

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**



**INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

Análisis de estabilidad de voltaje de un generador síncrono de polos salientes

**AUTOR:** Revelo Erazo Celimo David

**DIRECTOR:** MSc. Barzola Iza Jhonny Javier

**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:	040188659-3
APELLIDOS Y NOMBRES:	Revelo Erazo Celimo David
DIRECCIÓN:	Tulcán - Carlos Oña & General Nariño
EMAIL:	<a href="mailto:cdreveloe@utn.edu.ec">cdreveloe@utn.edu.ec</a>
TELÉFONO MÓVIL:	0961405222

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES
AUTOR (ES):	Revelo Erazo Celimo David
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:

Revelo Erazo Celimo David  
C.I.: 040188659-3

## 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: Revelo Erazo Celimo David, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE 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 blue ink, appearing to read "Barzola Iza Jhonny", is written over a faint circular stamp.

Ing. Barzola Iza Jhonny Javier MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**

## **Dedicatoria**

El presente trabajo investigativo está dedicado principalmente a Dios, por brindarme fuerza e inspiración para continuar en este proceso a pesar de las adversidades y así obtener uno de los anhelos más deseados para mi formación profesional.

A mi familia que con su apoyo y cariño en todos estos años pude lograr llegar hasta aquí y cumplir esta meta de estudio. Es un orgullo y privilegio ser parte de esta familia tan unida que me extendió la mano en tiempos difíciles, y de manera especial a mi abuelita que a lo largo de esta trayectoria siempre estuvo presente, acompañándome y entregándome todo su apoyo.

A todas las personas que me han dado su ayuda y han hecho que este trabajo de investigación sea culminado con éxito, en especial a aquellos que me compartieron sus conocimientos.

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y me brinda su fortaleza en los momentos de debilidad. y ahora por haberme brindado la oportunidad de culminar con éxito mis estudios.

Gracias a mi familia por ser los principales promotores de mis sueños, por creer y confiar en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado a lo largo de mi vida.

Mi profundo agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, por compartirme sus conocimientos a lo largo de esta trayectoria profesional, de igual manera a mi director de tesis Ing. Barzola Jhonny MSc, por su apoyo, orientación y la ayuda brindada para el desarrollo de este trabajo de investigación.

## Índice de contenido

Antecedentes.....	XII
Problema.....	XV
Formulación del problema.....	XVI
Objetivos.....	XVI
Objetivo General.....	XVI
Objetivos Específicos .....	XVI
Justificación .....	XVII
Alcance .....	XVII
CAPÍTULO 1 .....	1
Marco teórico.....	1
1.1    Generador síncrono de polos salientes.....	1
1.1.1    Principio de funcionamiento.....	1
1.1.2    Construcción del generador síncrono .....	2
1.2    Generador síncrono con polos salientes en el rotor .....	3
1.3    Partes que conforman el generador síncrono de polos salientes.....	3
1.3.1    Rotor de polos salientes.....	4
1.3.2    Estator de polos salientes.....	5
1.4    Parámetros eléctricos del generador .....	7
1.5    Modelado del generador síncrono.....	9
1.5.1    Modelado dinámico simplificado .....	10
1.5.2    Modelado dinámico detallado .....	11
1.6    Estudio de estabilidad de voltaje .....	14

1.7	Curvas de potencias - voltaje .....	16
1.7.1	Método de las curvas Q-V .....	16
1.7.2	Método de las curvas P-V.....	18
CAPÍTULO 2 .....		20
Determinar el funcionamiento del generador .....		20
INTRODUCCION .....		20
2.1	Lugar de estudio.....	20
2.2	Metodología.....	21
2.2.1	Software MATLAB & Simulink R2020a.....	22
2.3	Estabilidad de la tensión con pequeñas perturbaciones .....	23
2.3.1	Estabilidad de la tensión .....	22
2.3.2	Colapso de la tensión.....	24
2.4	Comparación de la estabilidad del ángulo y la tensión.....	24
2.4.1	Estabilidad de la tensión.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4.2	Algunas medidas .....	24
2.4.3	Sistemas por unidad PU.....	25
2.4.4	Ley de ohm para inductancia.....	26
2.5	Flujo de potencia reactiva y colapso de la tensión.....	27
2.6	Formulación matemática del problema de estabilidad de la tensión .....	27
2.6.1	Criterio de curva PV .....	28
2.6.2	Criterio de curva QV .....	30
2.6.3	Voltaje interno del generador .....	34
2.7	Métodos de evaluación de estabilidad de tensión .....	35
2.8	Análisis de la estabilidad de la tensión .....	36
2.8.1	Requisitos de modelación de diversos componentes del sistema eléctrico .....	37

