistema eléctrico de potencia provocan que el sistema de protecciones separe al generador desequilibrado de la red. (Ezequiel Biteznic, 2015)

Un asunto fundamental de la estabilidad angular es el análisis de las oscilaciones del ángulo del rotor debido a que causa alteraciones en la máquina con respecto a su potencia. El fenómeno de la estabilidad puede depender entre la igualdad del par eléctrico y el mecánico del o de los generadores acoplados al sistema de potencia. (Arias Reyes, 2013)

Al momento de que se origine una pérdida del componente del torque sincronizante crea fluctuaciones aperiódicas, si bien se ocasiona fluctuaciones oscilatorias es en vista de la disminución del torque de amortiguamiento. (Requena Pérez, 2013)

### **1.4.1. Tipos de perturbaciones en el ángulo**

De acuerdo con la magnitud de las perturbaciones en el ángulo del rotor de la maquina síncrona es preciso clasificar la estabilidad angular en estabilidad de pequeña señal o perturbación y en estabilidad transitoria o de gran perturbación, estos tipos de perturbaciones en el ángulo pertenecen a la coordinación de estabilidad de todo el sistema eléctrico de potencia, a continuación, se detallarán de mejor manera. (Arenas, Mediavilla, García, & Garcés, 2013)

#### **1.4.1.1. Análisis de estabilidad angular de pequeñas señales**

También conocido como perturbación pequeña es la habilidad del sistema eléctrico de potencia para seguir en sincronización, estas señales o perturbaciones son pequeñas cuando admiten que las ecuaciones diferenciales se linealicen, para (Aguilar Quintanilla & Hernández Muñoz, 2019) se produce la inestabilidad angular de pequeña señal en dos formas.

- a) Inestabilidad no oscilatoria: Ampliación en el ángulo del rotor por el escaso torque de sincronismo, estos se erradican comúnmente por medio de reguladores de tensión.
- b) Inestabilidad oscilatoria: Fluctuaciones del rotor de extensión progresiva producto de insuficiente torque de amortiguación.

Los inconvenientes de estabilidad angular en pequeñas perturbaciones están asociadas al entorno local y global. La primera se refiere a las fluctuaciones angulares del rotor frente al resto del sistema eléctrico de potencia. La segunda menciona las fluctuaciones del conjunto de máquinas síncronas en una zona ante otro conjunto de máquinas síncronas en diferente área. (Aguilar Quintanilla & Hernández Muñoz, 2019)

Para (Lange Verdugo, 2020) el análisis o estudio de pequeñas señales en estabilidad angular se realiza por medio de las siguientes fases:

- a) Adquisición del modelo no lineal del sistema de potencia.
- b) Linealizar el modelo.
- c) Determinar la linealización en un momento de funcionamiento.

d) Ejecutar el análisis de estabilidad mediante la información recolectada.

En la actualidad los inconvenientes de estabilidad del ángulo del rotor suceden debido al poco torque de amortiguamiento respecto a las oscilaciones del sistema eléctrico de potencia, de acuerdo con (Mejía Cholo, 2013) estos se clasifican en:

- a) Modo máquina-sistema (local): Se determina este modo como las fluctuaciones del generador o maquina síncrona ante el sistema eléctrico de potencia sobrante, su nombre es característico debido a que se presentan los balanceos en una estación de generación eléctrica, estos se ubican en un rango de 0.8 y 1.8 Hz.
- b) Modo entre áreas: Se define como las fluctuaciones de un grupo electrógeno en una zona ante otro grupo ubicado en otra área del sistema de potencia, son enlazados a través de líneas de transmisión, su rango se sitúa en 0.2 y 0.7 Hz.
- c) Modo entre unidades: Su rango de oscilación está entre 1.5 y 3 Hz, este modo sucede al momento en que las máquinas de la estación eléctrica balacean en comparación unas con otras, su inestabilidad se origina por interacciones de los controles de los generadores.
- d) Modo de control: El rango de balanceo en este modo son valores superiores a 4 Hz. Vinculados con los sistemas de control, sus inestabilidades son provocadas por convertidores de corriente directa de alto voltaje, reguladores de velocidad y tensión.
- e) Modo de torsión: La frecuencia de oscilación está en 10 y 46 Hz. Este modo está vinculado a los elementos de rotación del eje del sistema turbina-generador. El desequilibrio se origina por la interfaz de los reguladores de excitación, controles de velocidad, líneas de compensación serie-paralelo y controles de corriente directa de alto voltaje.

#### **1.4.1.2. Análisis de estabilidad angular de grandes señales**

De igual manera llamada estabilidad transitoria o de grandes perturbaciones, como su nombre lo indica esta se encarga de que el sistema eléctrico de potencia continúe en sincronización después de haber sufrido una perturbación dura, la estabilidad de grandes perturbaciones

aparece de acuerdo con el estado inicial de funcionamiento o de la gravedad de inestabilidad del sistema de potencia. Como se ha venido mencionando, la virtud de estos tipos de análisis se puede realizar por medio de simulaciones a través del tiempo. (Campaña López, 2021)

Las causas que predominan en la estabilidad de grandes perturbaciones son: la carga de la maquina síncrona (es menos estable si la carga es elevada), la inercia de la maquina síncrona (obtiene mayor estabilidad al tener un valor elevado de inercia) y la selectividad de las protecciones (las protecciones del sistema eléctrico de potencia al estar coordinadas incrementan el equilibrio). (Lange Verdugo, 2020)

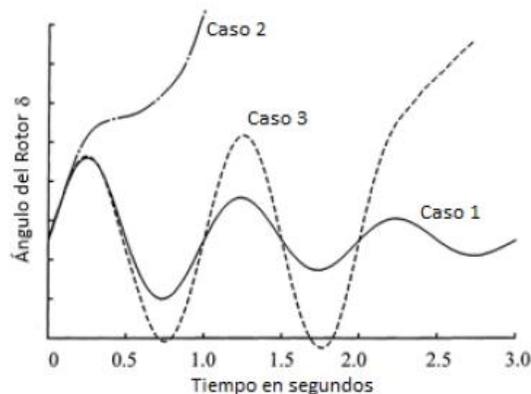


Figura 25 Respuesta del ángulo a una perturbación transitoria.

Fuente: (Aguilar Quintanilla & Hernández Muñoz, 2019)

En la figura 25 se muestra el comportamiento para tres casos. En el caso uno el ángulo se eleva hasta llegar a un punto limite y conforme transcurre el tiempo este tiende a bajar sus fluctuaciones en un periodo hasta lograr la estabilidad, en el caso dos el ángulo sigue elevándose y como consecuencia pierde sincronización, esta es producida por falta del torque de sincronización, también conocida como inestabilidad de primera oscilación y por ultimo pero no menos importante se tiene el caso tres el cual se caracteriza por el equilibrio que mantiene en la primera oscilación pero alcanza la inestabilidad puesto que estas oscilaciones se incrementan en su fase final. (Aguilar Quintanilla & Hernández Muñoz, 2019)

Para (Lange Verdugo, 2020) la estabilidad transitoria se puede estudiar mediante dos métodos los cuales a continuación se describirán:

- a) Método indirecto: Este método básicamente trata de incluir las fórmulas diferenciales por medio de un software que ayude a elaborar el estudio temporal del sistema eléctrico de potencia enfocado a la estabilidad angular, manifestando respuestas a las dificultades reales con respecto a sus variables eléctricas.
  
- b) Método directo: Este método tiende a evaluar la traslación de energía antes, durante y posterior a la falla, el ciclo de estudio es inferior a la etapa de primera fluctuación para deducir si la máxima desviación angular es mayor o menor al ángulo crítico.

### 1.4.2. Relación potencia-ángulo

El ángulo y potencia, su relación se debe a que la potencia varía dependiendo de la máquina síncrona y la red, también del rotor de esta y de su posición angular. La curva que representa esta relación se denomina no lineal como muestra la figura 26. (Esteban Espeja, 2014)

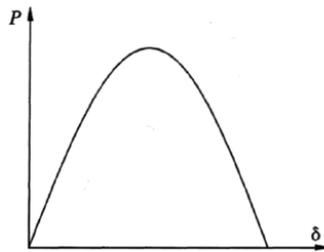


Figura 26 Curva relación ángulo-potencia.

Fuente: (Esteban Espeja, 2014)

Al momento que el ángulo del rotor logra los 90 grados, quiere decir que su potencia transmitida ha conseguido su máxima capacidad, siendo equitativo para sus tensiones internas y al contrario a la reactancia total, luego de alcanzar y superar los 90 grados la potencia tiende a reducir su intensidad. (Gallardo & Andagoya, 2014)

#### 1.4.2.1. Análisis de igualdad de áreas

Este tipo de análisis o perspectiva básicamente se define como una técnica gráfica de estimación para la estabilidad transitoria de manera que la ayuda que brinda es de forma esquemática puesto que simplifica la interpretación de las principales definiciones que normatizan las oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos. (Ledesma Larrea, 2020)

Usualmente se toma como ejemplo un generador o dos que alimentan a una barra infinita, este criterio se apoya en relacionar la potencia eléctrica para distintas circunstancias como pre falla, durante la falla y el post falla. Se fundamenta en la equivalencia de energía potencial y cinética, el generador síncrono está operando en estado estable cuya velocidad es síncrona como se indica en el punto 1 de la figura 27 y dando como resultado que la potencia mecánica y eléctrica sean idénticas. La potencia eléctrica está sujeta al ángulo del rotor, por consiguiente, si se llega a presentar un desperfecto, como consecuencia se suelta o expulsa la energía cinética acumulada en el rotor provocando que el generador no se encuentre operando normalmente. El generador al conseguir energía potencial produce desaceleración, por lo cual se tiene que la potencia eléctrica es mayor que la mecánica generando un nuevo ángulo rotacional (punto 2). (Arias Hernández, 2016)

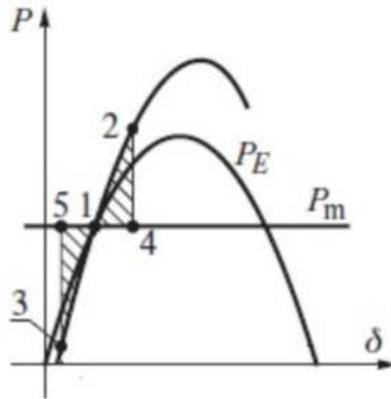


Figura 27 Criterio de áreas iguales.

Fuente: (Arias Hernández, 2016)

Posteriormente a la liberación de energía se lleva a cabo que el generador exceda el funcionamiento habitual y logre acelerar, percibiendo potencia o fuerza cinética (potencia eléctrica menor que la mecánica), alcanzando el punto 3 de la figura 27. Los puntos sombreados (1,2,4) al ser iguales a los puntos (1,3,5) se interpreta como la cúspide de la desviación del rotor, al no presentarse mitigación, la oscilación del sistema se encontrará entre los puntos 2 y 3 de la figura 27, logrando llegar el generador a velocidad síncrona. (Arias Hernández, 2016)

### **1.4.3. Análisis del tiempo crítico**

Es el tiempo para despejar la falla del sistema de potencia por consiguiente si el tiempo es bajo la estabilidad será mejor. Para detallar su concepto es el máximo tiempo que el generador síncrono consigue sostener una deficiencia antes de interrumpir la sincronización. (Granada Zapata, 2015)

Este tiempo crítico permite señalar el límite de tiempo en el que las protecciones pueden actuar ante la falla. Si las protecciones del sistema no son suficientemente rápidas y proceden después del CCT (tiempo crítico de despeje) la máquina síncrona entra en inestabilidad. Para (Díaz Osorio, 2017) hay dos direcciones para el cálculo del CCT que se muestran seguidamente:

- a) La primera se encarga de realizar algunas simulaciones en los periodos de falla y posteriormente de la misma con el fin de recolectar distintos tiempos de despeje de falla, acercándose lentamente hasta el CCT, gracias a la información de los ángulos del rotor a través del tiempo para el sistema post falla y el arreglo del tiempo de despeje.
- b) La segunda únicamente pretende una ejecución computacional para establecer la estabilidad del sistema eléctrico de potencia, por medio de la integración de las fórmulas mientras ocurre la falla.

Los análisis de estabilidad angular se encuentran en la categoría de corto plazo ya que los tiempos que se emplean se encuentran entre el rango de 3 a 5 segundos, no obstante, también son analizados para tiempos hasta los 10 segundos. (Gómez, 2008)

### **1.4.4. Estabilidad para sistemas Multi-Máquinas**

Los sistemas Multi-Máquinas al estar sujetos a perturbaciones originan fluctuaciones u oscilaciones en las máquinas síncronas, también cambios de potencia de salida. En el sistema eléctrico de potencia, produce diferencia en los voltajes de las barras, así como también flujos de potencia inestables, por esta razón la variable de análisis es el ángulo rotacional.

La estabilidad en este tipo de sistemas debe cumplir que la oscilación angular entre los generadores compense con fuerzas restablecedoras iguales o superiores que las fuerzas de

distorsión producto de las perturbaciones para que el sistema eléctrico de potencia opere en sincronismo. (Corona Sánchez, 2014)

# CAPÍTULO 2

## Determinación del funcionamiento del generador

En este capítulo se procederá a la determinación de operatividad de un generador síncrono de polos salientes en condiciones estables, tomando en cuenta todos los fundamentos matemáticos y especificaciones técnicas de la maquina síncrona; simulando su funcionalidad o marcha en estados normales de trabajo por medio del programa computacional MATLAB y su herramienta gráfica Simulink R2020a.

### 2.1. Descripción general

Para determinar la descripción general del generador síncrono de polos salientes se dimensionará la ubicación donde se efectuará el estudio, así como también la metodología a emplear para cumplir con los objetivos de este, proporcionando el acceso a esta información de manera simple y detallada.

#### 2.1.1. Lugar de estudio

La localización donde se encuentra el generador síncrono de polos salientes y por consiguiente se llevará a cabo el trabajo de grado es en la carrera de ingeniería eléctrica (CIELE) de la Universidad Técnica del Norte ubicada en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, Avenida 17 de Julio 15-21 y General José María Córdova, Sector El Olivo, Latitud:  $0,3579^\circ$  o  $0^\circ 21' 28,4''$  norte; Longitud:  $-78,1119^\circ$  o  $78^\circ 6' 42,7''$  oeste; Altitud: 2.209 metros (7.247 pies), como se muestra en la figura 28.



Figura 28 Ubicación Física.

Fuente: (Autor, 2021)

### 2.1.2. Metodología

En el siguiente diagrama de flujo (figura 29) se puede observar el procedimiento a seguir para cumplir con el objetivo del capítulo, el cual es diagnosticar el funcionamiento del generador en situaciones equilibradas dentro de un pequeño sistema eléctrico de potencia, cuya representación procedería como la red conectada a CIELE.

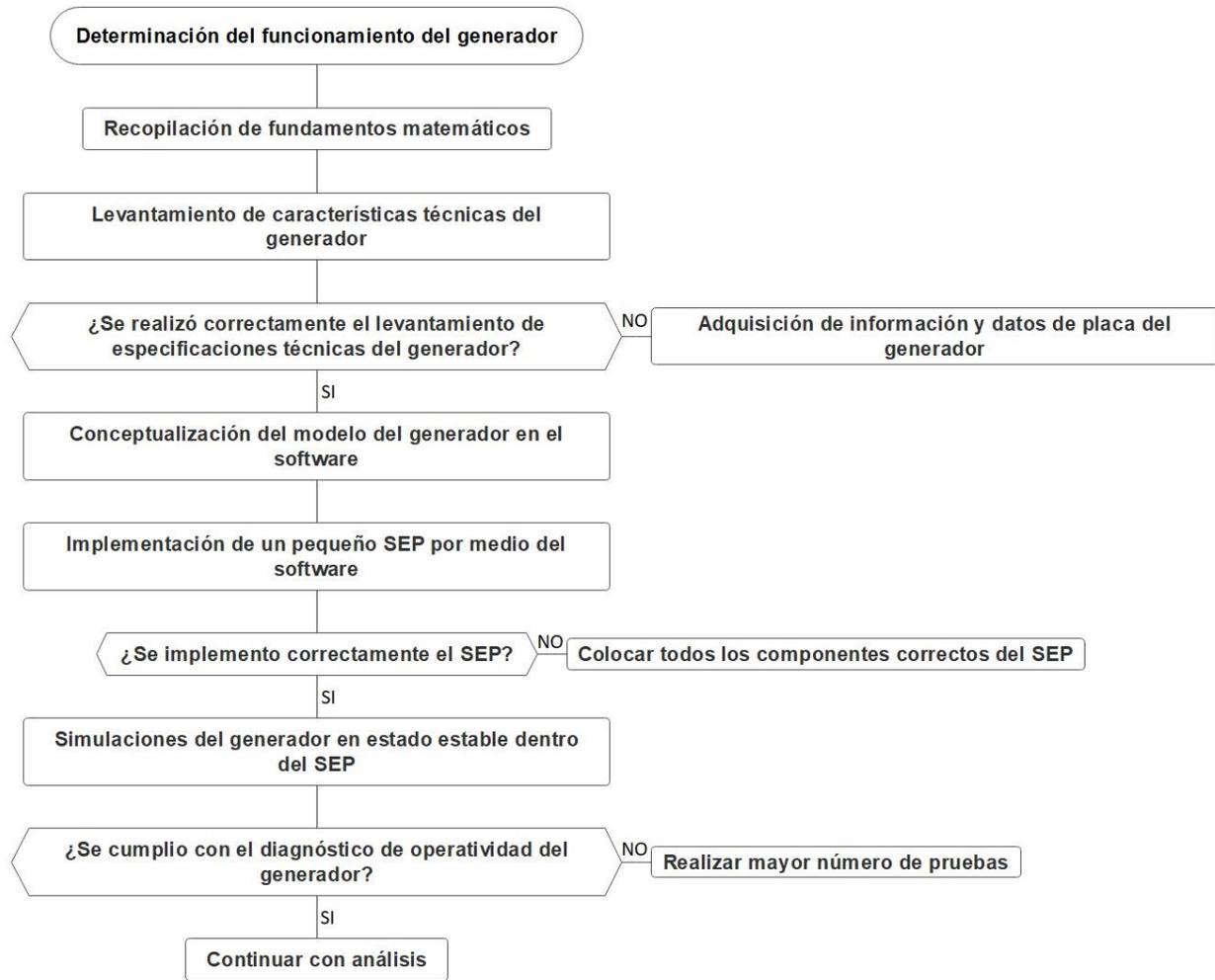


Figura 29 Metodología empleada para la determinación del funcionamiento del generador en estado estable.

Fuente: (Autor,2021)

Previamente se cumplió con la búsqueda de información y fundamentación teórica para poder comprender sobre la estabilidad angular en sistemas eléctricos de potencia.

Para establecer el desempeño del generador síncrono de polos salientes en el SEP en estado estable se parte de compilar los fundamentos matemáticos útiles, las cuales comprenden en ecuaciones o formulas, posteriormente se ejecutará el levantamiento de datos técnicos los cuales serán incluidos en el programa computacional. A continuación, por medio del programa se efectuará el modelo del generador y se llevará a cabo la implementación del sistema eléctrico de potencia de prueba para luego transcurrir a las pruebas de medición (simulaciones) y obtener los resultados que arroja el programa.

## 2.2. Recopilación de fundamentos matemáticos

A continuación, se puede observar un conjunto de ecuaciones o formulas, las cuales ayudan a entender el comportamiento dinámico de un sistema eléctrico de potencia, compilando principios matemáticos para el análisis de estabilidad angular.