2.8.2	Generadores y sus controles de excitación.....	37
2.8.3	Análisis dinámico .....	38
2.8.4	Análisis estático.....	39
2.8.5	Proximidad a la inestabilidad .....	39
2.8.6	Evaluación de la estabilidad de la tensión mediante análisis modal .....	39
2.8.7	El análisis del poder de continuación del flujo.....	41
2.8.8	Estabilidad de la tensión con enlaces hvdc.....	41
2.9	Sistema de potencia de prueba para el generador .....	42
2.9.1	Bloques de Simulink de la configuración del SEP.....	43
2.9.2	Simulación de funcionamiento del sistema de potencia en estado estable.....	45
2.9.3	Desarrollo de la simulación de funcionamiento del SEP en estado estable ...	45
2.9.4	Resultados de la simulación de funcionamiento del SEP en estado estable...	48
CAPÍTULO 3 .....		50
Análisis de estabilidad de voltaje del generador síncrono durante una perturbación.....		50
3.1	Análisis de estabilidad en el sistema eléctrico de potencia .....	50
3.1.1	Análisis de la curva PV utilizando herramienta computacional Matlab .....	54
3.1.2	Análisis de la curva QV utilizando herramienta computacional Matlab.....	56
Conclusiones.....		58
Recomendaciones .....		59
Referencias .....		<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Generador síncrono de polos salientes en el estator.....	2
Figura 2. Generador síncrono de polos salientes en el rotor. ....	3
Figura 3. Polo del rotor.....	4
Figura 4. Lámina del núcleo polar.....	4
Figura 5. Devanado de campo .....	4
Figura 6. Ubicación del devanado amortiguador.....	5
Figura 7. Rotor de polos salientes. ....	5
Figura 8. Cojinete. ....	5
Figura 9. Escobillas .....	5
Figura 10. Carcasa. ....	6
Figura 11. Núcleo. ....	6
Figura 12. Devanado del estator. ....	6
Figura 13. Acuñaado del estator.....	6
Figura 14. Aislamiento del devanado. ....	7
Figura 15. Generador trifásico que muestra las interacciones de cada inductancia por fase .	9
Figura 16. Modelo dinámico simplificado de la maquina síncrona. ....	10
Figura 17. Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes. ....	11
Figura 18. Modelo dinámico detallado de la maquina síncrona.....	12
Figura 19. Períodos de tiempo para las corrientes de cortocircuito.....	13
Figura 20. Curva Q-V.....	16
Figura 21. Curva Q-V.....	17
Figura 22. Curva Q-V.....	18
Figura 23. Curva P-V. ....	18
Figura 24. Curva P-V. ....	19
Figura 25. Campus UTN .....	20
Figura 26. Diagrama de flujo de funcionamiento del generador.....	21
Figura 27. Diagrama unifilar del SEP .....	28
Figura 28. Curvas PV para distintos factores de potencia.....	29
Figura 29: Circuito equivalente para determinar la potencia reactiva.....	31

Figura 30. Criterio de curva QV .....	33
Figura 31. Métodos de evaluación de estabilidad de tensión .....	36
Figura 32. Diagrama unifilar del SEP. ....	43
Figura 33. Bloques utilizados en Simulink.....	44
Figura 34: Diagrama unifilar del SEP en Simulink.....	45
Figura 35. Valores para bloque de generador.....	46
Figura 36. Valores para bloque de transformador. ....	46
Figura 37. Valores para bloques de líneas L1 y L2. ....	47
Figura 38. Valores para bloque de carga. ....	47
Figura 39. Bloque de cálculo de potencias P y Q.....	48
Figura 40. Curva de potencia activa P en función del tiempo.....	48
Figura 41. Curva de potencia reactiva Q en función del tiempo. ....	49
Figura 42. Lugar de falla en el SEP.....	50
Figura 43. Diagrama unifilar con reactancias en Pu.....	52
Figura 44. Diagrama unifilar con lugar de falla. ....	52
Figura 45. Código para la curva PV del SEP. ....	54
Figura 46. Curva PV.....	55
Figura 47. Código para curva QV del SEP.....	56
Figura 48. Curva VQ. ....	57

## Índice de tablas

Tabla 1 Partes del generador con rotor de polos salientes.....	4
Tabla 2 Partes del generador con estator de polos salientes.....	6
Tabla 3 Partes del generador con estator de polos salientes.....	7
Tabla 4 Parámetros de la maquina síncrona.....	10
Tabla 5 Tipos de estabilidad de voltaje.....	14
Tabla 6 Datos del generador síncrono de polos salientes.....	42
Tabla 7 Datos del transformador.....	42
Tabla 8 Datos de las líneas de transmisión.....	42
Tabla 9 Datos de la carga.....	43

## **Resumen**

La estabilidad de voltaje determina la capacidad de un SEP para mantener los voltajes aceptables a un sistema después de ser sometido a una perturbación o fluctuación, los estudios de análisis de estabilidad de voltaje de un generador síncrono de polos salientes se aplicarán al generador síncrono de la carrera de electricidad que se encuentra en los laboratorios de CIELE de la Universidad Técnica del Norte.

El objetivo de este análisis es determinar la estabilidad de voltaje de un generador síncrono de polos salientes mediante sus parámetros eléctricos correspondientes a estudios de estabilidad ante la posible ocurrencia de falla en un sistema, determinando el funcionamiento del generador síncrono de polos salientes en estado estable que será aplicado a un pequeño sistema eléctrico de potencia.

Este análisis se desarrolla por medio de la metodología de las curvas PV y QV de un sistema, permitiendo encontrar en estas curvas las zonas de operación estable e inestable utilizando la herramienta computacional Matlab y así dar posibles soluciones o sugerencias que nos permitan evitar colapsos en el sistema.

## **Abstract**

Voltage stability determines the ability of an SEP to maintain acceptable voltages to a system after being subjected to a disturbance or fluctuation, the studies of voltage stability analysis of a salient pole synchronous generator will be applied to the synchronous generator of the electricity career located in the CIELE laboratories of the “Universidad Técnica del Norte”.

The objective of this analysis is to determine the voltage stability of a salient-pole synchronous generator through its electrical parameters corresponding to stability studies before the possible occurrence of failure in a system, determining the operation of the salient-pole synchronous generator in steady state that will be applied to a small electrical power system.

This analysis is developed by means of the methodology of the PV and QV curves of a system, allowing us to find in these curves the stable and unstable operation zones using the Matlab computational tool and thus give possible solutions or suggestions that allow us to avoid collapses in the system.

## **Antecedentes**

En el Ecuador, con la abundancia de precipitaciones que existen, dispone de una gran red Hidrográfica y para aprovechar los recursos naturales se han generado proyectos hidroeléctricos como Coca Codo Sinclair, Sopladora, Toachi Pilatón, Minas-San Francisco, MazarDudas, Manduriacu, Delsitanisagua y Quijos estos proyectos emblemáticos permitirán incrementar 2700 MW al sistema nacional interconectado (Mayorga, 2015).

Para poder satisfacer la creciente demanda en el Ecuador, se ha ido fortaleciendo un sistema eléctrico de potencia y en los últimos años, la tendencia en la producción de energía eléctrica muestra un déficit frente a su demanda. Para los estudios de los SEP uno de los requerimientos principales es una base de datos de la red eléctrica del S.N.I. del Ecuador que permita realizar diferentes análisis de estabilidad del sistema (Arcos & Flores, 2007)

Los generadores eléctricos son las maquinas con la capacidad de transformar la energía mecánica a energía eléctrica y el principio de funcionamiento de esta máquina se basa en el fenómeno de inducción electromecánica (Paredes, 2014).

Cuando se habla de los tipos de generadores eléctricos estos se diferencian por la manera en cómo se obtiene la energía mecánica para esta ser transformada a energía eléctrica, entonces tenemos generadores solares, nuclear, eólico, geotérmico, hidráulico, mareomotriz y termoeléctrico. (Mondragón, Pineda, & Trejo, 2015).

El generador síncrono es común utilizarlo para alimentar pequeñas redes de usuario por lo tanto funcionan aislados de la red, pero también se pueden interconectar. La máquina síncrona puede funcionar bien como generador o como motor y por su forma constructiva del sistema de excitación se pueden clasificar las maquinas síncronas en dos tipos, máquina de rotor cilíndrico y máquina de polos salientes (Ramirez & Sánchez, 2012)

Estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia (SEP) se realiza en la evaluación de la conducta de operación del sistema, ante eventos de falla cortos de duración en donde se determina los tiempos de actuación, los cuales permiten a las variables del SEP recuperarse de manera adecuada evitando colapsos en la red. La estabilidad principalmente se monitorea mediante fluctuaciones de voltaje, ángulo y frecuencia (Sanafria, 2019).

La estabilidad de voltaje se determina como la capacidad de un SEP de mantener los voltajes aceptables en todas las barras del sistema después de ser sometido a una fluctuación o perturbación con referencia a la condición inicial de operación del sistema. La estabilidad depende de la capacidad de mantener el equilibrio entre la demanda de la carga y la alimentación de la carga del SEP. La inestabilidad de voltaje es un resultado de una posible pérdida de carga o el disparo de líneas de transmisión u otros elementos por sus sistemas de protección (Moreno & Herrera, 2015)

## **Problema**

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) tienen que estar diseñados para que en condiciones normales suministren energía eléctrica de manera continua, estable y operar dentro de un rango de niveles aceptables de voltaje y frecuencia, ante perturbaciones el mismo debe tener la capacidad de mantener el equilibrio de operación del SEP con el propósito de distribuir y transmitir la energía eléctrica desde el punto de generación hasta el punto de consumo. Los problemas de inestabilidad de voltaje pueden ocasionar la actuación de elementos de protecciones, por lo que puede ocasionar que el sistema puede entrar en una fase de secuencia de desconexión de sus componentes ocasionando un colapso de voltaje (Moreno & Herrera, 2015).