### 2.2.1. Dinámica de una maquina síncrona

Para poder conocer o calcular la energía cinética del rotor en una maquina síncrona se debe emplear la ecuación (1) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$EC = \frac{1}{2} J \omega_{sm}^2 \times 10^{-6} MJ \quad (1)$$

Esta ecuación está compuesta por varios elementos que se refieren a:

- J = momento de inercia del rotor en kg-m<sup>2</sup>
- $\omega_{sm}$  = velocidad síncrona rad (mecánico) /s
- M = momento de inercia

Se debe tener en cuenta que la inercia se la puede mostrar de dos maneras tales como se mira en las ecuaciones (2) y (3) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$GH = K.E. = \frac{1}{2} M \omega_s MJ \quad (2)$$

Donde: G= representa la capacidad nominal de la maquina (base) MVA (trifásica)

H= representa la constante de inercia

$$M_{(pu)} = \frac{H}{\pi f} s^2 /radianes \quad (3)$$

Hay que tener en cuenta que la constante H es un parámetro suministrado por las máquinas para realizar estudios de estabilidad.

## 2.2.2. Oscilación

En la figura 30 se puede visualizar el par, velocidad y flujo de las potencias tanto eléctricas como mecánicas de una maquina síncrona. Se conoce que el torque de viento, fricción y pérdida de hierro es despreciable.

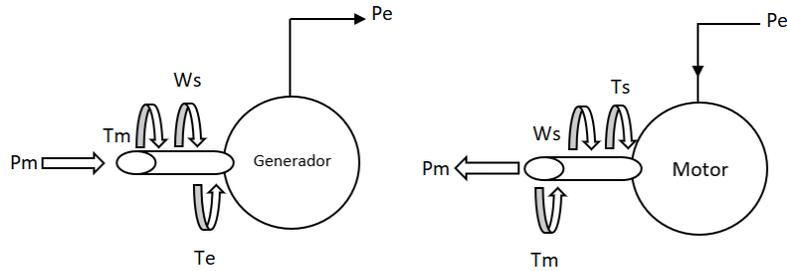


Figura 30 Flujo de potencias eléctricas y mecánicas de una maquina síncrona.

Fuente: (Autor, 2022)

La ecuación (4) es la que se emplea para conocer la dinámica del rotor:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad Nm \quad (4)$$

- $\theta_m$  = ángulo en radianes(mecánico)
- $T_m$  = par de la turbina en Nm, este adquiere un valor negativo para una maquina motorizada
- $T_e$  = par electromecánico desarrollado en Nm
- $J$  = momento de inercia total de la masa del rotor en kgs-m\*m

Cabe mencionar que la ecuación (4) que se encuentra sometida a la dinámica, el rotor cambia en una magnitud insignificante para cierto tiempo que interese, por ende, esta ecuación (4) puede transformarse a su forma de potencia más útil como se muestra en la ecuación (5) suponiendo que la velocidad del rotor permanece constante a la velocidad síncrona. (Kothari & Nagrath, 2011)

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = Pa = P_m - P_e \quad pu \quad (5)$$

Esta ecuación (5) representa la oscilación y de igual forma describe la dinámica del rotor de una máquina síncrona, haciendo énfasis en que potencia de aceleración es igual a  $P_m$  menos  $P_e$ .

### 2.2.3. Modelo de máquina simplificado

Para conocer el voltaje terminal de fase inducida en condiciones estables de una máquina de polos salientes se debe aplicar la ecuación (6).

$$E = V + jX_d I_d + jX_q I_q ; X_d > X_q \quad (6)$$

Para poder encontrar la intensidad se emplea la ecuación (7):

$$I = I_d + I_q \quad (7)$$

### 2.2.4. Curva potencia ángulo

Debido a los efectos de estudios de estabilidad  $|E'|$  la fem transitoria del generador/motor, en este caso permanece constante siendo la variable independiente determinada por el lazo regulador del voltaje  $V$ . El voltaje calculado en las terminales del generador da como resultado una variable independiente. Los nodos de la red de estudio de estabilidad corresponden a la fem terminal como se indica en la figura 31, por otra parte, la reactancia es absorbida por la red como un estudio de carga. Las cargas que no sean grandes motores síncronos será reemplazados por admitancias estáticas equivalentes.

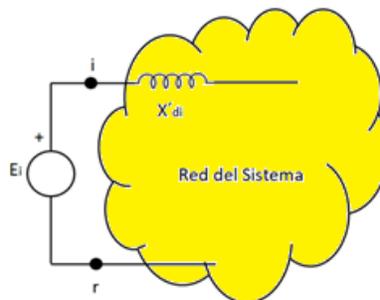


Figura 31 Red de estabilidad del sistema.

Fuente: (Autor, 2022)

Para un sistema de dos barras de la figura 32 se tiene la ecuación (8):

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}; Y_{12} = Y_{21} \quad (8)$$

La potencia compleja en el bus se encuentra dada por la ecuación (9):

$$P_i + jQ_i = E_i I_i^* \quad (9)$$

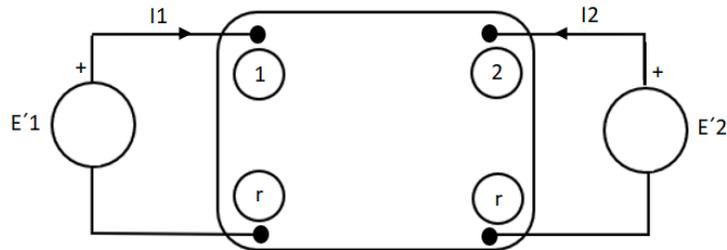


Figura 32 Red de estudio de estabilidad de dos barras.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

### 2.2.5. Técnica de eliminación de nodos

Dentro de los estudios de estabilidad, se ha dicho que las barras a tomar en cuenta son aquellas que están excitadas por los voltajes internos de la maquina y no por las barras de carga que se encuentran excitadas por las tensiones terminales de los generadores. Por ende, en la elaboración de  $Y(\text{bus})$  para realizar el estudio de estabilidad, se deben eliminar los buses de carga. Existen tres diferentes métodos para eliminación del bus.

- Conversión estrella-triángulo
- Equivalente de Thevenin
- Técnica de eliminación de nodos



## 2.2.6. Sistemas simples

A continuación, se definirá dos tipos de sistemas simples que pueden ser analizados para estudios de estabilidad en SEP.

### 2.2.6.1. Máquina conectada a bus infinito

La figura 35 muestra el modelo de circuito de una máquina conectada a un bus infinito por medio de una línea de reactancia  $X_e$ .

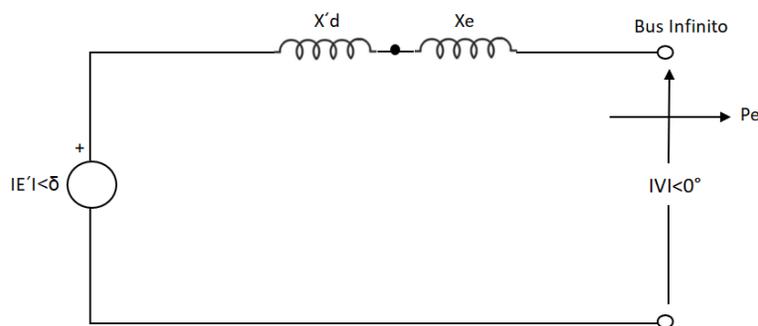


Figura 35 Máquina conectada a un bus infinito.

Fuente: (Autor, 2022)

Para poder resolver este circuito se tiene que emplear o dar uso de la ecuación (12) (Kothari & Nagrath, 2011). Para encontrar la reactancia total:

$$X_{transferencia} = X'_d + X_e \quad (12)$$

De igual manera para conocer la potencia generada se hace uso mediante la ecuación (13):

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{transferencia}} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (13)$$

### 2.2.6.2. Sistema de dos máquinas

Cuando se presenta este caso de dos máquinas finitas conectadas por medio de una línea  $X_e$ , como se puede observar en la figura 36, en la cual una de las maquinas debe trabajar como un generador y la otra como un motor.

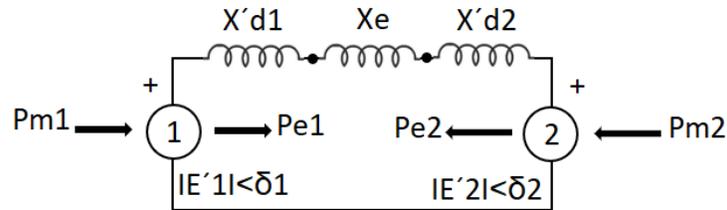


Figura 36 Sistema de dos máquinas.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Cuando el sistema se encuentra en condiciones estacionarias, antes de que entre en dinámica, se tiene la ecuación (14).

$$P_{m1} = -P_{m2} = P_m \quad (14)$$

Entonces, se presume que la entrada y salida de las dos máquinas permanece constante a lo largo de la dinámica. Cuando la maquina se encuentra en estado estacionario o en condición dinámica, la potencia eléctrica de salida del generador debe ser absorbida por el motor.

Las ecuaciones (15) y (16), representan la oscilación para las dos máquinas:

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \pi f \left( \frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} \right) = \pi f \left( \frac{P_m - P_e}{H_1} \right) \quad (15)$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \pi f \left( \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2} \right) = \pi f \left( \frac{P_e - P_m}{H_2} \right) \quad (16)$$

### 2.2.7. Estabilidad en estado estacionario

Se tiene que el límite de estabilidad en estado estable en un circuito específico de un sistema de potencia se lo conoce como la potencia máxima que se puede transferir al extremo receptor sin pérdidas algunas de sincronismo.

Teniendo en cuenta la figura 35 se describirá la dinámica por medio de las ecuaciones (17) y (18) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$M = \frac{H}{\pi f} \text{ en sistema pu} \quad (17)$$

$$P_e = \frac{|E||V|}{X_d} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (18)$$

Para lograr determinar la estabilidad en estado estacionario en las ecuaciones (17) y (18) se debe emplear la reactancia del eje directo ( $X_d$ ) y así mismo el voltaje detrás de  $X_d$ .

#### NOTA

Conocer sobre el límite de estabilidad en estado estacionario es muy importante debido a varios motivos; se dice que un sistema puede trabajar por encima de su límite de estabilidad transitoria, pero nunca por encima de su límite de estado estable. Es decir, con mayores velocidades de despeje de fallas, es posible hacer que el límite transitorio se acerque mucho más al límite de estado estable.

Si las líneas de transmisión tienen una reactancia bastante alta, se tendrá que el límite de estabilidad se logra aumentar empleando dos líneas paralelas, esto también aumenta la confiabilidad del sistema. También hay que saber que cuando se usa dos capacitores en serie en líneas se logra tener una mejor regulación de voltaje y elevar el límite de estabilidad al reducir la reactancia de línea. De igual forma se usa voltajes de excitación más altos y un sistema de excitación rápido para así mejorar el límite de estabilidad. (Kothari & Nagrath, 2011)

### 2.2.8. Estabilidad transitoria

La dinámica de una sola máquina síncrona conectada a barras colectoras infinitas está dada por la ecuación (19), esta ecuación se la conoce como la ecuación de oscilación:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin \delta \quad (19)$$

Se dice que no existe una solución cerrada para lograr resolver esta ecuación de oscilación, menos en el caso sencillo  $P=0$ , pero este no es un caso muy práctico, este comprende integrales elípticas. No existen criterios generalizados disponibles para encontrar la estabilidad del sistema con grandes perturbaciones (estabilidad transitoria).

Un buen enfoque para el problema de estabilidad transitoria es, por ende, enumerar cada una de las perturbaciones graves importantes juntamente con sus posibles ubicaciones a las que es posible que el sistema se encuentre sujeto en base a la experiencia y el juicio del analista del sistema de potencia.

Para hacer un poco más fácil el análisis, siempre se debe realizar varias suposiciones y simplificaciones que serán mencionadas a continuación:

- Se ignora la línea de transmisión y la resistencia de la máquina síncrona.
- Seguidamente se ignora el término de amortiguamiento dados por los devanados amortiguadores de la máquina síncrona.
- Se presume que la velocidad del rotor es síncrona.
- Se presume que la que la entrada mecánica hacia la máquina permanece constante durante el transitorio.
- Se presume que el voltaje detrás de la reactancia transitoria permanece constante.
- Las capacitancias en derivación se dice que no son difíciles de tomar en cuenta en un análisis de estabilidad.
- Con respecto a las cargas estas se diseñan como admitancias constantes.

Para realizar un estudio de estabilidad de un sistema de barras colectoras infinitas de una sola máquina como se aprecia en la figura 37, se debe seguir una serie de pasos:

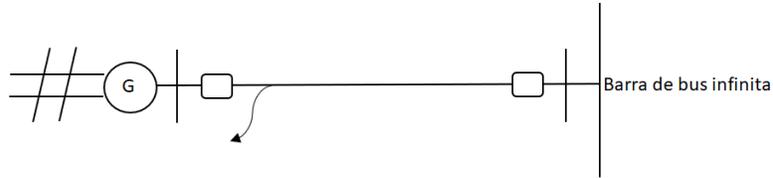


Figura 37 Sistema de barras colectoras infinitas en una sola máquina.

Fuente: (Autor, 2022)

- Partiendo de la carga anterior a la falla, se debe encontrar el voltaje detrás de la reactancia transitoria y el ángulo de par  $\delta_0$  de la máquina con respecto a la barra infinita.
- Para la falla encontrada, se encuentra la ecuación de transferencia de potencia  $P_e(\delta)$  durante la falla.
- Después de haber encontrado la ecuación de oscilación, se debe encontrar  $\delta$  como una función del tiempo empleando un método para solucionar la ecuación diferencial no lineal.
- Encontrar  $P_e(\delta)$  y prosiga calculando  $\delta(t)$ , tener en cuenta que  $P_e = 0$ , ya que al eliminar la falla el sistema se desconecta.
- Después de encenderse la línea de transmisión, se debe encontrar  $P_e(\delta)$  y siga localizando  $\delta(t)$ .
- Cuando  $\delta(t)$  pasa un valor máximo y empieza a disminuirse, se dice que el sistema se lo considera estable y de lo contrario será inestable si  $\delta(t)$  continúa aumentando.

### 2.2.9. Criterio de igualdad de áreas

Dentro de un sistema en el cual una máquina está oscilando con respecto a un bus infinito, existe la posibilidad de estudiar la estabilidad transitoria por medio de un criterio simple, sin dar uso a la solución numérica de una ecuación de oscilación.

Cuando el sistema es inestable  $\delta$  sigue aumentando indefinidamente con el pasar del tiempo y es así como la máquina pierde sincronismo. Por otra parte, si el sistema es estable,  $\delta(t)$  ejecuta oscilaciones cuya amplitud reduce en la práctica debido a términos de amortiguamiento, estas acciones se las puede ver en la figura 38.

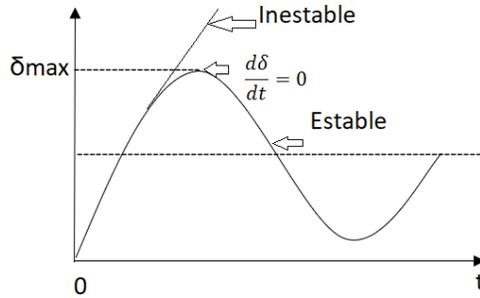


Figura 38 Gráfica de  $\delta$  vs  $t$  para sistemas estables e inestables.

Fuente: (Autor, 2022)

Dado que el sistema, es no lineal, la respuesta de  $\delta(t)$  no es única y puede presentar inestabilidad de forma diferente a la de la figura 38, según la naturaleza y severidad de la perturbación.

Para un sistema estable, la estabilidad estará dada por la primera observación de la primera oscilación donde  $\delta$  ira a un máximo y empezará a disminuirse. El sistema será estable si se da la ecuación (20):

$$\frac{d\delta}{dt} = 0 \quad (20)$$

Y será inestable si se tiene la ecuación (21):

$$\frac{d\delta}{dt} > 0 \quad (21)$$

Para los sistemas de potencia mencionados anteriormente se dice que se los puede transformar en un criterio mucho más sencillo, este tipo de criterio se lo puede emplear para un sistema de bus infinito de una sola máquina, así como se indica en la ecuación (22).

$$\frac{d\delta}{dt} = \left( \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta \right)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Donde:

$\delta_0$  = ángulo inicial del rotor antes de que se dé la oscilación debido a la perturbación

$P_a$  = potencia de aceleración

Entonces, basado en la ecuación (21) y (22), la condición de estabilidad se puede escribir como se aprecia en la ecuación (23) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = 0 \quad (23)$$

## NOTA

Con todo lo descrito se puede decir que, el área positiva de la *aceleración* bajo la curva  $P_a - \delta$  debe ser igual al área negativa *desaceleración*, es por esta razón que se lo conoce como criterio de estabilidad de igualdad de áreas.

### 2.2.9.1. Cambio repentino en la entrada mecánica

A continuación, se puede observar en la figura 39, el diseño dinámico o transitorio de un generador síncrono conectada a una barra colectora infinita.

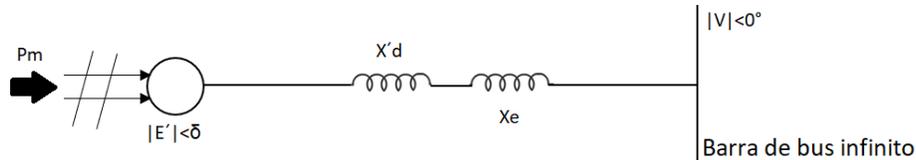


Figura 39 Máquina conectada a una barra colectora infinita.

Fuente: (Autor, 2022)

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X'd + X_e} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (24)$$

Donde:

$P_e$  =Potencia eléctrica transmitida

$X'd$ = Reactancia síncrona transitoria

$X_e$ = Línea de reactancia

$E'$ = Voltaje terminal de fem inducida por fase en condiciones transitorias

Se debe tomar en cuenta que en condiciones de funcionamiento estable la  $P_{m0} = P_{e0} = P_{max} \sin \delta_0$ , en la figura 40 se puede apreciar su condición constante en el punto (a). Al abrir la llave se

obtiene que la entrada mecánica al rotor se eleve de manera inesperada hasta  $P_{m1}$ . Posteriormente la potencia de aceleración de la maquina  $P_a = P_{m1} - P_e$  origina que el ángulo y la velocidad rotacional crezcan ( $\omega > \omega_s$ ). En la misma figura en el punto  $\delta_1$  se tiene que  $P_a = P_{m1} - P_e$  esto también se puede interpretar como igual a  $P_{max} \sin \delta_1$  o igual a cero (b), sin embargo, sigue creciendo su ángulo y velocidad rotacional. Luego de todo este proceso la potencia de aceleración empieza a disminuir, como también su velocidad rotacional, a pesar de ello su ángulo sigue elevándose hasta llegar  $\delta_2$ , finalmente se obtiene ( $\omega = \omega_s$ ) (c) en este último punto las áreas tanto de aceleración y desaceleración ( $A_1, A_2$ ) respectivamente son iguales.

Al momento que el rotor está frenando su ángulo y velocidad disminuye por debajo de  $\omega_s$ , el punto de región actualmente pasa la curva  $P_e - \delta$ , pero esta vez en trayectoria inversa. Ahora el régimen oscila alrededor del nuevo estado estable (b) ( $\delta = \delta_1$ ) con salida angular  $\delta_0 = \delta_2$ , mientras las vibraciones disminuyen consecuentemente por el amortiguamiento, el régimen se establece en el recién estado estable donde  $P_{m1} = P_e = P_{max} \sin \delta_1$

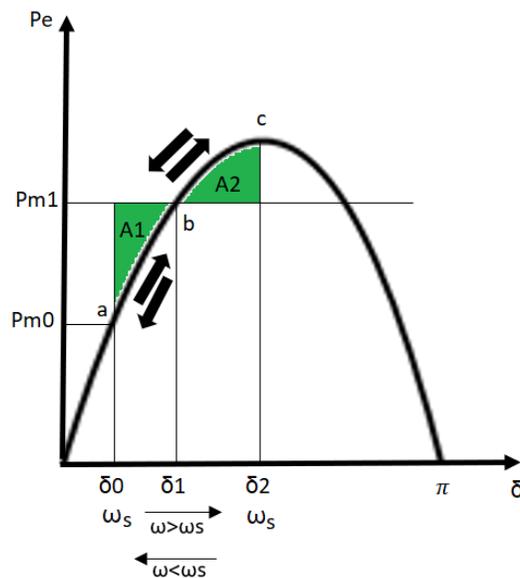


Figura 40 Repentino aumento en la entrada mecánica a un generador.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Las áreas de aceleración y desaceleración están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta \quad (25)$$

$$A2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (Pe - Pm1)d\delta \quad (26)$$

Al hallar  $\delta_2$  y por consecuencia  $A1=A2$  se tiene que el sistema eléctrico de potencia opere en condiciones aceptables y constantes. Con el transcurso del tiempo  $Pm1$  aumenta y así se llega a una etapa final donde  $A1$  es la misma a la zona por encima de  $Pm1$  y así se obtiene el máximo valor de  $\delta_2$ , como se muestra en la ecuación (27) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$\delta_2 = \delta_{max} = \pi - \delta_1 = \pi - \sin^{-1} \frac{Pm1}{Pmax} \quad (27)$$

Para la figura 41 se considera que la zona favorable para el área numero dos ( $A2$ ) es mínima que la del área uno ( $A1$ ). En conclusión, se tiene que al desbordar energía cinética el ángulo  $\delta$  crece proporcionalmente sobrepasando el punto (c) y el sistema de potencia eléctrico varíe de estable a inestable debido a que las potencias se modifican de desaceleración a aceleración. De modo para que el SEP se encuentre operando en condiciones estables o constantes se ha verificado que existe un límite superior para la elevación inesperada de la entrada mecánica ( $Pm1-Pm0$ ).

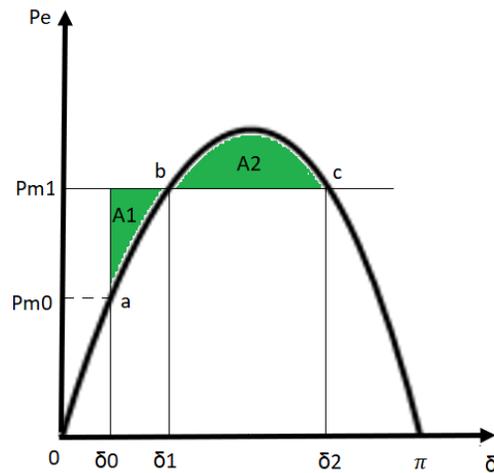


Figura 41 Caso límite de régimen transitorio con entrada mecánica de aumento repentino.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

## NOTA

En la figura 41 se puede apreciar que si el ángulo rotacional ( $\delta$ ) oscila más de  $90^\circ$  sigue en condiciones estables, con tal que efectúe el criterio de áreas iguales.

### 2.2.9.2. Efecto del tiempo de despeje sobre la estabilidad

Cuando el sistema de la figura 42 trabaja con una entrada mecánica  $P_m$  en un ángulo constante de  $\delta_0$  ( $P_m=P_e$ ) como se observa el punto a en el diagrama  $P_e-\delta$  de la figura 43 al momento de darse una falla en el punto P de la línea radial de salida, se tiene que la salida eléctrica del generador se reduce rápidamente a cero, en otras palabras,  $P_e=0$  entonces el punto de estado cae a b.

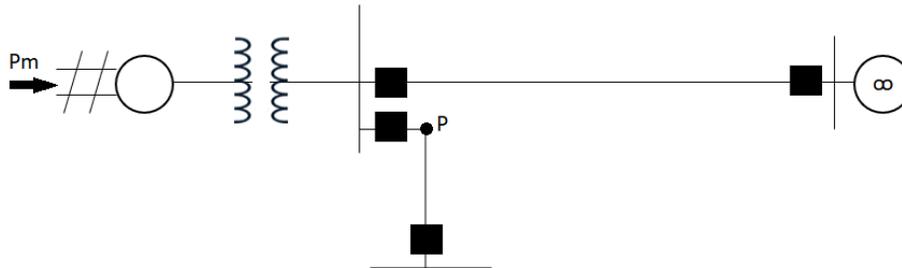


Figura 42 Sistema en operación.

Fuente: (Autor, 2022)

Así mismo el área de aceleración  $A_1$  empieza a crecer de igual manera el ángulo del rotor, en cuanto al estado el punto se traslada a lo largo de b-c. Mientras tanto el tiempo  $t_c$  que pertenece al ángulo  $\delta_c$ , la línea de falla se despeja abriendo la línea del disyuntor. Los valores de  $t_c$  y  $\delta_c$  son el tiempo y ángulo de despeje.

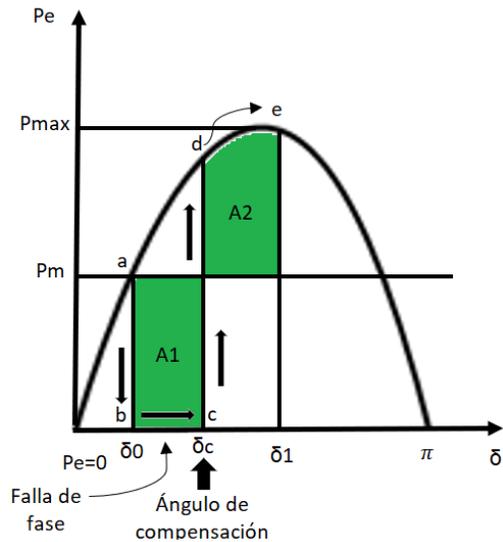


Figura 43 Ángulo de despeje.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Se dice que el sistema regresa a estar en bus estado y transmite  $P_e = P_{max} \sin \delta$ , por lo tanto, el punto de estado cambia a  $d$  en la curva  $P_e - \delta$  original. Ahora el rotor desacelera y el área de desaceleración  $A_2$  empieza mientras el punto de estado se mueve a lo largo de  $d-e$ . El sistema será estable cuando se logre encontrar un ángulo  $\delta_1$  tal que  $A_2 = A_1$ . Entonces, el criterio de áreas iguales brinda solo una respuesta cualitativa a la estabilidad del sistema, debido a que es arduo establecer el momento en el cual se debe abrir el interruptor.

Al momento en que se retarda la limpieza de la línea con defecto,  $A_1$  crece y también lo hace  $\delta_1$  para lograr hallar  $A_2 = A_1$  hasta  $\delta_1 = \delta_{max}$ , como se puede observar en la figura 44.

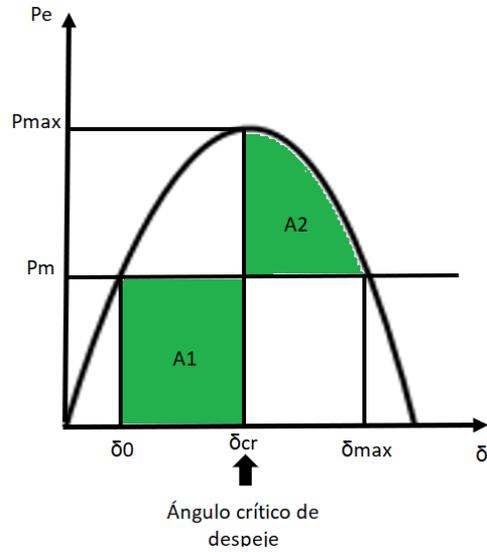


Figura 44 Ángulo crítico de despeje.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Cuando se tiene un ángulo o tiempo de limpieza mayor a los valores mencionados con anterioridad, el sistema se convertirá en inestable ( $A_2 < A_1$ ). El valor máximo permitido del ángulo y tiempo de despeje para que el sistema permanezca estable se conocen correspondientemente como tiempo y ángulo de despeje críticos.

Para el caso ( $Pe=0$  durante la falla), la relación explícita para  $\delta_c$  y  $t_c$  se darán a conocer en las siguientes ecuaciones (28) y (29):

En la figura 44 se puede observar que:

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \tag{28}$$

También,

$$P_m = P_{max} \sin \delta_0 \tag{29}$$

Las ecuaciones (30) y (31) representan a las áreas A1 y A2:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - 0) d\delta = P_m (\delta_{cr} - \delta_0) \tag{30}$$

$$A2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (31)$$

Para tener un sistema estable, el área A2 deben ser igual A1 (A2=A1), como se muestra en la ecuación (32) (Kothari & Nagrath, 2011):

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max} \quad (32)$$

Donde:

$\delta_{cr}$  = ángulo crítico de limpieza

Reemplazando y despejando las ecuaciones (28) y (29) en la (32), integrando y simplificando la solución se tiene que el ángulo crítico es igual a la ecuación ( ).

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

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{2\pi f P_m}} \quad ( )$$

Despejando tcr de la ecuación (33) se tiene la ecuación (34), el cual vendría ser la ecuación para encontrar el tiempo crítico.

### 2.2.9.3. Pérdida repentina de una de las líneas paralelas

Ahora se toma en cuenta una sola máquina unida a un bus infinito por medio de dos líneas paralelas como se aprecia en la figura 45, el modelo del circuito del sistema de encuentra en la misma figura del literal b. (Kothari & Nagrath, 2011)

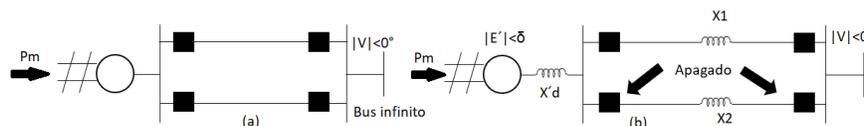


Figura 45 Una sola máquina unida a un infinito a través de dos líneas paralelas.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Ahora se analiza la estabilidad transitoria del sistema cuando una de las líneas se corta inesperadamente con el sistema trabajando a una carga constante. Antes de apagar el sistema, la curva de ángulo de potencia viene dada por la ecuación (35):

$$P_{el} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_1 |X_2|} \sin \delta = P_{maxI} \sin \delta \quad (35)$$

En la ecuación (35) se observa que la reactancia es la sumatoria total de todas las reactancias de todo el sistema.

Después de apagar la línea 2, la curva de ángulo de potencia está dada por la ecuación (36):

$$P_{ell} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_1} \sin \delta = P_{maxII} \sin \delta \quad (36)$$

La reactancia de la ecuación (36) es producto después de la falla, haciendo que sea la sumatoria de todas las reactancias menos de la reactancia donde ocurrió la falla.

Estas dos curvas se encuentran simbolizadas en la figura 46:

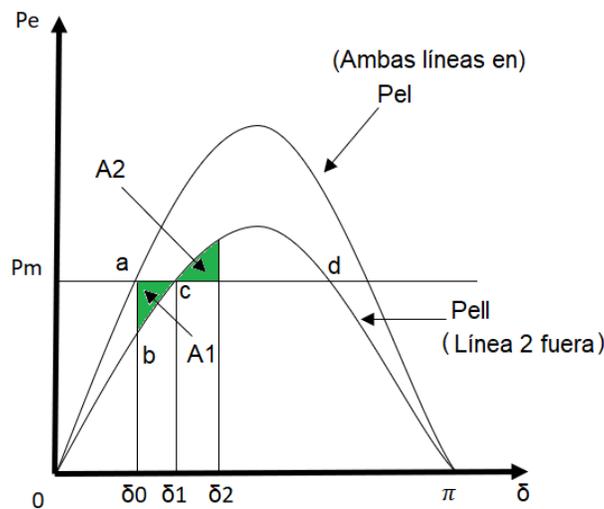


Figura 46 Criterio de igual área aplicado a la apertura de una de las dos líneas en paralelo.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

El sistema está trabajando primeramente con una transferencia de potencia constante  $P_d=P_m$  en un ángulo de par  $\delta_0$  en la cura I.

Al momento de desconectar la línea 2, el punto de trabajo del área A1 se coloca en el rotor seguida de energía de desaceleración para  $\delta = \delta_1$ . El sistema será estable cuando, se logre hallar un área A2 correspondiente a la energía de desaceleración ( $A_1=A_2$ ) y trabajará en c que pertenece a un nuevo ángulo de rotor  $\delta_1= \delta_0$ . Esto sucede porque una sola línea brinda una mayor reactancia y se necesita un mayor ángulo de rotor para transferir la misma potencia constante.

Cuando la carga constante incrementa, se logra conseguir un límite en el cual no se pueda hallar un área de desaceleración igual a A1, entonces el sistema se comportará como inestable.

También se puede suscitar un corto circuito repentino en una de las líneas paralelas, produciendo el uso de la ecuación ( ) para el criterio de áreas iguales, debido a que se considera algo de flujo de energía al encontrarse la falla lejos de los extremos de las barras. (Kothari & Nagrath, 2011)

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{max} \sin \delta) d\delta ; A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad ( )$$

$$P_{ell} = \frac{|E'| |V|}{X_{ll}} \sin \delta = P_{maxIII} \sin \delta \quad ( )$$

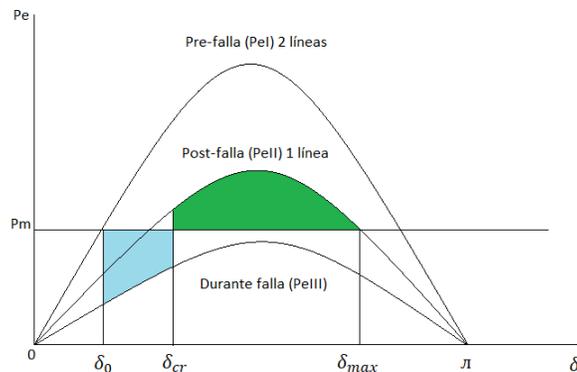


Figura 47 Cortocircuito repentino lejos de los extremos de las barras.

Fuente: (Autor, 2022)

Teniendo como resultado la figura 47 en donde la potencia eléctrica se divide en tres de acuerdo con el estado en el que se encuentra el SEP, integrándose la nueva ecuación ( ) que sería la  $P_e$  durante la falla. Donde  $X_{III} = jX_{th} + jX_e$ , es la reactancia Thevenin más la sumatoria de la reactancia de la línea donde no ocurrió la falla.

### 2.3. Solución por partes o punto-punto

La solución por partes o numérica se ejecuta para todos aquellos sistemas de potencia grandes, por consecuencia se los elabora por medio de herramientas computacionales para establecer  $\delta$  en función de  $t$  e interpretar su gráfica de oscilación, para poder establecer el tiempo crítico de despeje de falla se debe realizar por medio de su ecuación de oscilación para distintos tiempos de dispersión. La potencia de aceleración y la variación de velocidad se deduce como:

- La potencia de aceleración encontrada al inicio de un lapso es constante desde el centro del lapso que le precede hasta el centro del lapso apreciado.
- Mediante cualquier lapso, la velocidad angular del rotor es constante e igual al valor determinado para la mitad del lapso.

Al final del lapso (n-1), la potencia de aceleración queda como la ecuación (39).

$$Pa_{(n-1)} = P_m - P_{max} \sin \delta_{(n-1)} \quad (39)$$

Para esto  $\delta_{(n-1)}$  es calculado con anterioridad, la variación de velocidad ( $w=d\delta/dt$ ), provocado por  $Pa_{(n-1)}$  es constante sobre  $\Delta t$  de (n-3/2) a (n-1/2) es:

$$\omega_{n-1/2} - \omega_{n-3/2} = (\Delta t/M) Pa_{(n-1)} \quad (40)$$

La variación en  $\delta$  desde el lapso (n-1) es:

$$\Delta \delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \omega_{n-3/2} \quad (41)$$

Y a lo largo del lapso enésimo es:

$$\Delta \delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \omega_{n-1/2} \quad (42)$$

Restando la fórmula (41) y (42) y usando la fórmula (40) se llega a la siguiente ecuación (43) (Kothari & Nagrath, 2011).

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M} Pa_{(n-1)} \quad (43)$$

Y finalmente se obtiene la ecuación escrita de siguiente manera:

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \quad (44)$$

Hay que tener en cuenta que sustituyendo y despejando valores, se obtiene el parámetro K en la ecuación ( ).

$$K = \frac{w}{2H} \Delta t^2 \quad (45)$$

El promedio de la potencia de aceleración sirve para el componente de potencia de aceleración av o secuencia cero mostrada en la ecuación ( ) y kPa es la multiplicación del parámetro k y potencia de aceleración que sirve para el cambio angular durante los diferentes intervalos de tiempo.

$$Pa0 = \frac{Pa}{2} \quad ( )$$

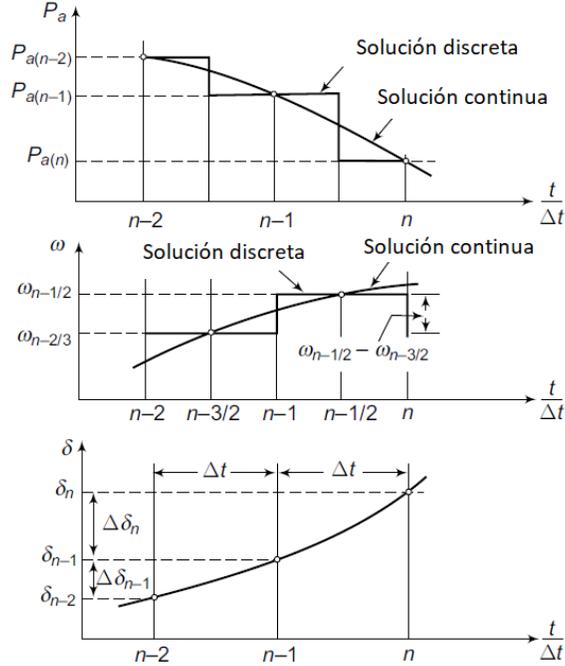


Figura 48 Solución por partes de la ecuación de oscilación.

Fuente: (Kothari & Nagrath, 2011)

Se debe realizar otra vez el desarrollo de estimación y así obtener los valores de  $P_{a(n)}$ ,  $\Delta\delta_{n+1}$ ,  $\delta_{n+1}$ , después de encontrar aquellos valores la respuesta del tiempo discreto se efectúa en 0,5 segundos ya que generalmente es el tiempo anhelado. La respuesta para este tipo de sistemas se ejecuta por medio de curvas como muestra la figura 48 que consta de curvas suaves con la ayuda de estimaciones discretas.

Al aparecer al inicio del lapso una interrupción por consecuencia se emplea la media de los estimados antes y después de la interrupción de la potencia de aceleración, de modo de que al estimar el aumento del ángulo que tiene lugar a lo largo del primer lapso seguidamente de que sucediera la falla en  $t=0$  obtenemos:

$$\Delta\delta_1 = \frac{(\Delta t)^2}{M} + \frac{Pa_{0+}}{2} \quad (47)$$

$-Pa_{0+}$  = Potencia de aceleración al momento posteriormente de suceder la falla.

Se debe considerar que antes de la deficiencia la red se encuentra operando en situación estable por eso el valor de  $Pa_{0-} = 0$  y  $\delta 0$  es un valor conocido. Al erradicar la falla al inicio del lapso  $n$ , para estimar los valores es necesario ocupar que  $Pa_{(n-1)}$  el estimado  $\frac{1}{2}[Pa_{(n-1)-} + Pa_{(n-1)+}]$ , para entender su significado  $Pa_{(n-1)-}$  es la potencia de aceleración al momento antes de libramiento y en este caso  $Pa_{(n-1)+}$  es la potencia de aceleración seguidamente detrás de eliminar la falla. Finalmente se considera que si existe interrupción en el centro de algún lapso no se realiza cualquier otro método particular. Se considera que la elevación del ángulo a lo largo el lapso se estima como siempre, es decir desde de la cifra de  $Pa$  al inicio del lapso. (Kothari & Nagrath, 2011)

#### 2.4. Otras soluciones o métodos numéricos para estudio de estabilidad angular

Para poder realizar análisis de estabilidad angular, se encuentra diferentes métodos numéricos por ejemplo el método antes mencionado (solución punto a punto), pero también existen otros métodos, los cuales ayudan a validar y comparar resultados obtenidos, todos estos métodos se apoyan por medio de la herramienta computacional con el fin de desarrollar el problema de estabilidad. A continuación, en la tabla se menciona diferentes métodos numéricos.