El análisis de estabilidad 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**

¿Como analizar la estabilidad de voltaje de un generador síncrono de polos salientes mediante los parámetros eléctricos?

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Analizar la estabilidad de voltaje 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 de voltaje del generador síncrono de polos salientes en un pequeño sistema eléctrico de potencia.

### **Justificación**

El proyecto de investigación a desarrollar se encuentra orientado a la línea de investigación producción industrial y tecnología sostenible de la Universidad Técnica del Norte.

En un sistema eléctrico de potencia siempre se debe garantizar que el sistema mantenga las variables de voltaje, ángulo y frecuencia en operación estable. Ante la posible ocurrencia de inestabilidad de voltaje se debe estudiar este fenómeno en un pequeño SEP para así dar posibles soluciones o sugerencias que nos permitan evitar colapsos en el sistema (Gallardo, 2009).

### **Alcance**

Este trabajo de grado se limita con el análisis de estabilidad de voltaje, determinado en un pequeño sistema eléctrico de potencia utilizando una herramienta computacional para desarrollar simulaciones de operación de un generador síncrono de polos salientes de la carrera de electricidad y se presentará un reporte técnico de dicho análisis.

El proyecto de investigación está destinado a aplicarse al generador síncrono de polos salientes de la carrera de electricidad de una potencia de 6.5 KVA del cual se tomarán sus datos de placa para estudios de estabilidad de voltaje por medio de simulaciones dentro de un pequeño sistema eléctrico de potencia (SEP).

La herramienta computacional por utilizar será MATLAB 2020a & Simulink. Se obtendrán las curvas P-V y Q-V del generador funcionando dentro de un pequeño SEP seleccionado y sometido a perturbaciones eléctricas. Además de ello, se explicará el procedimiento analítico-matemático que permite la obtención de las curvas P-V y Q-V.

# **CAPÍTULO 1**

## **Marco teórico**

En este capítulo se detalla la redacción del marco teórico referente al trabajo de investigación, en donde encontraremos la información acerca de los generadores síncronos de polos salientes tanto sus características, funcionamiento, parámetros eléctricos y más información que nos permitan determinar el estudio de análisis de estabilidad de voltaje en un generador síncrono de polos salientes.

### **1.1 Generador síncrono de polos salientes**

Los generadores síncronos son máquinas rotatorias de corriente alterna que convierten la energía mecánica en energía eléctrica, la característica principal de los generadores síncronos de polos salientes es que traban a bajas velocidades, por lo que el rotor cuenta con un número mayor de polos que en una máquina síncrona con rotor cilíndrico, esta máquina síncrona con polos salientes es comúnmente utilizada en centrales hidroeléctricas en donde el flujo de agua hace rotar las turbinas a una velocidad entre los 200 rpm hasta 1800 rpm. (Cisneros & Yugsi, 2013)

#### **1.1.1 Principio de funcionamiento**

La excitatriz inyecta corriente directa al rotor creando un campo magnético constante. Ahora el rotor es impulsado por el primotor y gira a una velocidad determinada por el número de revoluciones por minuto. Este campo magnético que se originó en el rotor induce tensiones en los devanados del estator a una determinada frecuencia. Ocurriendo esto al momento de conectarle una carga al generador, produce una corriente que circule por los devanados del estator. La circulación de esta corriente produce una reacción del inducido que viene siendo

un campo magnético giratorio en el estator. La suma de los dos campos inducido e inductor dan como resultado el campo magnético del generador. La tensión a la salida del generador es diferente a la tensión inducida por el campo magnético originado en el rotor, debido a las caídas de tensión en el interior del generador por la reactancia síncrona y la resistencia de los devanados del estator. (Calle & Flores, 2010)

### 1.1.2 Construcción del generador síncrono

El estator y el rotor son las partes respectivamente estacionaria y rotatoria del generador síncrono, estos son los componentes generadores de energía, en donde el rotor tiene el polo de campo, y el estator es en el conductor del inducido y el movimiento relativo entre el estator y el rotor induce el voltaje entre el conductor. Cuando se habla de los tipos de diseño de construcción de generadores síncronos se encuentran los generadores de polos salientes en el estator, de polos salientes en el rotor y generador sin escobillas, enfocándonos en el generador síncrono de polos salientes se muestra las siguientes construcciones. (Isla, 2019)