*Tabla 5 Métodos Numéricos para el desarrollo de estudios de estabilidad.*

Métodos numéricos	Descripción
Método Euler modificado	Se examina la dificultad de equiparar una función continua, que compensa la ecuación diferencial.
Método Runge-Kutta	Ajusta la respuesta de las series de Taylor, solicita la primera derivada, mas no las de mayor orden.

*Fuente: (Arias Roldán, 2018)*

A continuación, se mostrarán las diferentes ecuaciones para la solución por el método numérico de Runge Kutta de cuarto orden, donde calcula los promedios de las pendientes (ecuación ( )), haciendo este método más preciso:

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad ( )$$

$$k_1 = f(X_n, t_n)\Delta t \quad ( )$$

$$k_2 = f\left(X_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad ( )$$

$$k_3 = f\left(X_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t \quad ( )$$

$$k_4 = f(X_n + k_3, t_n + \Delta t)\Delta t \quad ( )$$

Donde  $k_1$  es la pendiente al inicio del paso del tiempo,  $k_2$  es la primera aproximación de la pendiente a medio paso del tiempo,  $k_3$  es la segunda aproximación de la pendiente a medio paso y por último  $k_4$  es el final del paso de tiempo, reflejadas en las ecuaciones (49), (50), (51) y (52).

## 2.5. Software MATLAB & SIMULINK

El software Matlab es un programa de lenguaje de programación y cálculo matemático, ideal para el análisis de datos, creación de algoritmos, desarrollo de gráficas y modelos, etc. Las diferentes herramientas, ventanas, librerías y comandos son utilizadas para desarrollar simulaciones de manera interactiva. (Reinoso García, Jiménez García, Payá Castelló, Gil Aparicio, & Peidró Vidal, 2018)

A continuación, se mencionan algunas aplicaciones empleadas para el software Matlab:

- Análisis y diseño eléctrico
- Mantenimiento predictivo
- Sistemas de control
- Robótica y mecatrónica
- Procesamiento de señales
- Pruebas y mediciones
- Diseños de sistema de control de electrónica de potencia

Matlab ofrece diferentes prestaciones, vistas anteriormente para trabajar por medio de su interfaz, cuya orientación está dirigida para ingenieros y estudiantes a nivel mundial. (MathWorks, 2022)

Por otro lado, Simulink el cual pertenece a uno de los tantos productos de MathWorks permite realizar simulaciones mediante diagramas de bloques, crea códigos, testea y verifica sistemas, puede soportar señales de sistemas analógicos, frecuenciales y digitales, ejecutando análisis de rendimiento del algoritmo a través del tiempo.

Simulink es generalmente aplicada para sistemas eléctricos de potencia, comunicación inalámbrica, sistemas de control, procesamiento de señales, sistemas autónomos, inteligencia artificial, etc. Todas estas aplicaciones son desarrolladas por medio de optimización de parámetros, ejecución de simulaciones y análisis de resultados, en conjunto al lenguaje de programación gráfico, haciendo un gran complemento para simulación dinámico. (MathWorks, 2022)

## 2.6. Sistema de potencia de prueba para el generador

Para el modelo del sistema eléctrico de potencia que se va a estudiar, se planteó y considero que el mismo no sea muy complejo, el cual muestra la figura 49, siendo ideal para el análisis de estabilidad angular a lo largo de un lapso. Por medio de estos análisis de estabilidad se consigue disponer de investigaciones previas para establecer áreas con enigmas que soliciten un estudio y modelos complejos.

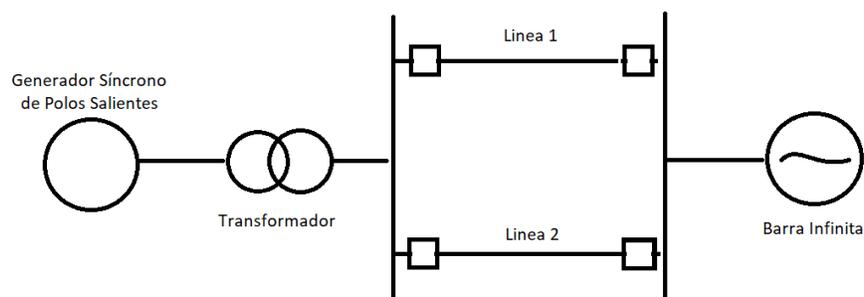


Figura 49 Sistema eléctrico de potencia de prueba.

Fuente: (Autor, 2022)

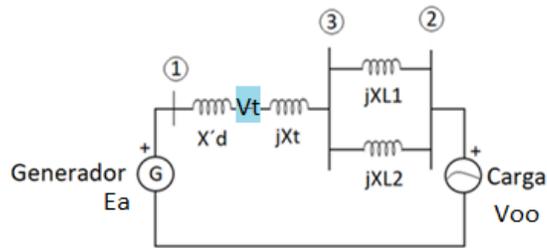


Figura 50 Esquema de reactancias del SEP.

Fuente: (Autor, 2022)

Este pequeño sistema eléctrico de potencia de prueba consta de un generador síncrono de polos salientes que está conectado a un transformador y dos líneas de transmisión paralelas, incluidas dentro de dos barras, hacia un gran sistema o carga, el cual vendría hacer la barra infinita. A continuación, se utilizan las ecuaciones ( ) y ( ) para calcular la reactancia serie entre voltaje de los terminales y barra infinita y la corriente de salida del generador.

$$jX = jXt + \frac{jXL1 * jXL2}{jXL1 + jXL2} \quad ( )$$

$$I = \frac{Vt - Voo}{jX} \quad ( )$$

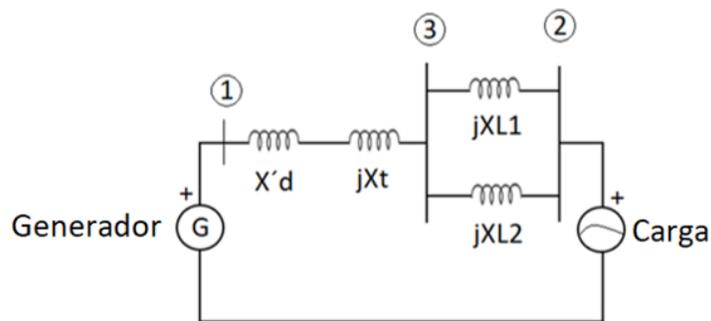


Figura 51 Diagrama de reactancia del sistema simple de estudio (Pre-Falla).

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 51 se puede observar el esquema del sistema en estado de Pre-Falla, donde la ecuación ( ) indica la reactancia serie total antes de la falla.

$$jX_{st} = jX'd + jX_t + \frac{jX_{L1} * jX_{L2}}{jX_{L1} + jX_{L2}} \quad ( )$$

## 2.7. Determinación del funcionamiento en estado estable

Para empezar el proceso de simulación del generador síncrono de polos salientes en un SEP y determinar el funcionamiento en estado estable se especificará todas las características, por esta razón se hará uso del programa computacional MATLAB & Simulink, en virtud de que brinda varias herramientas eléctricas de programación para cálculos y gráficas de representación para este tipo de análisis, donde el usuario logra modificar valores y observar las distintas etapas de operación.

### 2.7.1. Parámetros del sistema

Para los valores reales de las reactancias transitorias tanto del generador, transformador y líneas de transmisión de las tablas 6, 7 y 8 se basaron en los datos referenciados de (Correa Masache, 2007), para la reactancia transitoria real del generador, para la reactancia del transformador y (González, 2015), para la reactancia de las líneas de transmisión.

Tabla 6 Datos de las líneas de transmisión.

Línea	Barras		Impedancia serie		
	Barra i	Barra j	R (Ω)	X ((Ω/km) * km)	L (H)
1	2	3	0.009	=0.046218*106.3719 =4.9163	$= \frac{4.9163}{2 * \pi * 60}$ = 0.013041
2	2	3	0.009	4.9163	$= \frac{4.9163}{2 * \pi * 60}$ = 0.013041

Fuente: (Autor, 2022)

Tabla 7 Datos del transformador.

Barras		Impedancia serie		
Barra i	Barra j	R ( $\Omega$ )	X	L (H)
1	3	0.001	1.6387	$= \frac{1.6387}{2 * \pi * 60}$ $= 0.004347$

Fuente: (Autor, 2022)

Tabla 8 Datos del generador síncrono de polos salientes.

Barra de conexión	Número del generador	X'd ( $\Omega$ )	L (H)	H (MJ/MVA)	Voltaje Nominal (V)	Potencia Nominal (KVA)	Tipo
1	Generador 1	2.4587	$= \frac{2.4587}{2 * \pi * 60}$ $= 0.006521$	5	220	6.5	Polos salientes

Fuente: (Autor, 2022)

A través de los parámetros establecidos, vistos en la tabla 6, tabla 7 y tabla 8, son empleadas para determinar y adquirir valores de potencias, voltajes y corrientes, en operación estable (simulación), por medio de la interfaz gráfica de Simulink.

## 2.7.2. Elementos que conforman el sistema dentro de MATLAB & SIMULINK

En el modelo del sistema de estudio, se utilizó bloques de las diferentes librerías que cuenta SIMULINK para efectuar la simulación en estado estable, a continuación, se describirá en la figura 52 cada elemento, para poder entender el funcionamiento de este.

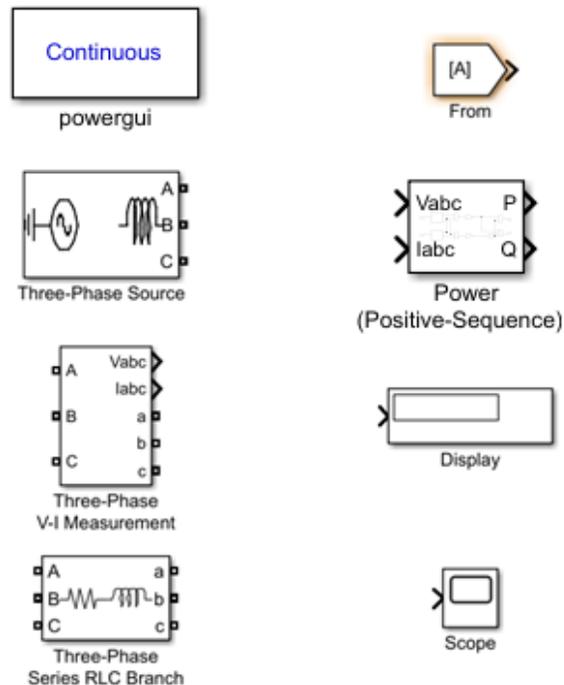


Figura 52 Bloques de las librerías de SIMULINK.

Fuente: (MATLAB & SIMULINK, 2022)

- **Powergui:** Este bloque permite determinar el tipo, características y especificaciones de simulación.
- **Three-Phase Source:** Es el bloque que permite agregar características como fuente de tensión trifásica.
- **Three-Phase V-I Measurement:** Bloque que permite medidas trifásicas de tensión y corriente.
- **Three-Phase Series RLC Branch:** Bloque que permite implementar un ramal serie RLC de manera trifásica.
- **From:** Este bloque recibe la señal especificada dentro de sus parámetros o etiqueta.
- **Power (Positive-Sequence):** Este bloque se encarga de efectuar la potencia activa y reactiva de secuencia positiva de voltaje y corriente trifásica.
- **Display:** Es el bloque que permite visualizar los valores de entrada.
- **Scope:** Es el bloque que simboliza gráficamente una variable en un lapso.

### 2.7.3. Desarrollo de la simulación de funcionamiento del sistema de potencia en estado estable

Inicialmente, el sistema eléctrico de potencia de prueba simbolizado en la figura 48 y 49, será simulado, a continuación, en la figura 53 se puede visualizar su operatividad sin ninguna perturbación, en otras palabras, constante o estado estable.

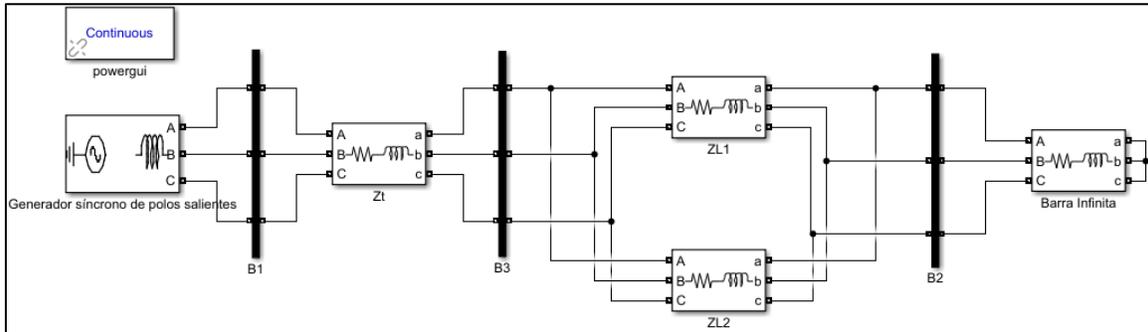


Figura 53 Sistema de prueba implementado en SIMULINK.

Fuente: (Autor, 2022)

Para la simulación, al simbolizar el generador de polos salientes en el sistema empleamos (Three Phase Source) a través de los componentes de simulink, estableciendo la tensión fase-fase RMS, frecuencia y, por último, pero no menos importante la inductancia, como muestra la figura 54.

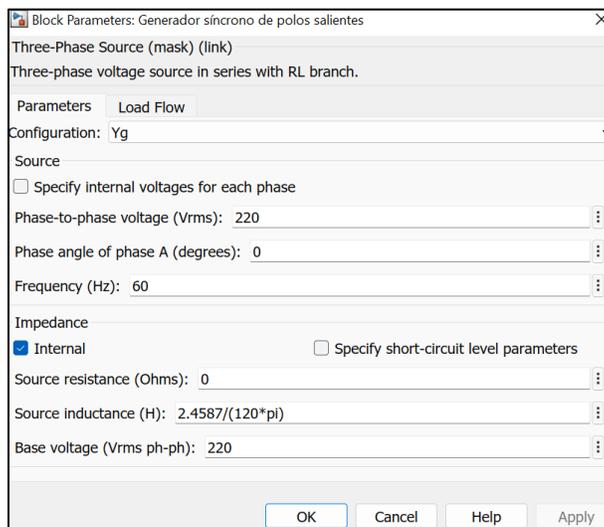


Figura 54 Características del generador.

Fuente: (Autor,2022)

Consecutivamente se manipula el componente (Three Phase Series RLC Branch) el cual fija valores numéricos de líneas de transmisión (RL), transformador (RL) y carga o barra infinita (RL), visualizados en la figura 55.

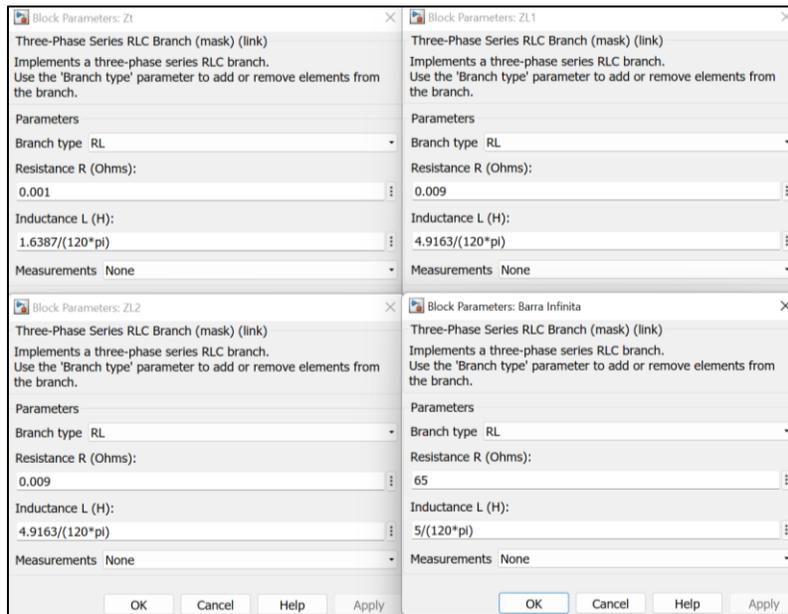


Figura 55 Características de Zt, ZL1, ZL2, Barra Infinita.

Fuente: (Autor, 2022)

Los nodos o barras en el cual convergen las mediciones de voltaje y corriente en cada punto son simbolizadas por (Three Phase V-I Measurement), establecidas a los siguientes nombres B1, B2, B3, como muestra la figura 56.

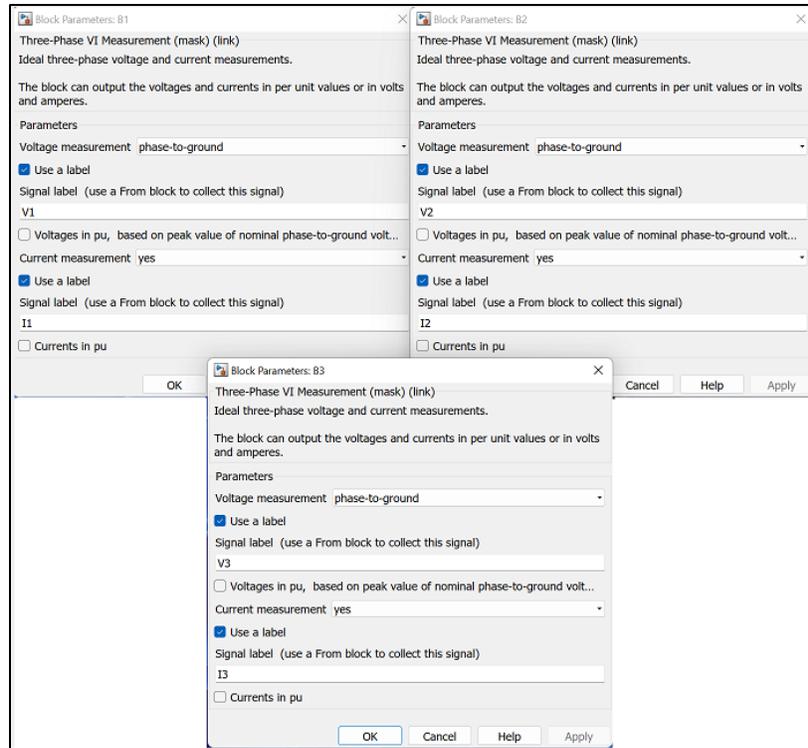


Figura 56 Características de la Barra 1, Barra 2, Barra 3.

Fuente: (Autor, 2022)

Sin embargo, para el procesamiento de datos de potencias (P-Q) se manipuló el componente (Power Positive-Sequence), como muestra la figura 57, que computariza los datos de potencias activas y reactivas trifásicas por medio de (V-I-trifásicos).

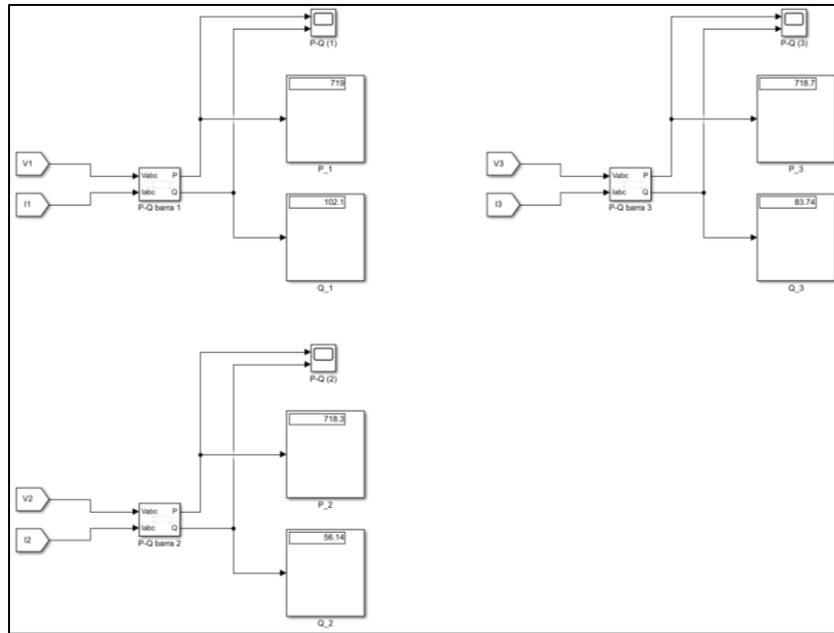


Figura 57 Cálculo de las potencias activas y reactivas en cada nodo.