#### 1.1.2.1 Generador síncrono con polos salientes en el estator

La construcción del generador principalmente es de un conjunto de láminas de acero al silicio, con la destreza de permitir que a través de ellas pase el flujo magnético con total facilidad, este tipo de generador se diferencia de los demás ya que tiene el inducido en el rotor siendo una configuración propia de las máquinas de baja velocidad y potencia. (Isla, 2019)

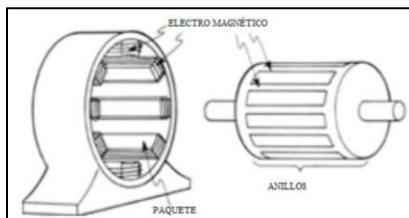


Figura 1. Generador síncrono de polos salientes en el estator

Fuente: Tomado de (Isla, 2019)

## 1.2 Generador síncrono con polos salientes en el rotor

La construcción del rotor del generador síncrono se realiza de dos maneras una con el rotor de polos salientes y otra con el rotor de polos lisos, el rotor de polos salientes tiene un par de polos laminados con proyección hacia afuera y cada uno tiene un extremo que se sujeta con tornillos a una rueda magnética nombrada araña, generalmente es utilizado en centrales hidráulicas por sus características que son de bajas velocidades de giro por lo que se requiere un gran número de polos, mayor a 4, para generar un voltaje a 50 o 60 Hz, a estas velocidades las pérdidas en el devanado son pequeñas. (Lagunas, 2013)

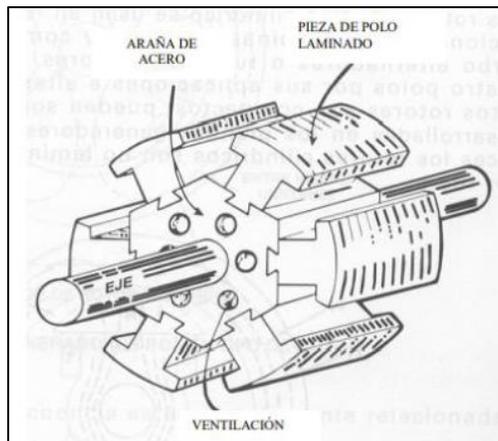


Figura 2. Generador síncrono de polos salientes en el rotor.

Fuente: Tomado de (Chimarro, 2019)

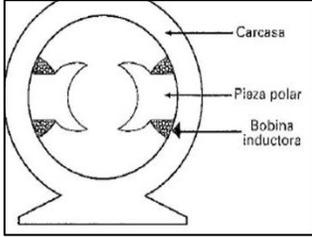
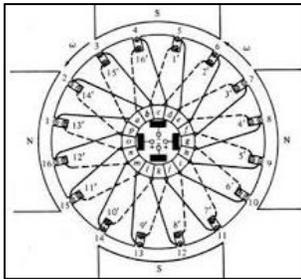
## 1.3 Partes que conforman el generador síncrono de polos salientes

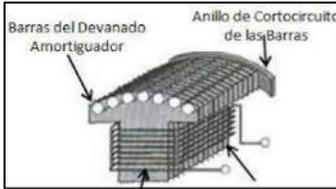
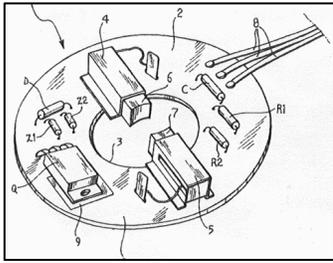
Los generadores síncronos de polo salientes se componen de elementos específicos, según la configuración o aplicación utilizada. Se pueden dividir en dos tipos: generadores síncronos de rotor de polos salientes y generadores síncronos de estator de polos salientes.

### 1.3.1 Rotor de polos salientes

Las partes que intervienen con el rotor son principales para el generador ya que este es el elemento rotativo el cual genera un campo magnético por medio de una inducción de corriente para ello se detalla todas las partes de que trabajan juntamente con el rotor en la Tabla 1.

Tabla 1 Partes del generador con rotor de polos salientes

Elemento	Descripción	Figura	Referencia
<b>Polo del rotor</b>	El rotor presenta expansiones polares que dan lugar a un entrehierro variable construido con un material resistente de chapas de acero. La característica que cumple este elemento es de trasladar el campo magnético.	 <p data-bbox="927 982 1154 1010">Figura 3. Polo del rotor</p>	(Orta, 2015)
<b>Pieza polar</b>	Este elemento tiene como trabajo principal cerrar el circuito magnético, también conservar el devanado de campo en un estado correcto.	 <p data-bbox="878 1297 1190 1325">Figura 4. Lámina del núcleo polar</p>	(Thotty, 2016)
<b>Devanado de campo</b>	El devanado es concéntrico formado por un paquete de bobinas con el fin de establecer un flujo magnético en el entrehierro.	 <p data-bbox="894 1654 1187 1682">Figura 5. Devanado de campo</p>	(Sánchez, 2016)