Fuente: (Autor, 2022)

Los valores de V-I se toman del componente (From) de todas las barras, representando valores numéricos a través del componente (Display), visualizado en la figura 57.

#### 2.7.4. Resultados de la simulación

En el siguiente apartado se dará a conocer los resultados del funcionamiento del sistema eléctrico de potencia, desarrollados en Simulink, con la ayuda de los bloques eléctricos adecuados para la simulación.

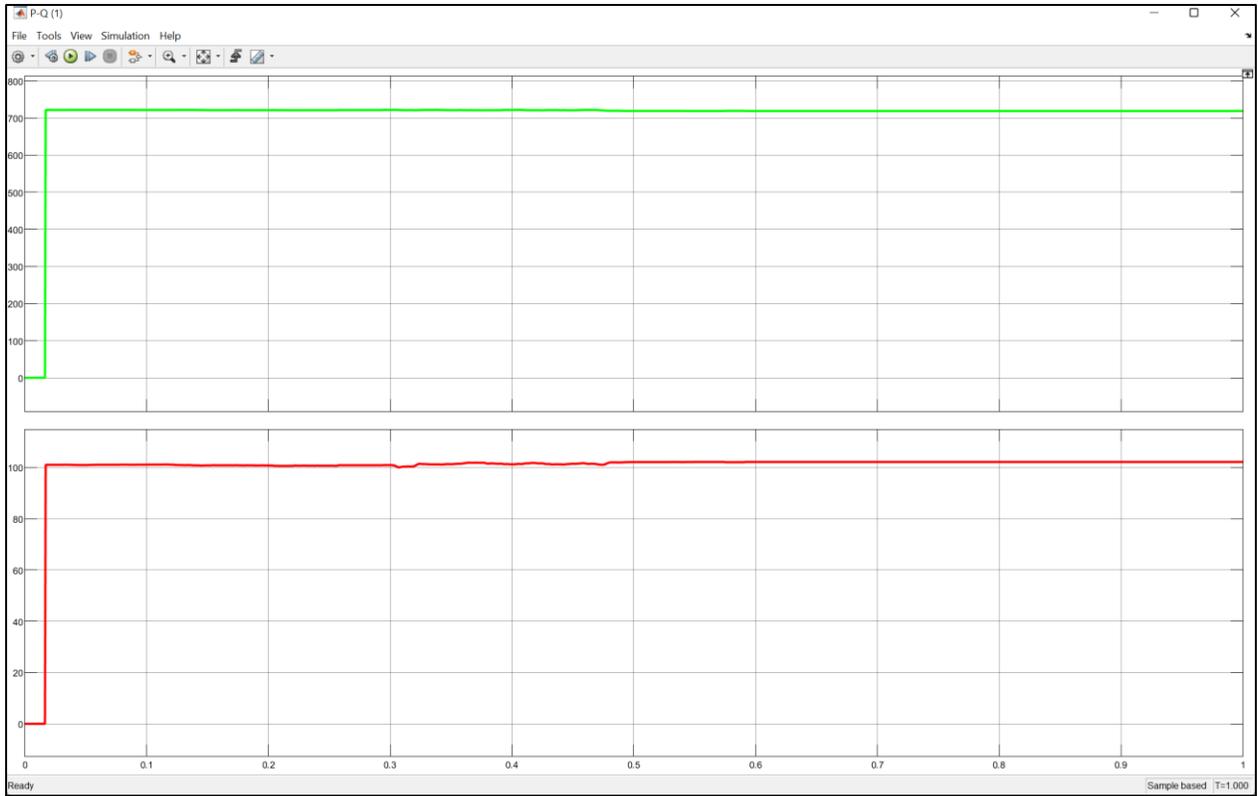


Figura 58 Gráfica P-Q barra 1.

Fuente: (Autor, 2022)

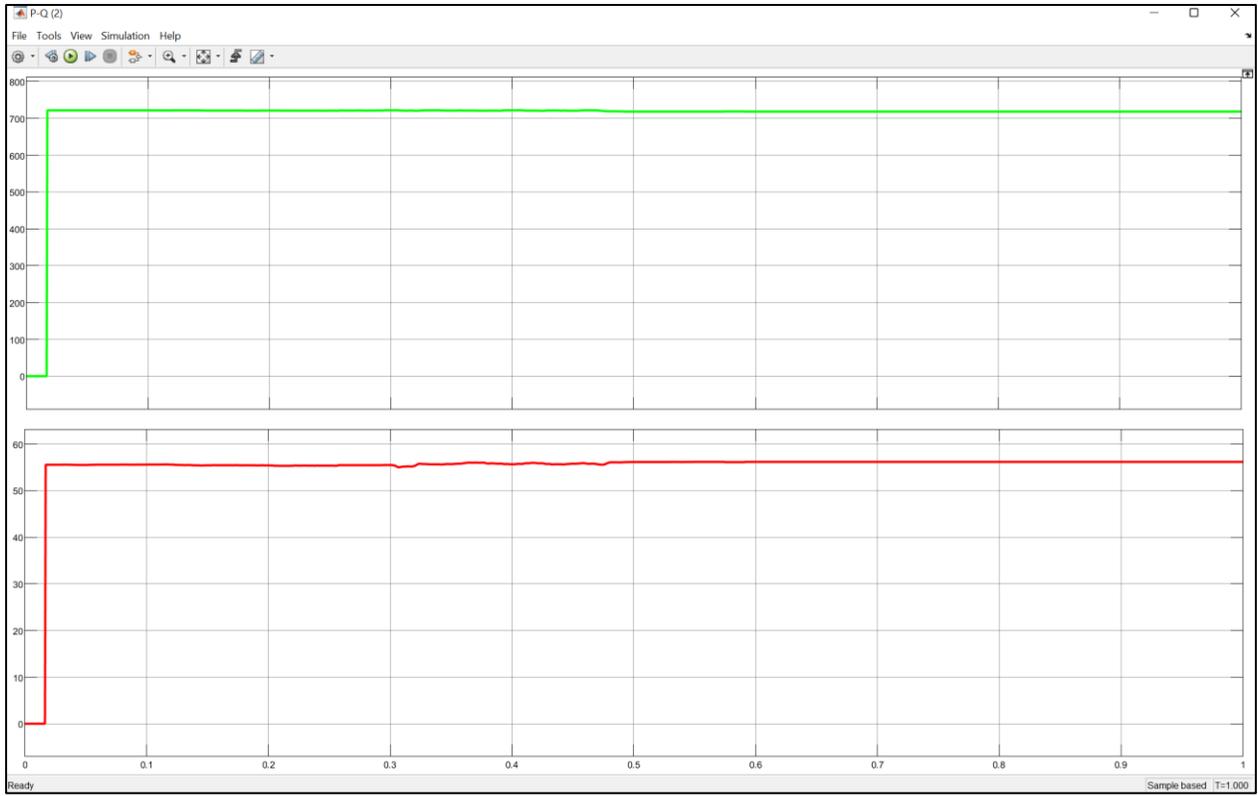


Figura 59 Gráfica P-Q barra 2.

Fuente: (Autor, 2022)

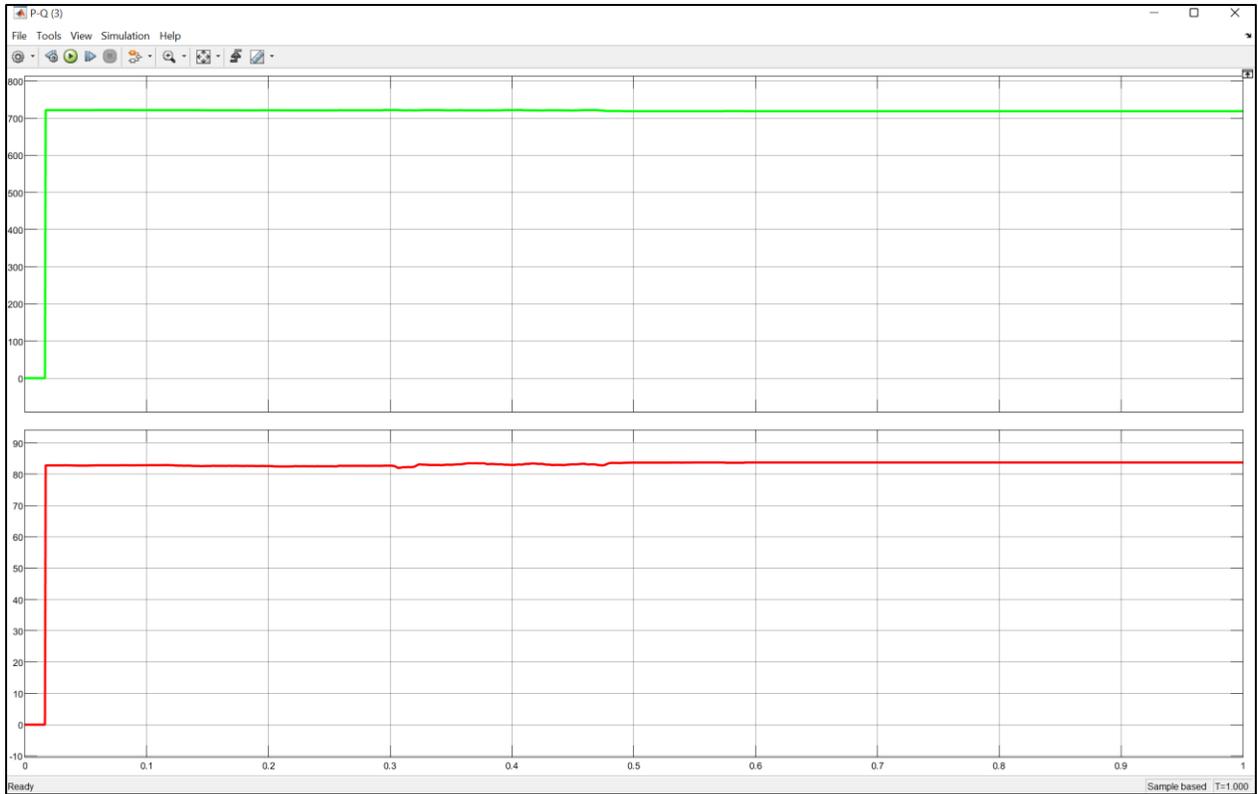


Figura 60 Gráfica P-Q barra 3.

Fuente: (Autor, 2022)

El modelo que se ejecutó en el programa MATLAB & SIMULINK para examinar el sistema de potencia en estado estable, arroja los valores de potencia activa y reactiva mostrados en las figuras 58, 59 y 60, logrando concluir que está operando a valores constantes o estables en todo el sistema sin ninguna perturbación en los diferentes puntos o barras, y así obtener la determinación del funcionamiento en condiciones normales.

# CAPÍTULO 3

## Análisis de estabilidad angular

Por medio de este capítulo se desarrollará y describirá, el objetivo número tres, el cual es el análisis de estabilidad angular de un generador síncrono de polos salientes en un pequeño sistema eléctrico de potencia, culminando el tema de investigación.

### 3.1. Diagrama de reactancias del sistema eléctrico de potencia en los diferentes estados

A continuación, se realiza los diferentes diagramas de reactancias en el sistema de potencia, antes de la falla y con la falla de la red en la mitad de una de las líneas de transmisión que se encuentran en paralelo, para el análisis de estabilidad, en este caso de estudio específico, y convirtiendo las impedancias del sistema en admitancias.

Por medio de las figuras 61, 62, 63, 64 y 65, se visualiza como cambia el sistema eléctrico de potencia a través del tiempo y dentro de la perturbación, para poder hallar parámetros importantes, que posteriormente serán aplicados matemáticamente.

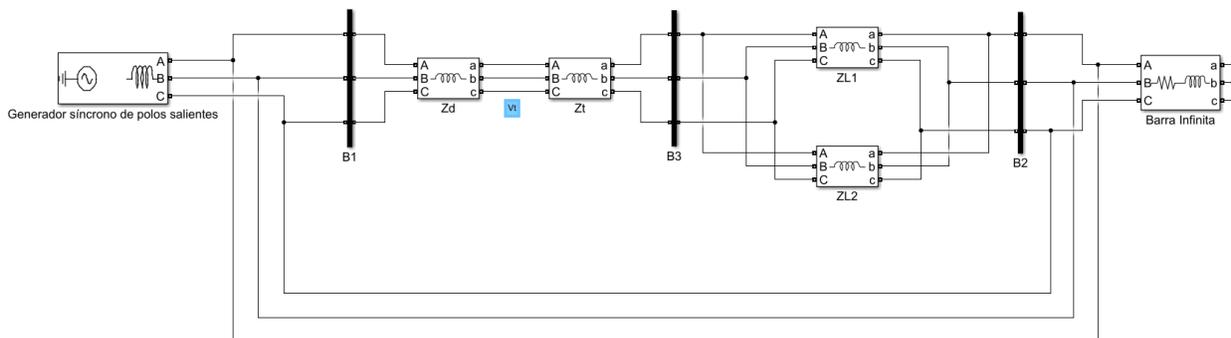


Figura 61 Diagrama de reactancias antes de la falla.

Fuente: (Autor, 2022)

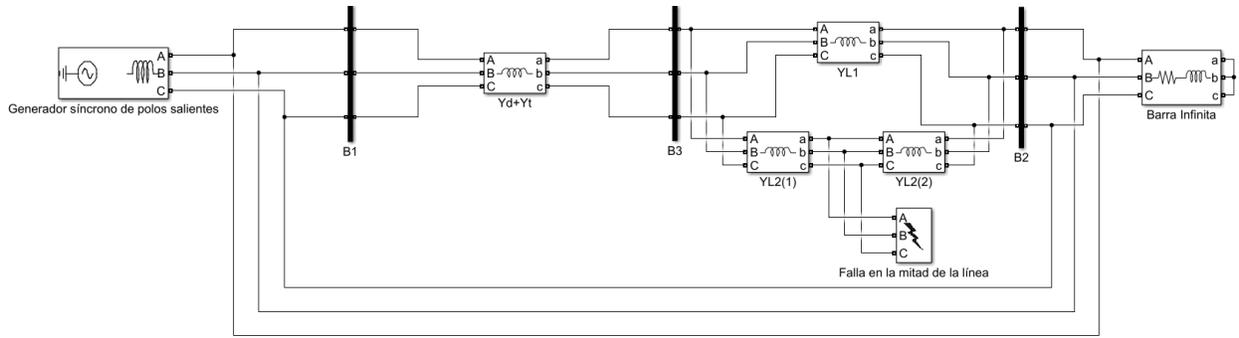


Figura 62 Diagrama de admittancias, donde ocurre la falla en la mitad de una de las líneas de transmisión.

Fuente: (Autor, 2022)

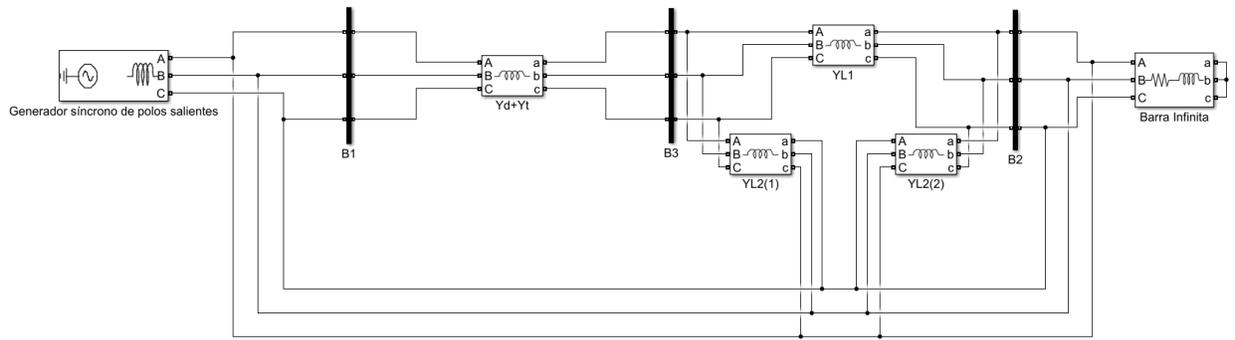


Figura 63 Diagrama de admittancias ocurrida la falla.

Fuente: (Autor, 2022)

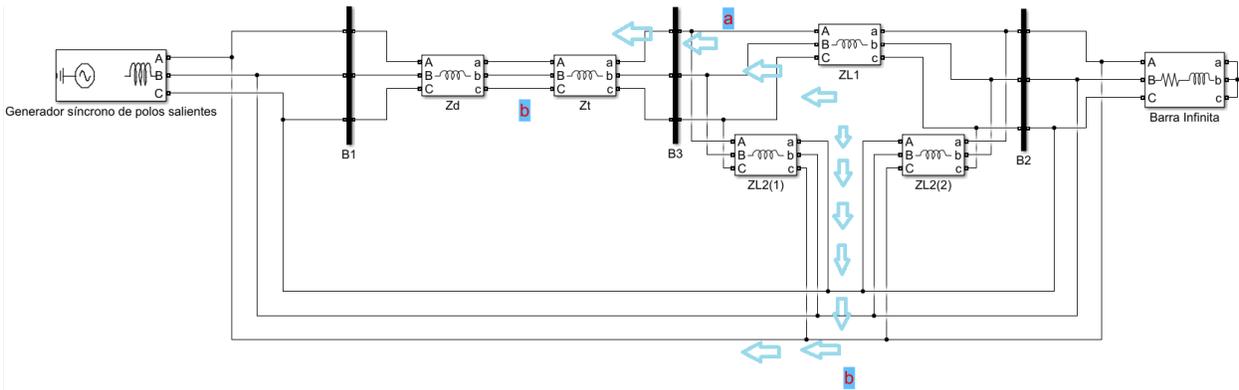


Figura 64 Diagrama ocurrida la falla en la mitad de la línea.

Fuente: (Autor, 2022)

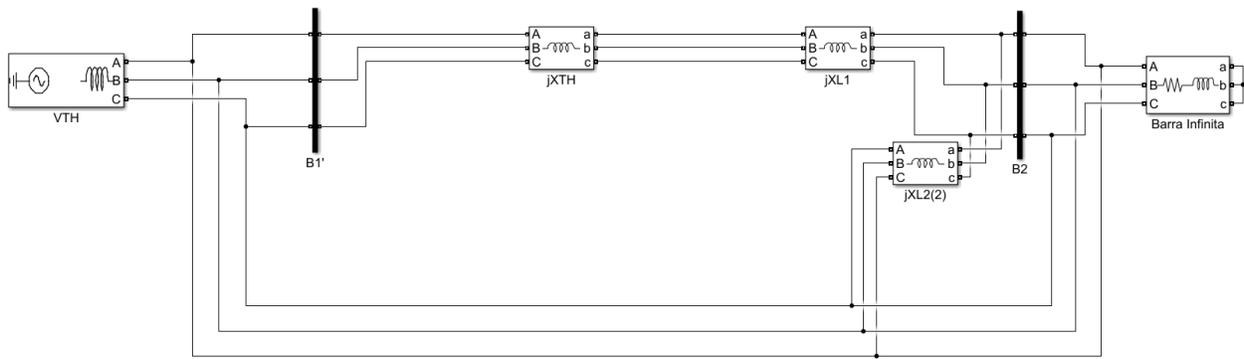


Figura 65 Diagrama método reducción de nodos (Equivalente Thevenin).