<p><b>Devanado amortiguador</b></p>	<p>Las bobinas de amortiguación o devanados consisten en montar varillas de cobre pesadas dentro de las ranuras del poste (la parte más ancha y cercana al entre hierro), que están todas en corto en ambos extremos del rotor.</p>		<p>(Muñoz, 2018)</p>
<p><b>Eje</b></p>	<p>Es la estructura que soporta al juego de bobinas, quienes se arrollan sobre el núcleo magnético.</p>		<p>(Rodríguez, 2021)</p>
<p><b>Cojinete</b></p>	<p>Los cojinetes son diseñados para evitar la fricción y disipar el calentamiento del motor y así evitar daños costosos como el desviado</p>		<p>(Cabrera, 2020)</p>
<p><b>Escobillas y porta escobillas</b></p>	<p>Las escobillas y porta escobillas de carbón son una de las partes fundamentales en el funcionamiento de motores eléctricos. Se define como el elemento que ejerce de conexión eléctrica entre la parte fija y la giratoria.</p>		<p>(Aulo, 2020)</p>

**1.3.2 Estator de polos salientes**

Esta parte del generador es muy importante ya que trabaja juntamente con el rotor la cual sirve para transmitir las corrientes y potencias eléctricas para lo cual se detalla los elementos que lo conforman en la Tabla 2.

Tabla 2 Partes del generador con estator de polos salientes.

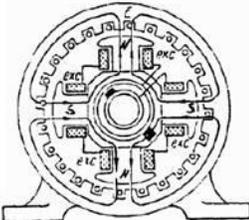
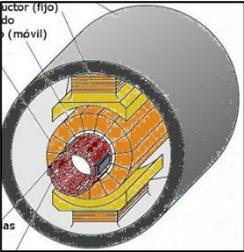
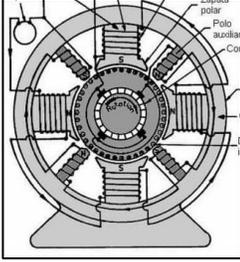
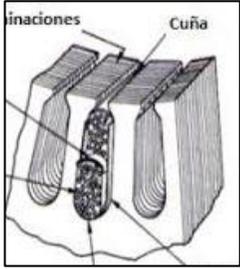
Elemento	Descripción	Modelo	Referencia
<b>Carcasa</b>	Este elemento tiene como misión mantener apretado el núcleo y está construido de acero específicamente de láminas.		(Arias, Guillermo, Lopez, & Javier, 2008)
<b>Núcleo del estator</b>	El núcleo del estator tiene alta resistencia para presiones y temperaturas elevadas, fabricadas de láminas de acero para permitir el flujo magnético.		(Pozueta, 2018)
<b>Devanado del estator</b>	El devanado del estator recibe el campo magnético creado por el inductor, lo que origina que en sus fases se induzcan una fuerza electromotriz. Los aislamientos de este elemento son construidos de diferentes materiales.		(Pozueta, 2018)
<b>Cuñas del estator</b>	Son fabricadas para soportar altas temperaturas, y su propósito es que el devanado se mantenga asegurado.		(Castillo, Garzón, & Michael, 2016)

Figura 13. Acuñaado del estator

---

**Sistema de aislamiento del devanado**

Su papel dentro del motor permite un buen desempeño térmico y eléctrico principalmente, contribuyendo así a que el motor tenga una vida útil adecuada. Este tipo de sistema asegura que no exista cortocircuitos, que exista aislamientos entre las espiras, conductores fijos independientemente de las vibraciones de la máquina y conservar el aislamiento a tierra.



Figura 14. Aislamiento del devanado.

(Castillo, Garzón, & Michael, 2016)

---

#### 1.4 Parámetros eléctricos del generador

Los parámetros de un generador son características muy importantes ya que de esto dependerá para la función que vaya a desempeñar y los rangos de trabajo que este pueda funcionar de manera eficiente y sin percances para lo cual se detalla los elementos que lo conforman en la Tabla 3.

Tabla 3 Partes del generador con estator de polos salientes.

Parámetros	Definición	Referencias
<b>Voltaje nominal</b>	El voltaje nominal es el voltaje que el equipo eléctrico no debe exceder durante el funcionamiento normal. Esto es nominal porque este voltaje común ayuda a caracterizar el artefacto.	(Cumbre Pueblos, 2019)
<b>Frecuencia nominal</b>	La frecuencia es el número de ciclos por segundo de una onda sinusoidal de corriente alterna. En otras palabras, la frecuencia es la velocidad a la que cambia una corriente eléctrica en un segundo. Se mide en hercios (Hz).	(Eléctrica, 2021)