Fuente: (Autor, 2022)

Se debe considerar y mostrar énfasis en que el análisis se desarrolla a partir de este caso de estudio particular como muestran las figuras 61, 62 y 63, donde se observa como el diagrama cambia al suscitarse la falla en el 50% de la segunda línea de transmisión en paralelo. Y las figuras 64 y 65, muestran el esquema del sistema, para la técnica de eliminación de nodos, por el método del equivalente Thevenin, que serán empleadas para cálculo y análisis.

### 3.2. Proceso de elaboración para conocer la estabilidad angular del sistema eléctrico de potencia por medio de MATLAB

Todas las características del sistema de potencia eléctrica se encuentran adjudicados en valores en por unidad, debido a que en estudios de ingeniería eléctrica facilitan la solución, ya que los valores en este tipo de unidad de las impedancias en donde se localizan son iguales a aquellos vistos desde la otra parte.

Para continuar con el código de MATLAB, primeramente, se realiza la conversión de los datos del SEP de valores reales que se utilizó en Simulink a valores por unidad, para ejecutar de mejor manera el estudio, para realizar esta transformación se hace uso de la relación (cantidad real sobre la cantidad base), hay que tener en cuenta que para el estudio en Pu la potencia mecánica que entrega el generador, que en este caso, es un generador monofásico (carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte) es 1 pu y el voltaje de la barra infinita también es 1 pu, al igual que el voltaje en los terminales, en la tabla 9 se realiza la conversión de datos.

Tabla 9 Conversión de valores.

Componente	Valor real	Valor base	Conversión	Valor en Pu
Potencia del generador	6.5	6.5	$\frac{6.5 \text{ KVA}}{6.5 \text{ KVA}}$	1
Voltaje en los terminales	220	220	$\frac{220 \text{ V}}{220 \text{ V}}$	1
Reactancia del generador	0.006521	0.04347	$\frac{0.006521}{0.04347}$	j0.15
Reactancia del transformador	0.004347	0.04347	$\frac{0.004347}{0.04347}$	j0.10
Reactancia de la línea 1	0.013041	0.04347	$\frac{0.013041}{0.04347}$	j0.30
Reactancia de la línea 2	0.013041	0.04347	$\frac{0.013041}{0.04347}$	j0.30

Fuente: (Autor, 2022)

A través del programa computacional MATLAB se procede a realizar el código para conocer la estabilidad angular en un pequeño sistema de potencia ya visto anteriormente, considerando el caso de estudio específico descrito en el punto 3.1., hallando y conociendo todos los parámetros necesarios para entablar un análisis final del comportamiento en estado estable (Pre-Falla), durante la falla (en falla) y después de la falla (Post-Falla). Seguidamente se describirá el proceso realizado en MATLAB:

- **Parámetros iniciales**

```
Estabilidad_angular_SEP.m x +
1 -   clc; clear all;
2 -   format short g %formato para pocos decimales
3 -   syms doo dpre dpos dth dc th %variables que se van a encontrar
4 -   H=5; %Constante de inercia del generador
5 -   f=60; %frecuencia
6 -   w=2*pi*f; %velocidad angular
7 -   Pm=1.0; %potencia mecanica
8 -   xd=0.15i; %reactancia del generador
9 -   x1=0.1i; %reactancia del transformador
10 -  x2=0.3i; %reactancia de la linea 1
11 -  x3=0.3i; %reactancia de la linea 2
12 -  V1=1; %voltaje en terminales
13 -  Voo=1; %voltaje de la barra infinita
14 -  X13=xd+x1; %impedancias generador y transformador
15 -  X32_1=x2; %impedancia linea 1
16 -  X32_2=x3/2; %impedancia linea 2 cortocircuito
17
18 -  y13=inv(X13); %admitancias generador y transformador
19 -  y32_1=inv(X32_1); %admitancia linea 1
20 -  y32_2=inv(X32_2); %admitancia linea 2 corotcircuito
21
22 -  Y11=y13;
23 -  Y12=0;
24 -  Y13=y13;
```

Figura 66 Parámetros del sistema.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 66 se puede observar las variables que se van a encontrar en el caso de estudio por medio del comando (format), los parámetros establecidos del sistema de potencia mencionados en las tablas 6, 7 y 8, trabajando los cálculos en sistema por unidad, con ayuda de las variables declaradas para simplificar la codificación.

- Componentes para “Ea” y “Y” de barra

```

Estabilidad_angular_SEP.m
25
26 - Y21=Y12;
27 - Y22=y32_1+y32_2;
28 - Y23=y32_1;
29
30 - Y31=Y13;
31 - Y32=Y23;
32 - Y33=y13+y32_2+y32_1;
33
34 - YBARRA=[Y11 Y12 -Y13; Y21 Y22 -Y23; -Y31 -Y32 Y33];
35 %calculo de variables para determinar Ea
36 xoo=x1+(x2*x3/(x2+x3)); %reactancia serie entre el voltaje en los terminales y la barra i
37 Pperm=((V1*Voo)/imag(xoo)*sin(doo)); %salida de potencia permanente del generador
38 Pperm1=(V1*Voo)/imag(xoo); %salida de potencia permanente del generador (magnitud)
39 dloo=acsc(Pperm1)*180/pi; %angulo del voltaje en terminales relativo a la barra infinita
40 Vlr=(V1*cos(acsc(Pperm1))+V1*sin(acsc(Pperm1))*i); %voltaje en los terminales para encont
41 Voor=(Voo*cos(0))+(Voo*sin(0)*i); %voltaje de la barra infinita para encontrar la corrie
42 I=(Vlr-Voor)/xoo; %corriente de salida del generador
43 Ea=Vlr+xd*I; %voltaje interno del generador

```

Figura 67 Componentes para Y de barra y componentes para voltaje transitorio.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 67 se observa cada componente que formara parte de la Y de barra, los cuales son las impedancias convertidas en admitancias conectadas entre las barras del sistema de la figura 61, posteriormente se realiza el cálculo de las diferentes variables entre las cuales están la reactancia entre voltaje en terminales y barra infinita que se calcula por medio de la ecuación ( ), con la ecuación (13) se calcula la potencia generada y despejando de la misma ecuación se encuentra el ángulo relativo. Y, por último, pero no menos importante se realiza la conversión de coordenadas polares a rectangulares del voltaje en los terminales y voltaje de la barra infinita para calcular la corriente de salida del generador, el cual se realiza por medio de la ley de corrientes de Kirchhoff se utilizó la ecuación ( ) y utilizando la ecuación (6) se descubre el voltaje transitorio o interno del generador.

- **Cálculo de potencia eléctrica en pre falla**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
45 % CALCULO DE LA PREFALLA
46 xpre=xd+x1+X32_2; %reactancia serie total
47 dpre=0:0.01:pi; %angulo prefalla que vaya de 0 a pi en intervalos de 0.01 para graficar pu
48 Ppre=(abs(Ea)*Voo/imag(xpre))*sin(dpre); %potencia ángulo que relaciona al voltaje interr
49 Ppre1=(abs(Ea)*Voo/imag(xpre));
50 dipres=acsc(Ppre1)*180/pi; %angulo del rotor de la maquina con respecto a la barra infini
51 subplot(2,1,1) %comando para dibujar multiples graficas en una ventana (dos filas, ur
52
53 hold on %comando para almacenar o guardar todas las graficas
54
55 plot(dpre,Ppre) %comando para graficar la variable en eje "x" y "y"
56 title('CURVA DE FALLAS') %titulo de la grafica principal
57 xlabel('Grados') %el titulo designado al eje de las x
58 ylabel('Pe') %el titulo designado al eje de las y
59 grid on %comando para activar las cuadrículas en las graficas
60 hold on
61

```

Figura 68 Cálculo de Pre-Falla.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 68 se puede apreciar el cálculo de la reactancia total con la ayuda de la ecuación ( ), para luego calcular la potencia eléctrica de la Pre-Falla que relaciona el voltaje interno del generador con el voltaje de barra infinita con la ecuación (35) (circuito de figura 61) y despejar el ángulo del rotor del generador con relación a la barra infinita para obtener el denominado ángulo inicial del rotor.

- **Cálculo de la potencia eléctrica en post falla**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
61
62 % CALCULO DE POSFALLA
63 xpos=xd+x1+x2; %reactancia serie al librar la falla de la linea
64 dpos=0:0.01:pi;
65 Ppos=(abs(Ea)*Voo/imag(xpos))*sin(dpos); %ecuacion potencia angulo posterior a la falla
66 Ppos1=(abs(Ea)*Voo/imag(xpos));
67 dipos=acsc(Ppos1)*180/pi;
68 subplot(2,1,1)
69 plot(dpos,Ppos);
70 hold on

```

Figura 69 Cálculo de Post-Falla.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 69 se puede evaluar el sistema de la figura 63 debido a que ocurre después de la falla y se utiliza las ecuaciones (12) y (36), respectivamente para utilizar la reactancia y potencia eléctrica al librar la falla del sistema.

- **Cálculo de potencia eléctrica durante falla**

```

Estabilidad_angular_SEP.m
72 % CALCULO DE LA FALLA
73 xth=(X13*X32_2)/(X13+X32_2); %reactancia con el efecto del corto circuito ocasionado por
74 Vth=(X32_2*Voo)/(X13+X32_2); %voltaje thevenin
75 dth=0:0.01:pi;
76 Pfa=(abs(Ea)*Vth)/(imag(x2)+imag(xth))*sin(dth); %ecuacion potencia angulo al considerar l
77 Pfal=(abs(Ea)*Vth)/(imag(x2)+imag(xth));
78 dlfa=sin(Pfal)*180/pi;
79 dmaxl=(180-dlpres); %angulo maximo
80 subplot(2,1,1)
81 plot(dth,Pfa)
82 j1=linspace(0,1,10); %comando genera vectores espaciados por un intervalo definido de ce
83 plot(dmaxl*pi/180,j1,'*')
84 hold on
85 do=acsc(Pprel);
86 j1=linspace(0,1,10);
87 j=linspace(0,3.5,100);
88 plot(do,j1,'*',j,Pm,'*')

```

Figura 70 Cálculo Durante la falla.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 70 se realiza el cálculo en el estado durante o cuando ocurre la falla en el sistema de potencia por esta razón se utilizó la técnica de eliminación de nodos mencionadas en el punto 2.2.5., con el método de equivalente Thevenin para hallar la reactancia Thevenin junto al voltaje Thevenin esquematizados en la figura 65 (ecuaciones ( ) y ( )), posteriormente se utilizó la ecuación ( ) para calcular la potencia eléctrica durante falla y despejar  $\delta$ . Luego se utilizó la ecuación (28) para saber el ángulo máximo del rotor de la máquina.

- **Cálculo del criterio de áreas iguales**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
89 %CRITERIO DE AREAS IGUALES
90 F1=Pm-Pfal*sin(th); %El área A1 (se aplica al periodo de falla)
91 F2=Ppos1*sin(th)-Em; %El área A2 (se aplica al periodo inmediato posterior a la falla hast
92 A1=int(F1,dc,do); %se integra el área A1, es directamente proporcional al incremento er
93 A2=int(F2,dmax*3.14/180,dc); %se integra el área A2, es proporcional al decremento en la e
94 AT=A1-A2==0;
95 dc1=double(solve(AT,dc)); %Resuelve la ecuacion AT para la variable dc, Se despeja el anq
96
97 dc=acos((pi-2*do)*sin(do)-cos(do)); %angulo critico
98 A1_1=double(subs(A1,dc)); %se sustituye el angulo critico en area 1 para obtener resultad
99 A1_2=double(subs(A2,dc)); %se sustituye el angulo critico en area 2 para obtener resultad
100 % AT1=double(subs(AT,dc))
101 tcrti=sqrt(((dc-do)*(4*H))/w*Pm); %tiempo critico
102 hold off %comando para desactivar que se guarden las graficas
103 disp('          POTENCIA          RADIANTES          GRADOS ') %comand
104 r=["PREFALLA","POSFALLA","FALLA"]';
105 ri=["ANGULO INICIAL","ANGULO CRITICO","ANGULO MAX"]';
106 r1=[Pprel Ppos1 Pfal]';
107 r2=[do dc dmax1*pi/180]';
108 r3=[dlpres dc*180/pi dmax1]';
109 disp([r r1 ri r2 r3])
110 disp('          Area 1          Area 2          Tiempo Critico')
111 disp([A1_1 A1_2 tcrti])

```

Figura 71 Criterio de áreas iguales.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 71 con la ecuación ( ) se obtiene los valores de las áreas bajo el criterio de áreas iguales, el cual indica si el sistema es estable o inestable. Por medio del comportamiento del ángulo a través del tiempo, si este crece indefinidamente o realiza oscilaciones, a través de la ecuación ( ) se calcula el ángulo critico el cual es el parámetro límite para establecer que se libre la falla. Y, por último, pero no menos importante se obtiene el tiempo critico de libramiento de falla con la ecuación ( ).

- **Cálculo para la curva de oscilación de una falla despejada**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
118 % Calculo para la curva de oscilacion del generador
119 At=0.05; %variable para variacion del tiempo para que cada 0.05 se realice el calculo
120 Adn=0; %variable delta del angulo nuevo que inicia en cero para el calculo
121 Pe=Pfal*sin(do); %potencia electrica para el calculo de iteracion, se considera la potenc
122 Pa=Pm-Pe; %potencia de aceleracion se calcula al comienzo de cada nuevo intervalo y la
123 Pa0=Pa/2; %potencia de aceleracion cero para los tres tipos de caso 0-,0+,0 (valor prom
124 K=(w/(2*H))*(At^2); %parametro que muestra cómo calcular el cambio en delta durante un ir
125 KPa=((K*180)/pi)*Pa0; %cambio en el ángulo del rotor de la máquina conforme avanza el tien
126 t=0;
127 Adn=Adn+KPa; %delta del angulo nuevo mas kpa para almacenar el valor y seguir iterando
128
129 disp(' CALULO DE METODO DE RUNGER KUTTA 4° ORDEN')
130 disp(' CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA DESPEJADA EN UN TIEMPO CRITICO')
131 disp(' t dn Pmax Pe Pa KPa')
132 disp([t dlpres 0 Pm 0 0 0;t dlpres Pfal Pe Pa 0 0;t dlpres 0 0 Pa0 KPa Adn])
133 hold on
134 grid on

```

Figura 72 Cálculo para la curva de oscilación.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 72 se observa las diferentes variables que ayudan a la codificación de MATLAB a realizar las iteraciones, se crea una nueva variable con la potencia eléctrica de falla por medio de la ecuación (38), seguidamente se calcula la potencia de aceleración con la ecuación (5) que se calcula al comienzo de cada nuevo intervalo y la solución se desarrolla hasta que se obtiene un número de puntos suficientes para graficar la curva de oscilación, con la ecuación (46) se calcula el promedio de la potencia de aceleración y con el parámetro K de la ecuación ( ) ayuda para la multiplicación con la potencia de aceleración para determinar el cambio del ángulo del rotor a través del tiempo.

- **Cálculo del método de Runge Kutta**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
136 % CALULO DE METODO DE RUNGER KUTTA
137 - tn=0.9; %tiempo de muestras para calculo
138 - t0=0; %tiempo inicial cero para iteracion
139 - Delta_t=0.05; %variacion de tiempo para calculo
140 - n=(tn-t0)/Delta_t; %numero de veces que se repite la iteracion
141 - Pmec=Pm; d0=0; %guardar valores con otras variables
142 - ang_inicial=do;
143 - t=t0:Delta_t:tn; %dependiendo del lapso de tiempo se grafica los puntos
144 % CONDICIONES DE ESTADO
145 - Pmax1=Pfal; % Durante la falla
146 - Pmax2=Ppos1; % Después de la falla
147 - for i=1:n %variable que realiza los incrementos
148 - ti=t0+i*Delta_t; %almacena e incrementa el lapso de tiempo para ti
149 - if ti>=0 & ti<=tcri %comparacion Durante la falla
150 - Pmax=Pmax1; %condicion para utilizar potencia electrica durante falla
151 - end
152 - if ti>tcri & ti<=tn %comparacion Después de la falla
153 - Pmax=Pmax2; %condicion para utilizar potencia electrica despues de falla
154 - end
155 - ang_inicialN=ang_inicial+Delta_t*d0; %angulo inicial nuevo para almacenar e ir cambiar
156 - Pe=Pmax*sin(ang_inicial); %potencia electrica dependiendo de la comparacion de fallas
157 - Pa=Pmec-Pe; %potencia de aceleracion
158 - k1=Delta_t*f*pi/H*(Pa); %parametros o ecuaciones para el metodo runger kutta
159 - k2=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k1/2+Delta_t/2; %parametros o ecuaciones para el metodo runger
160 - k3=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k2/2+Delta_t/2; %parametros o ecuaciones para el metodo runger

```

Figura 73 Método de Runge Kutta.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 73 se realiza el método de Runge Kutta con la ayuda de las variables como  $t_n$ ,  $t_0$ ,  $\Delta t$ ,  $n$ ,  $P_{mec}$ ,  $ang\_inicial$ , que sirven como parámetros iniciales para empezar las iteraciones durante un lapso de tiempo, en este apartado se utiliza las potencias de falla y post falla para ser comparadas e interactuar por medio de límites entre tiempo inicial, tiempo crítico y tiempo límite de prueba, para posteriormente almacenar y utilizar los valores calculados y comparados en las ecuaciones (49), (50), (51) y (52) para determinar las pendientes en los diferentes intervalos de tiempo, calculando los nuevos valores de  $\delta$ .

- **Cálculo del método de Runge Kutta (falla despejada)**

```

Estabilidad_angular_SEP.m
161 -      k4=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k3;      %parametros o ecuaciones para el metodo runger kutta
162 -
163 -      wk1=d0+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;    %promedio de los parametros del metodo runger kutta
164 -
165 -      ang_inicial=ang_inicialN;      %variable donde cambia los valores nuevos calculados de
166 -      d0=wk1;      %variable que reemplaza los nuevos valores
167 -      lapsotiempo2(i)=ti; %almacena valores de ti
168 -      angulo2(i)=ang_inicial*180/pi; %variable de cambio de radianes a grados
169 -      subplot(2,1,2)
170 -      plot(lapsotiempo2,angulo2,'-bl+', 'linewidth',1, 'markersize',6, 'markeredgecolor','g')
171 -      title('CURVA DEL GENERADOR')
172 -      xlabel('Tiempo')
173 -      ylabel('Grados electricos')
174 -      At=ti; dn=ang_inicial*180/pi; KPa=k1; Adn=ang_inicialN; %nombre de las variables p
175 -      disp([At dn Pmax Pe Pa KPa Adn])
176 -   end
177 -   disp(' ');
178 -   disp('                                CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA SOSTENIDA')
179 -   disp(' ');disp(' ');
180 -   tn=0.8; %tiempo de muestras para calculo
181 -   t0=0; %tiempo inicial cero para iteracion
182 -   Delta_t=0.05; %variacion de tiempo para calculo
183 -   n=(tn-t0)/Delta_t; %numero de veces que se repite la iteracion
184 -   Pmec=Pm; d0=0; %guardar valores con otras variables

```

Figura 74 Método de Runge Kutta para una falla liberada.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 74 se observa el promedio de las pendientes con la ecuación ( ), luego se realiza las iteraciones con los nuevos valores guardados en las nuevas variables, hasta dibujar todos los puntos de la curva de oscilación para la condición al librar la falla en el sistema por medio de la comparación de potencias mencionadas anteriormente.

- **Cálculo del método de Runge Kutta (falla sostenida)**