---

<b>Velocidad</b>	El término "velocidad del generador síncrono" se refiere a la velocidad del generador cuando gira en sincronización con la frecuencia de la red. Sin embargo, esto se aplica a todo tipo de generadores.	(Asociación danesa de la industria eólica, 2017)
<b>Potencia aparente</b>	Un valor que representa la potencia aparente o total (S) de un circuito con una carga ineficiente que se puede obtener hallando la raíz cuadrada del resultado de la suma algebraica de los valores (según el teorema de Pitágoras de los triángulos rectángulos). Los valores de potencia no válida (Q) y potencia activa (P) se elevan al cuadrado.	(García, 2021)
<b>Potencia nominal</b>	La potencia nominal se define como la capacidad de un dispositivo eléctrico para realizar un trabajo o la cantidad de trabajo realizado en una unidad de tiempo. Su unidad de medida es el vatio (W).	(García, 2021)
<b>Factor de potencia</b>	El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (kW) y la potencia aparente (kVA), convertida en potencia útil como luz, calor y movimiento mecánico. El factor de potencia se utiliza para medir la eficiencia del consumo de energía cuando se convierte en energía útil como luz, calor y movimiento mecánico.	(Factorled, 2020)
<b>Factor de servicio</b>	El factor de servicio es un multiplicador y, cuando se aplica a una fuente de alimentación, indica la carga de potencia permitida que se puede soportar bajo ciertas condiciones de factor de servicio.	(Snell Group, 2017)

## 1.5 Modelado del generador síncrono

Antes de explicar los tipos de modelados se debe tener en cuenta que las maquinas síncronas se simplifican sus cálculos ya que se considera dos ejes ficticios como son el eje directo y el eje de cuadratura como se indica en la Figura 15.

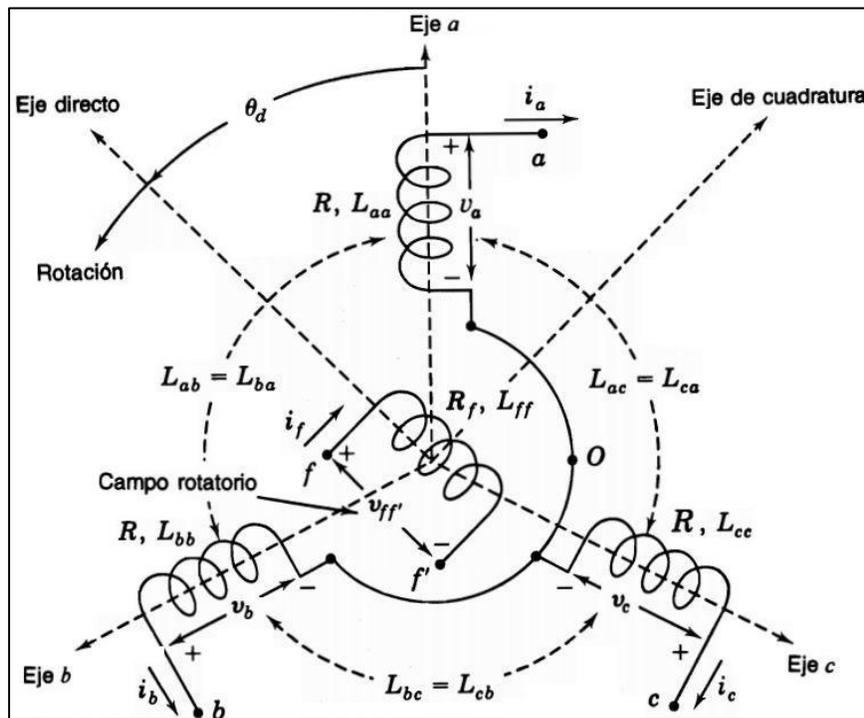


Figura 15. Generador trifásico que muestra las interacciones de cada inductancia por fase

Fuente: Tomado de (Cortés & Orjuela, 2020)

Donde el eje directo es el que se ubica norte-sur del rotor con el origen al centro magnético y el eje de cuadratura tiene el mismo origen en el eje directo pero su ubicación es perpendicular a este. Estos ejes ficticios nos permiten a simplificar el desarrollo analítico y las ecuaciones ya que se elimina el ángulo de posición entre el rotor y los ejes de las fases para ello se tiene un modelo dinámico simplificado y un modelo dinámico detallado. (Cortés & Orjuela, 2020)

### 1.5.1 Modelado dinámico simplificado

El modelado dinámico simplificado sirve para modelar las características eléctricas y mecánicas de una máquina síncrona simple pese a que su modelo es sencillo es capaz de representar algunas características de la dinámica de la máquina sin carga, el modelado se representa en la Figura 16.

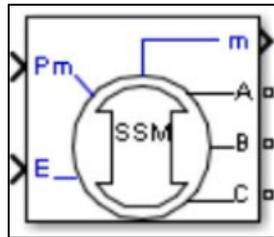


Figura 16. Modelo dinámico simplificado de la maquina síncrona.