```

Estabilidad_angular_SEP.m x +
185 - ang_inicial=do;
186 - t=t0:Delta_t:tn; %dependiendo del lapso de tiempo se grafica los puntos
187 - % CONDICIONES DE ESTADO
188 - Pmax1=Pfal; % Durante la falla
189 - Pmax2=Ppos1; % Después de la falla
190 - for i=1:n %variable que realiza los incrementos
191 - ti=t0+i*Delta_t; %almacena e incrementa el lapso de tiempo para ti
192 - if ti>=0 & ti<=tcri %comparacion Durante la falla
193 - Pmax=Pmax1; %condicion para utilizar potencia electrica durante falla
194 - end
195
196 - ang_inicialN=ang_inicial+Delta_t*d0; %angulo inicial nuevo para almacenar e ir cambia
197 - Pe=Pmax*sin(ang_inicial); %potencia electrica dependiendo de la comparacion de f
198 - Pa=Pmec-Pe; %potencia de aceleracion
199 - k1=Delta_t*f*pi/H*(Pa); %parametros o ecuaciones para el metodo runger kutta
200 - k2=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k1/2+Delta_t/2; %parametros o ecuaciones para el metodo runger
201 - k3=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k2/2+Delta_t/2; %parametros o ecuaciones para el metodo runger
202 - k4=Delta_t*f*pi/H*(Pa)+k3; %parametros o ecuaciones para el metodo runger kutta
203
204 - wk1=d0+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6; %promedio de los parametros del metodo runger kutta
205
206 - ang_inicial=ang_inicialN; %variable donde cambia los valores nuevos calculados de
207 - d0=wk1; %variable que reemplaza los nuevos valores
208 - lapsotiempo2(i)=ti; %almacena valores de ti
209 - angulo2(i)=ang_inicial*180/pi; %variable de cambio de radianes a grados
210 - hold on
211 - subplot(2,1,2)
212 - plot(lapsotiempo2,angulo2,'bl+', 'linewidth',1, 'markersize',6, 'markeredgecolor', 'g')
213 - title('CURVA DEL GENERADOR')
214 - xlabel('Tiempo')
215 - ylabel('Grados electricos')
216 - At=ti; dn=ang_inicial*180/pi; KPa=k1; Adn=ang_inicialN; %nombre de las variable
217 - disp([At dn Pmax Pe Pa KPa Adn])
218 - end

```

Figura 75 Método de Runge Kutta para una falla sostenida.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 75 se realiza el mismo procedimiento de las figuras 73 y 74, con el detalle de que no compara las potencias de falla y post falla, haciendo que solo interactúe con la potencia de falla simulando que el sistema no libero la falla a tiempo y se vuelva un sistema inestable.

### 3.3. Análisis de estabilidad angular para el caso de estudio elaborado

A continuación, se realiza el análisis de estabilidad angular del SEP empleado para el caso de estudio evaluado anteriormente, las figuras 76, 77, 78 y 79 muestran los resultados del trabajo de grado.

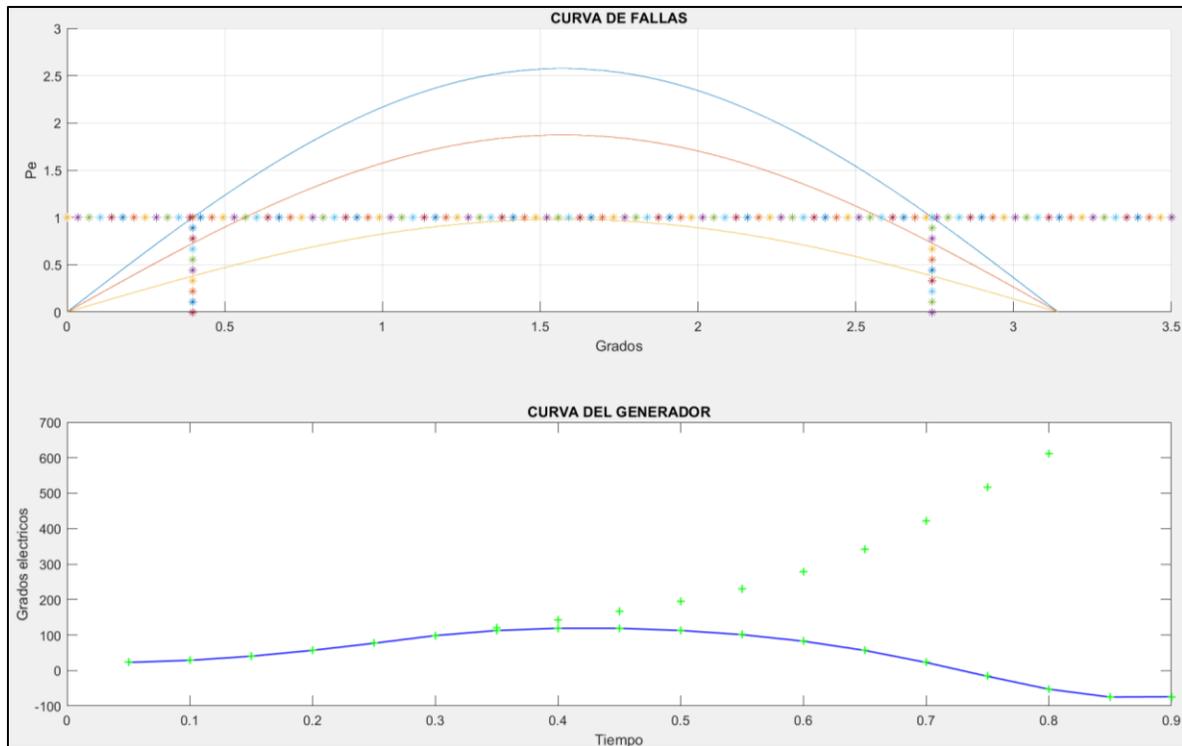


Figura 76 Curva de fallas ( $P-\delta$ ) y Curva de oscilación ( $\delta-t$ ).

Fuente: (Autor, 2022)

Para la figura 76 se muestra el resultado de la curva relación potencia y ángulo en los diferentes estados del sistema, haciendo de la curva color azul la curva  $P-\delta$  del sistema antes de la falla, la curva color naranja es la curva  $P-\delta$  post falla y la curva amarilla es la curva  $P-\delta$  durante la falla, de igual manera en la figura 77 se observa los valores de potencia para los tres estados, estas curvas sirven para visualizar el cambio de la potencia eléctrica en las diferentes condiciones de operación, debido a las condiciones de cargas o redes de transmisión o distribución, también se muestra el ángulo inicial del rotor del generador, ángulo crítico y ángulo máximo, haciendo énfasis en que si el  $\delta$  se extiende y oscila más allá del  $\delta_{max}$  se produce inestabilidad, por esta razón el  $\delta_{cr}$  existe como límite de libramiento para cumplir con el criterio de áreas iguales, también se visualiza las magnitudes de las áreas, siendo estas del mismo valor, cumpliendo la condición de estabilidad angular bajo el criterio de áreas iguales y por último el tiempo crítico del SEP el cual es denominado el tiempo máximo que debe el SEP librar la falla para recuperar el equilibrio al sistema.

	POTENCIA		RADIANES	GRADOS
"PREFALLA"	"2.5751"	"ANGULO INICIAL"	"0.39883"	"22.85107"
"POSFALLA"	"1.8728"	"ANGULO CRITICO"	"1.9234"	"110.2013"
"FALLA"	"0.98098"	"ANGULO MAX"	"2.7428"	"157.1489"
Area 1	Area 2	Tiempo Critico		
-0.2818	-0.2818	0.28439		

Figura 77 Resultados de potencias, grados, áreas y tiempo crítico.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 78 para el análisis de estabilidad se toma en cuenta los valores de  $d_n$ ,  $P_{max}$ ,  $P_e$ ,  $P_a$ ,  $KPa$ ,  $Ad_n$ , teniendo como resultado que el ángulo deja de aumentar y comienza a bajar como muestra la figura 76 en la curva de oscilación, la oscilación de color azul, se puede decir que el sistema es estable transitoriamente.

CALULO DE METODO DE RONGER KUTTA 4° ORDEN						
CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA DESPEJADA EN UN TIEMPO CRITICO						
t	$d_n$	$P_{max}$	$P_e$	$P_a$	KPa	$Ad_n$
0	22.851	0	1	0	0	0
0	22.851	0.98098	0.38095	0.61905	0	0
0	22.851	0	0	0.30952	1.6714	1.6714
0.05	22.851	0.98098	0.38095	0.61905	1.1669	0.39883
0.1	28.639	0.98098	0.38095	0.61905	1.1669	0.49985
0.15	40.216	0.98098	0.47018	0.52982	0.99869	0.7019
0.2	56.758	0.98098	0.63339	0.36661	0.69104	0.99061
0.25	76.759	0.98098	0.82046	0.17954	0.33843	1.3397
0.3	98.494	1.8728	1.823	-0.823	-1.5513	1.719
0.35	112.71	1.8728	1.8522	-0.85224	-1.6064	1.9672
0.4	119.15	1.8728	1.7275	-0.72753	-1.3714	2.0796
0.45	118.95	1.8728	1.6356	-0.63558	-1.198	2.0761
0.5	112.97	1.8728	1.6387	-0.63871	-1.2039	1.9717
0.55	101.17	1.8728	1.7243	-0.72429	-1.3653	1.7658
0.6	82.771	1.8728	1.8373	-0.83729	-1.5783	1.4446
0.65	56.723	1.8728	1.8579	-0.8579	-1.6171	0.99
0.7	22.838	1.8728	1.5657	-0.56569	-1.0663	0.3986
0.75	-16.188	1.8728	0.72687	0.27313	0.51483	-0.28253
0.8	-52.616	1.8728	-0.52211	1.5221	2.8691	-0.91833
0.85	-74.926	1.8728	-1.4881	2.4881	4.6899	-1.3077
0.9	-74.205	1.8728	-1.8083	2.8083	5.2936	-1.2951

Figura 78 Curva de oscilación para una falla despejada.

Fuente: (Autor, 2022)

En la figura 79 se analiza que el sistema al no liberar la falla, esta se mantiene y se visualiza que el  $\delta$  sigue aumentando sin final, bajo el dominio de que la potencia de aceleración es positiva teniendo como consecuencia de que la velocidad del rotor exceda la velocidad síncrona, causando inestabilidad para el SEP. Se considera que dependiendo del consumo de la potencia eléctrica el sistema ocasiona aceleración o desaceleración en las maquinas síncronas conectadas, de modo que, si la potencia eléctrica requerida por el sistema es superior a la potencia mecánica otorgada por la maquina síncrona, este último empieza a reducir su velocidad, mientras que, si la potencia mecánica suministrada es superior que la potencia eléctrica demandada, el generador empieza a elevar su velocidad.

CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA SOSTENIDA						
0.05	22.851	0.98098	0.38095	0.61905	1.1669	0.39883
0.1	28.639	0.98098	0.38095	0.61905	1.1669	0.49985
0.15	40.216	0.98098	0.47018	0.52982	0.99869	0.7019
0.2	56.758	0.98098	0.63339	0.36661	0.69104	0.99061
0.25	76.759	0.98098	0.82046	0.17954	0.33843	1.3397
0.3	98.494	0.98098	0.9549	0.045095	0.085002	1.719
0.35	120.72	0.98098	0.97022	0.029777	0.056128	2.107
0.4	143.3	0.98098	0.8433	0.1567	0.29537	2.5011
0.45	167.41	0.98098	0.5862	0.4138	0.77999	2.9218
0.5	195.41	0.98098	0.21386	0.78614	1.4818	3.4105
0.55	230.74	0.98098	-0.26063	1.2606	2.3762	4.0271
0.6	277.77	0.98098	-0.75952	1.7595	3.3166	4.848
0.65	341.12	0.98098	-0.97197	1.972	3.7171	5.9536
0.7	422.73	0.98098	-0.31748	1.3175	2.4834	7.378
0.75	516.58	0.98098	0.87196	0.12804	0.24135	9.016
0.8	611.68	0.98098	0.38997	0.61003	1.1499	10.676

Figura 79 Curva de oscilación para una falla sostenida.

Fuente: (Autor, 2022)

Este análisis de estabilidad para el caso estudiado en el presente tema de investigación se desarrolló por medio de MATLAB y como se puede visualizar en las figuras 78 y 79 se aprecia los valores para los dos casos, tanto el primero, el cual simula la actuación de parámetros de protección o valores límites (sistema equilibrado), como también el segundo, el cual muestra los valores en el que simula la no actuación de las protecciones (sistema no equilibrado). Al

considerarse un estudio de estabilidad angular y sus irregularidades, es fundamental ya que origina mejor seguridad para la funcionalidad y manejo del sistema de potencia.

## Conclusiones

- En el primer apartado del tema de investigación, se concluyó que la información recolectada, referente a generadores síncronos de polos salientes y estudios de estabilidad, los parámetros eléctricos de una máquina síncrona, como también características y propiedades de funcionamiento, contribuyen, para establecer equilibrio y realizar el respectivo análisis de estabilidad angular del sistema de potencia eléctrico.
- La determinación del funcionamiento del sistema de potencia en estado estable, demanda la realización de este, por medio del software Simulink, con ayuda de los bloques multidominio, entablado todos los componentes y parámetros eléctricos necesarios para simular el comportamiento de este, sin ninguna perturbación a través del tiempo, considerando que los valores de impedancias son implementados como cargas constantes.
- Se realizó el análisis de estabilidad angular, encontrando los parámetros críticos, máximos y valores de prueba del sistema, permitiendo visualizar los diferentes estados y zonas de estabilidad e inestabilidad, a través de las gráficas de potencias eléctricas-ángulos y curvas de oscilación, este último implementado por el método numérico de Runge Kutta, ya que es más preciso y mejora el análisis del mismo, empleando MATLAB, con el uso de las respectivas ecuaciones, adaptando su lenguaje de programación al caso de estudio, haciendo de MATLAB un programa muy útil, al poder trabajar y evaluar códigos para investigaciones de sistemas eléctricos de potencia convirtiéndose en una herramienta versátil.

## Recomendaciones

- Se debe conocer correctamente los diversos términos eléctricos, para evitar confusiones al momento de utilizar y recopilar la diferente información detallada, acerca de la estabilidad o de los parámetros eléctricos, para aplicarlos al tema de investigación.
- Para la determinación del funcionamiento de sistemas de potencia, más complejos, se puede realizar por medio de Simulink, sin embargo, se recomienda el uso de diferentes programas computacionales, los cuales, son enfocados para simulación, con respecto al monitoreo, control, diseño y obtención de datos de sistemas eléctricos de potencia, estos softwares, en general son manipulados por entidades como CENACE y TRANSELECTRIC, debido a su fácil operatividad.
- Se puede realizar diferentes casos de análisis de estabilidad angular, dependiendo de donde ocurra la perturbación o falla en el sistema eléctrico de potencia, al igual que añadir componentes como generadores, cargas, líneas de transmisión, sin embargo, el tema de investigación y análisis de curvas  $P_e-\delta$  y curvas de oscilación desarrolladas, pueden servir como base para futuros estudios y mejorar la investigación de estabilidad total del sistema.

## Bibliografía

- Agencia de regulación y control de energía. (febrero de 2021). *Balance nacional de energía eléctrica*. Obtenido de <http://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
- Aguilar Quintanilla, C. A., & Hernández Muñoz, J. M. (2019). Análisis y simulación de estabilidad transitoria en sistemas Multi-Máquina. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Aguilar Rizzo, C. A. (2015). Fabricación de un prototipo de generador eléctrico de imanes permanentes. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Guayaquil, Guayaquil.
- Arenas, A., Mediavilla, P., García, F., & Garcés, P. (2013). Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable.
- Arias Hernández, A. (2016). Efecto de los volantes de inercia en la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Arias Reyes, P. D. (2013). Análisis de la estabilidad en pequeña señal del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador. (*Tesis de maestría*). Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Arias Roldán, E. (2018). Estudio de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia con integración de sistemas de almacenamiento de energía. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Barrera, C., & Játiva, J. (enero de 2014). Análisis de estabilidad angular en un sistema de laboratorio. *Escuela Politécnica Nacional*, 33, 11.
- Bedriñana Aronés, M. F. (2016). *Curso EE-60-Dinámica de sistemas de potencia*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/EdinsonHerreraVasquez/ee60-clase-4-modelo-de-mquina-sncrona-2016i>
- Boldea, I. (2016). *Synchronous Generators* (Segunda ed.). London: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Boldea, I. (2016). *Synchronous Generators*. Timisoara: CRC Press.
- Calero Freire, I. R. (2008). Protección de generadores eléctricos mediante relés micro procesados multifuncionales. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Calle Chamba, F. G., & Flores Paladines, G. J. (2010). Diseño y construcción de un banco para pruebas de caracterización de los principales parámetros de generadores eléctricos para el A.E.I.R.N.N.R. de la Universidad Nacional de Loja. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Nacional de Loja, Loja.
- Campaña López, I. F. (2021). Determinación del margen de estabilidad angular de sistemas eléctricos de potencia considerando contingencias N-1. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito.
- Castillo Monsalve, M. S., & Garzón Vizcayo, F. (2016). Tipología de fallas en generadores síncronos hidráulicos de la empresa de energía del pacífico. (*Tesis de ingeniería*). Universidad del Valle, Santiago de Cali.

- Cayón Orozco, J. M. (2017). Métodos de diferenciación exponencial en el dominio del tiempo para el análisis de estabilidad angular. (*Tesis de maestría*). Universidad del Norte, Barranquilla.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas* (Quinta ed.). (S. Sarmiento Ortega, Trad.) México: McGraw-Hill.
- Comisión Federal de Electricidad. (diciembre de 2016). *Generadores síncronos para turbina tipo bulbo*. Obtenido de [https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/u/W4200\\_31.pdf](https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/u/W4200_31.pdf)
- Corona Sánchez, J. J. (2014). Estabilidad angular de un sistema Multi-Máquinas. (*Tesis de ingeniería*). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Correa Masache, D. H. (2007). Modelación y Simulación del Grupo 1 de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1 de ELEPCO S.A. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Díaz Osorio, V. E. (2017). Localización de sistemas de baterías para el mejoramiento del desempeño en estabilidad transitoria de los sistemas eléctricos de potencia. (*Tesis de maestría*). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Espinoza San Martín, R. A. (2012). Desarrollo de un equivalente reducido del SING para estudios de estabilidad transitoria de primera oscilación. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Esteban Espeja, J. (2014). Desarrollo de los modelos de redes para estudios dinámicos de sistemas eléctricos (Máquinas síncronas). (*Tesis de ingeniería*). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/25947#preview>
- Estrada Cruz, A. (2018). Evaluación de un esquema de acción remedial basado en un disparo automático de generación para mitigar problemas de estabilidad angular en el sistema eléctrico nacional. (*Tesis de maestría*). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.
- Ezequiel Biteznik, C. (2015). Modelado lineal de Sistemas de Potencia. Aplicación al Análisis de Estabilidad de Pequeña Señal. (*Tesis doctoral*). Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- Gallardo Quingatuña, C. F. (2009). Estabilidad y amortiguamiento de oscilaciones en sistemas eléctricos con alta penetración eólica. (*Tesis doctoral*). Universidad Carlos III de Madrid, Leganés/Getafe.
- Gallardo, C., & Andagoya, D. (enero de 2014). Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano con Alta Penetración Eólica. *Escuela Politécnica Nacional*, 33(3), 11.
- Gómez, A. (2008). Herramienta computacional para el análisis de estabilidad transitoria en sistemas Multi-Máquinas. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de los Andes, Mérida.
- González, J. (2015). *Sistemas por unidad*. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
- Granada Zapata, J. D. (2015). Determinación de los parámetros que afecten el ajuste y la coordinación de la protección de pérdida de sincronismo en generadores. (*Tesis de maestría*). Universidad Nacional De Colombia, Medellín.
- Isla Martín, E. J. (2019). Análisis y aplicación del triángulo de Potier en las máquinas síncronas. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

- Kothari, D. P., & Nagrath, I. J. (2011). *Modern Power System Analysis* (Cuarta ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Lagunas Sánchez, M. (2013). Puesta en servicio del modelo DL30190 para generadores síncronos trifásicos. (*Tesis de ingeniería*). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Lange Verdugo, C. D. (2020). Evaluación del comportamiento dinámico de un sistema eléctrico interconectado mediante modelos reducidos obtenidos de mediciones sincro fasoriales. (*Tesis de ingeniería*). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Ledesma Larrea, P. (2020). *Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos* (Primera ed.). Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Martínez Arias, G. L., & López Hincapié, J. A. (2008). Libro interactivo de máquinas síncronas. (*Tesis de tecnología*). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Martínez Ferrán, D. (2017). Cortocircuitos en el generador síncrono trifásico. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Valladolid, Valladolid.
- MathWorks. (2022). *MathWorks*. Obtenido de [https://la.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://la.mathworks.com/?s_tid=gn_logo)
- Mazariego Elías, R. E., Morales Machuca, M. E., & Vásquez Roque, J. C. (2017). Análisis de los generadores síncronos con excitatriz de imanes permanentes. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Mazariegos Morales, H. O. (2005). Determinación de curvas de capacidad de una máquina síncrona de polos salientes. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Mejía Cholo, C. A. (2013). Análisis de pequeña señal de sistemas de excitación tipo estáticos de generadores sincrónicos usando el programa computacional DlgSILENT POWER FACTORY. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Mircea Eremia, & Mohammad Shahidehpour. (2013). *Hanbook of electrical power system dynamics modeling, stability, and control* (Primera ed.). New Jersey: Wiley-IEEE Press.
- Mondragón Navarrete, V., Pineda Jiménez, W., & Trejo González, C. (2015). Generación de energía eléctrica por imanes de neodimio. (*Tesis de ingeniería*). Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica Unidad profesional Adolfo López Mateos, México.
- Navarrete Vele, W. J. (2017). Estudio de la eficiencia energética en el suministro eléctrico de la metalmecánica Mogro Barriga CIA. LTDA. en STO. DGO. de los colorados mejorando el factor de potencia en el periodo 2017. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga.
- Ninazunta Anaguano, J. A. (2019). Estimación de estado dinámico de un generador sincrónico aplicando la técnica del filtro de Kalman extendido. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Nizama Valdez, J. C. (2013). Control digital de la excitación de un generador síncrono. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Piura, Piura.

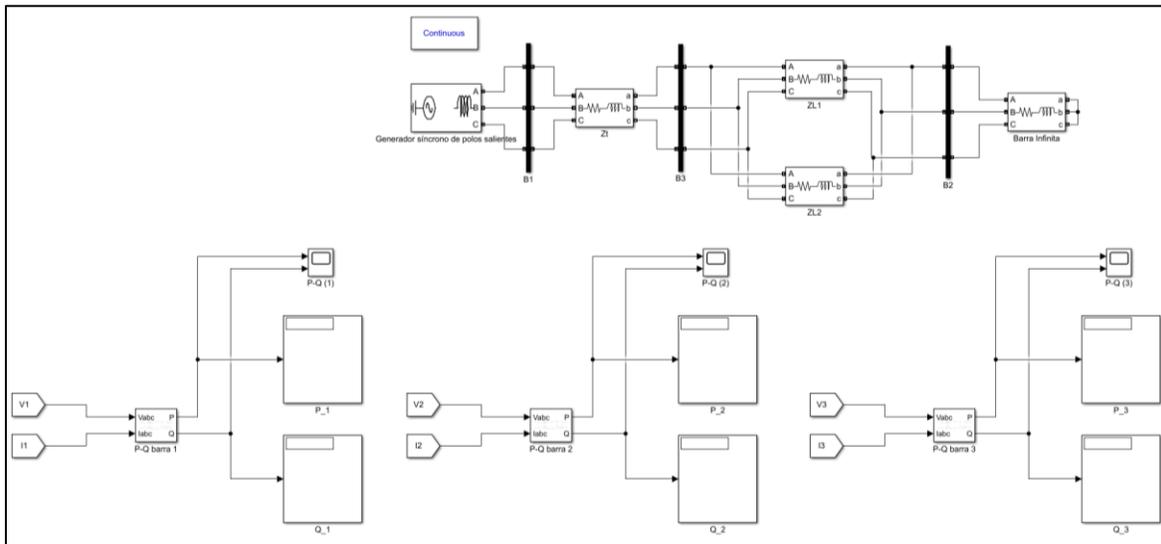
- Orjuela Tirano, L. F., & Cortés Bolívar, J. D. (2020). Estimación de los parámetros del generador síncrono del módulo TNA a partir de oscilogramas eléctricos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de La Salle, Bogotá D.C.
- Pahuanquiza Guamantica, J. A. (2015). Dispositivos electrónicos utilizados en generadores eléctricos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Quito.
- Ponce Sandoval, M. A., & Montufar Chata, J. A. (2014). Diseño, construcción, instalación y puesta en marcha de un sistema de control automatizado para un grupo electrógeno de 6.5Kva de Mobhi Grifos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Reinoso García, Ó., Jiménez García, L. M., Payá Castelló, L., Gil Aparicio, A., & Peidró Vidal, A. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. España: UMH Editorial Electrónica.
- Requena Pérez, R. (2013). Diseño de un estabilizador de sistemas eléctricos de potencia adaptativo predictivo experto. (*Tesis doctoral*). Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Rodríguez Pozueta, M. Á. (2016). *Máquinas eléctricas I-G862*. Cantabria/España: Universidad de Cantabria.
- Rodríguez Pozueta, M. Á. (2018). *Máquinas Eléctricas II*. España: Universidad de Cantabria.
- Tonato Muñoz, J. P. (2020). Manual de operación y mantenimiento eléctrico del generador síncrono de una unidad de generación de la Central Hidroeléctrica Paute Sopladora. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca.
- Trinidad Hernández, G. (2010). Determinación de los parámetros de máquinas síncronas mediante la prueba de respuesta a la frecuencia con el rotor en reposo. (*Tesis de maestría*). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Valldeperas Nieva, M. (2015). Generador síncrono de polos salientes 11.1 MVA, 6.25 KV, 600 R.P.M. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Vanfretti Fumagalli, L. (2005). Modelación y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Verduga Toala, J. E., & Zambrano Gallardo, W. A. (2017). Análisis Técnico sobre los efectos generados por equipos de inducción en el consumo eléctrico residencial del edificio Holsol. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí extensión Chone, Chone.

# Anexos

## Anexo A: Generador síncrono de polos salientes.



## Anexo B: Modelado del sistema eléctrico de potencia, con sus componentes en MATLAB & Simulink para la simulación en estado estable.



## Anexo C: Código.

```
clc; clear all;
format short g %formato para pocos decimales
syms doo dpre dpos dth dc th %variables que se van a encontrar
H=5; %Constante de inercia del generador
f=60; %frecuencia
w=2*pi*f; %velocidad angular
Pm=1.0; %potencia mecánica
xd=0.15i; %reactancia del generador
x1=0.1i; %reactancia del transformador
x2=0.3i; %reactancia de la línea 1
x3=0.3i; %reactancia de la línea 2
V1=1; %voltaje en terminales
Voo=1; %voltaje de la barra infinita
X13=xd+x1; %impedancias generador y transformador
X32_1=x2; %impedancia línea 1
X32_2=x3/2; %impedancia línea 2 cortocircuito

y13=inv(X13); %admitancias generador y transformador
y32_1=inv(X32_1); %admitancia línea 1
y32_2=inv(X32_2); %admitancia línea 2 cortocircuito

Y11=y13;
Y12=0;
Y13=y13;

Y21=Y12;
Y22=y32_1+y32_2;
Y23=y32_1;

Y31=Y13;
Y32=Y23;
Y33=y13+y32_2+y32_1;

YBARRA=[Y11 Y12 -Y13; Y21 Y22 -Y23; -Y31 -Y32 Y33];
%cálculo de variables para determinar Ea
xoo=x1+(x2*x3/(x2+x3)); %reactancia serie entre el voltaje en los terminales y la barra infinita
Pperm=((V1*Voo)/imag(xoo))*sin(doo); %salida de potencia permanente del generador
Pperm1=(V1*Voo)/imag(xoo); %salida de potencia permanente del generador (magnitud)
d1oo=acsc(Pperm1)*180/pi; %ángulo del voltaje en terminales relativo a la barra infinita
V1r=(V1*cos(acsc(Pperm1))+V1*sin(acsc(Pperm1))*i); %voltaje en los terminales para encontrar la corriente (coordenadas
rectangulares)
Voor=(Voo*cos(0))+Voo*sin(0)*i; %voltaje de la barra infinita para encontrar la corriente (coordenadas rectangulares)
I=(V1r-Voor)/xoo; %corriente de salida del generador
Ea=V1r+xd*I; %voltaje interno del generador

% CALCULO DE LA PREFALLA
xpre=xd+x1+X32_2; %reactancia serie total
dpre=0:0.01:pi; %ángulo Pre-Falla que vaya de 0 a pi en intervalos de 0.01 para graficar puntos
Ppre=(abs(Ea)*Voo/imag(xpre))*sin(dpre); %potencia ángulo que relaciona al voltaje interno transitorio y al voltaje en la barra
infinita
Ppre1=(abs(Ea)*Voo/imag(xpre));
d1pres=acsc(Ppre1)*180/pi; %ángulo del rotor de la maquina con respecto a la barra infinita
subplot(2,1,1) %comando para dibujar múltiples graficas en una ventana (dos filas, una columna, primera posición)

hold on %comando para almacenar o guardar todas las graficas

plot(dpre,Ppre) %comando para graficar la variable en eje "x" y "y"
title('CURVA DE FALLAS') %título de la gráfica principal
xlabel('Grados') %el titulo designado al eje de las x
ylabel('Pe') %el titulo designado al eje de las y
grid on %comando para activar las cuadrículas en las graficas
hold on

% CALCULO DE POSFALLA
xpos=xd+x1+x2; %reactancia serie al librar la falla de la línea
dpos=0:0.01:pi;
Ppos=(abs(Ea)*Voo/imag(xpos))*sin(dpos); %ecuación potencia ángulo posterior a la falla
Ppos1=(abs(Ea)*Voo/imag(xpos));
```

```

d1pos=acsc(Ppos1)*180/pi;
subplot(2,1,1)
plot(dpos,Ppos);
hold on

% CALCULO DE LA FALLA
xth=(x2*X32_2)/(x2+X32_2); %reactancia con el efecto del corto circuito ocasionado por la falla
%xth=(X13*X32_2)/(X13+X32_2);
Vth=(X32_2*Voo)/(x2+X32_2); %voltaje thevenin
%Vth=(X32_2*Voo)/(X13+X32_2);
dth=0:0.01:pi;
Pfa=(abs(Ea)*Vth)/(imag(xd)+imag(x1)+imag(xth))*sin(dth); %ecuación potencia ángulo al considerar la falla
%Pfa=(abs(Ea)*Vth)/(imag(x2)+imag(xth))*sin(dth);
Pfa1=(abs(Ea)*Vth)/(imag(xd)+imag(x1)+imag(xth));
%Pfa1=(abs(Ea)*Vth)/(imag(x2)+imag(xth));
d1fa=sin(Pfa1)*180/pi;
dmax=(3.14-sin(0.6))*180/3.14;
dmax1=(180-d1pres); %ángulo máximo
subplot(2,1,1)
plot(dth,Pfa)
j1=linspace(0,1,10); %comando genera vectores espaciados por un intervalo definido de cero a uno que me genere diez datos
plot(dmax1*pi/180,j1,'*')
hold on
do=acsc(Ppre1);
j1=linspace(0,1,10);
j=linspace(0,3.5,100);
plot(do,j1,'*j,Pm,*')
%CRITERIO DE AREAS IGUALES
F1=Pm-Pfa1*sin(th); %El área A1 (se aplica al periodo de falla)
F2=Ppos1*sin(th)-Pm; %El área A2 (se aplica al periodo inmediato posterior a la falla hasta el punto de máxima oscilación)
A1=int(F1,dc,do); %se integra el área A1, es directamente proporcional al incremento en energía cinética del rotor conforme se
está acelerando
A2=int(F2,dmax*3.14/180,dc); %se integra el área A2, es proporcional al decremento en la energía cinética del rotor conforme éste
se desacelera
AT=A1-A2==0;
dc1=double(solve(AT,dc)); %Resuelve la ecuación AT para la variable dc, Se despeja el ángulo crítico del área total
%dc=acos((pi-2*do)*sin(do)-cos(do));
dc=dc1(2); %angulo critico
A1_1=double(subs(A1,dc)); %se sustituye el ángulo critico en área 1 para obtener resultado
A1_2=double(subs(A2,dc)); %se sustituye el ángulo critico en área 2 para obtener resultado
% AT1=double(subs(AT,dc))
tcri=sqrt(((dc-do)*(4*H))/w*Pm); %tiempo critico
hold off %comando para desactivar que se guarden las graficas
disp(' POTENCIA RADIANTES GRADOS ') %comando que permite visualizar la salida
r1=['PREFALLA','POSFALLA','FALLA'];
r2=['ANGULO INICIAL','ANGULO CRITICO','ANGULO MAX'];
r3=[Ppre1 Ppos1 Pfa1];
r4=[do dc dmax1*pi/180];
r5=[d1pres dc*180/pi dmax1];
disp([r r1 r2 r3])
disp(' Area 1 Area 2 Tiempo Critico')
disp([A1_1 A1_2 tcri])

% Calculo para la curva de oscilación del generador
At=0.05; %variable para variación del tiempo para que cada 0.05 se realice el calculo
Adn=0; %variable delta del ángulo nuevo que inicia en cero para el calculo
Pe=Pfa1*sin(do); %potencia eléctrica para el cálculo de iteración, se considera la potencia de falla
Pa=Pm-Pe; %potencia de aceleración se calcula al comienzo de cada nuevo intervalo y la solución se desarrolla hasta que se
obtiene un número de puntos suficientes para graficar la curva de oscilación
PaO=Pa/2; %potencia de aceleración cero para los tres tipos de caso 0-,0+,0 (valor promedio de pa)
K=(w/(2*H))*(At^2); %parámetro que muestra cómo calcular el cambio en delta durante un intervalo, sobre la base de la potencia
de aceleración para ese intervalo y el cambio en delta en el intervalo que le precede
KPa=((K*180)/pi)*PaO; %cambio en el ángulo del rotor de la máquina conforme avanza el tiempo
t=0;
Adn=Adn+KPa; %delta del ángulo nuevo más kpa para almacenar el valor y seguir iterando

disp(' CALCULO DE METODO DE RUNGER KUTTA 4° ORDEN')
disp(' CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA DESPEJADA EN UN TIEMPO CRITICO');disp(' ')
disp(' t dn Pmax Pe Pa KPa Adn ')
disp([t d1pres 0 Pm 0 0 0; d1pres Pfa1 Pe Pa 0 0; d1pres 0 0 PaO KPa Adn])

```

```

hold on
grid on

% CALULO DE METODO DE RUNGER KUTTA
tn=0.9; %tiempo de muestras para calculo
t0=0; %tiempo inicial cero para iteración
Delta_t=0.05; %variación de tiempo para calculo
n=(tn-t0)/Delta_t; %número de veces que se repite la iteración
Pmec=Pm; d0=0; %guardar valores con otras variables
ang_inicial=d0;
t=t0:Delta_t:tn; %dependiendo del lapso de tiempo se grafica los puntos
% CONDICIONES DE ESTADO
Pmax1=Pfa1; % Durante la falla
Pmax2=Ppos1; % Después de la falla
for i=1:n %variable que realiza los incrementos
    ti=t0+i*Delta_t; %almacena e incrementa el lapso de tiempo para ti
    if ti>=0 & ti<=tcri %comparación Durante la falla
        Pmax=Pmax1; %condición para utilizar potencia eléctrica durante falla
    end
    if ti>tcri & ti<=tn %comparación Después de la falla
        Pmax=Pmax2; %condición para utilizar potencia eléctrica después de falla
    end
    ang_inicialN=ang_inicial+Delta_t*d0; %ángulo inicial nuevo para almacenar e ir cambiando, dependiendo de las iteraciones
    Pe=Pmax*sin(ang_inicial); %potencia eléctrica dependiendo de la comparación de fallas
    Pa=Pmec-Pe; %potencia de aceleración
    k1=Delta_t**pi/H*(Pa); %parametros o ecuaciones para el método runger kutta
    k2=Delta_t**pi/H*(Pa)+k1/2+Delta_t/2; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta
    k3=Delta_t**pi/H*(Pa)+k2/2+Delta_t/2; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta
    k4=Delta_t**pi/H*(Pa)+k3; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta

    wk1=d0+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6; %promedio de los parámetros del método runger kutta

    ang_inicial=ang_inicialN; %variable donde cambia los valores nuevos calculados de las iteraciones
    d0=wk1; %variable que reemplaza los nuevos valores
    lapsotiempo2(i)=ti; %almacena valores de ti
    angulo2(i)=ang_inicial*180/pi; %variable de cambio de radianes a grados
    subplot(2,1,2)
    plot(lapsotiempo2,angulo2,'-b+', 'linewidth',1, 'markersize',6, 'markeredgecolor','g')
    title('CURVA DEL GENERADOR')
    xlabel('Tiempo')
    ylabel('Grados electricos')
    At=ti; dn=ang_inicial*180/pi; KPa=k1; Adn=ang_inicialN; %nombre de las variables para la impresión
    disp([At dn Pmax Pe Pa KPa Adn])
end
disp(' ');
disp(' CURVA DE OSCILACION PARA UNA FALLA SOSTENIDA')
disp(' ');disp(' ');
tn=0.8; %tiempo de muestras para calculo
t0=0; %tiempo inicial cero para iteración
Delta_t=0.05; %variación de tiempo para calculo
n=(tn-t0)/Delta_t; %número de veces que se repite la iteración
Pmec=Pm; d0=0; %guardar valores con otras variables
ang_inicial=d0;
t=t0:Delta_t:tn; %dependiendo del lapso de tiempo se grafica los puntos
% CONDICIONES DE ESTADO
Pmax1=Pfa1; % Durante la falla
Pmax2=Ppos1; % Después de la falla
for i=1:n %variable que realiza los incrementos
    ti=t0+i*Delta_t; %almacena e incrementa el lapso de tiempo para ti
    if ti>=0 & ti<=tcri %comparación Durante la falla
        Pmax=Pmax1; %condición para utilizar potencia eléctrica durante falla
    end

    ang_inicialN=ang_inicial+Delta_t*d0; %ángulo inicial nuevo para almacenar e ir cambiando dependiendo de las iteraciones
    Pe=Pmax*sin(ang_inicial); %potencia eléctrica dependiendo de la comparación de fallas
    Pa=Pmec-Pe; %potencia de aceleración
    k1=Delta_t**pi/H*(Pa); %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta
    k2=Delta_t**pi/H*(Pa)+k1/2+Delta_t/2; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta
    k3=Delta_t**pi/H*(Pa)+k2/2+Delta_t/2; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta
    k4=Delta_t**pi/H*(Pa)+k3; %parámetros o ecuaciones para el método runger kutta

```

```

wk1=d0+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6; %promedio de los parámetros del método runger kutta

ang_inicial=ang_inicialN; %variable donde cambia los valores nuevos calculados de las iteraciones
d0=wk1; %variable que reemplaza los nuevos valores
lapsotiempo2(i)=ti; %almacena valores de ti
angulo2(i)=ang_inicial*180/pi; %variable de cambio de radianes a grados
hold on
subplot(2,1,2)
plot(lapsotiempo2,angulo2,'b+','linewidth',1,'markersize',6,'markeredgecolor','g')
title('CURVA DEL GENERADOR')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Grados electricos')
At=ti; dn=ang_inicial*180/pi; KPa=k1; Adn=ang_inicialN; %nombre de las variables para la impresión
disp([At dn Pmax Pe Pa KPa Adn])
end

```