Fuente: Tomado de (Cortés & Orjuela, 2020)

Donde los parámetros requeridos son:

Tabla 4 Parámetros de la maquina síncrona

Parámetro	Descripción
<b>Pn (VA)</b>	Potencia nominal.
<b>W (rad/s)</b>	Velocidad mecánica.
<b>Ra (Ω)</b>	Resistencia de armadura.
<b>LI (H)</b>	Inductancia síncrona.
<b>m</b>	Salida señales de medida.
<b>p</b>	Par de polos.
<b>F (Hz)</b>	Frecuencia.
<b>Vn (Vrms)</b>	Voltaje línea a línea.
<b>H (J(kg*m2))</b>	Constante de inercia.
<b>E (V)</b>	Tensión interna
<b>Kd (T/w)</b>	Factor de amortiguamiento

Fuente: Tomado de (Cortés & Orjuela, 2020)

Para el modelo de generadores síncronos como se muestra en la Figura 16, este modelo se divide en 2 tipos de reactancias la primera conformada por la reactancia a lo largo del eje polar denominada eje directo, y la segunda conformada a lo largo del eje entre los polos denominada cuadratura. (Mazariego Elías, Morales Machuca, & Vásquez Roque, 2017)

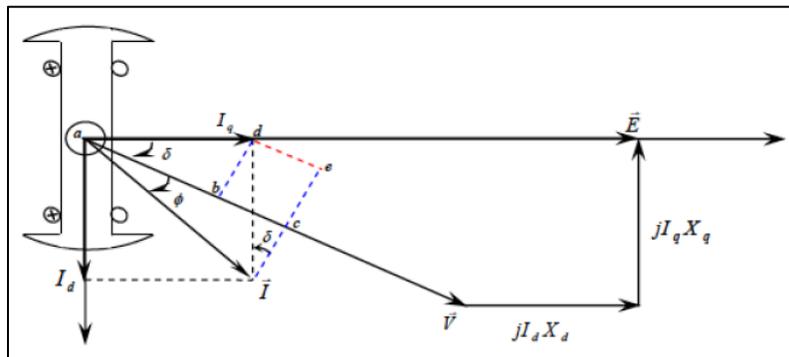


Figura 17. Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes.

Fuente: Tomado de (Estrada Cruz, 2018)

En la Figura 17 se muestra el diagrama factorial del generador de polos salientes en la cual se observa el flujo magnético que se encuentra dividido en 2 ejes d y el eje q, al igual que las corrientes nombradas como  $I_q$  e  $I_d$ . Si se produce un incremento en la intensidad Se dice que la energía pase de un estado a otro y viceversa también y los valores cambian de un tiempo determinado para que el sistema se estabilice a las nuevas variables de funcionamiento. (Estrada Cruz, 2018)

## 1.5.2 Modelado dinámico detallado

El modelo dinámico detallado del generador síncrono tiene como objetivo eliminar la inductancia en la posición del rotor con el fin de observarse los parámetros del rotor y las cantidades eléctricas desde el estator.

Los subíndices son:

R, s = Cantidades del rotor y el estator.

$L_m$  = Inductancia de magnetización y dispersión.

F, k = Cantidades de los devanados de campo y amortiguamiento.

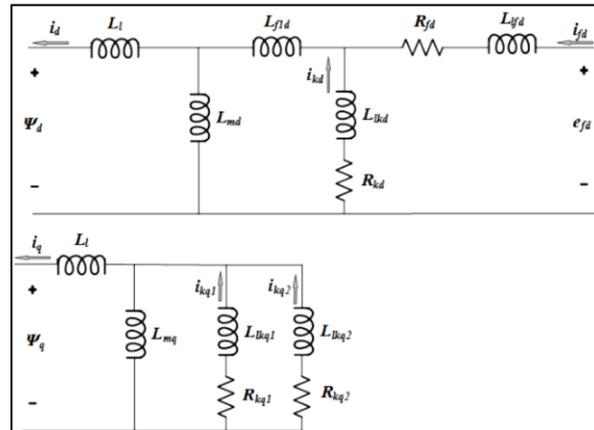


Figura 18. Modelo dinámico detallado de la maquina síncrona.

Fuente: Tomado de (Cortés & Orjuela, 2020)

Las características para el modelo dinámico están enfocadas en las reactancias del generador síncrono con las corrientes, dependiendo del estado de la máquina los estándares son determinados por medio de características de funcionamiento cómo son inductancia operacional del eje directo de transformadas en Laplace, la inductancia operacional del eje de cuadratura en transformada a Laplace y la función de transferencia del estator con respecto al campo.

También los periodos de tiempo de las corrientes de cortocircuito cómo se indican en la Figura 19 son periodos transitorios, permanentes y sub transitorios. (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

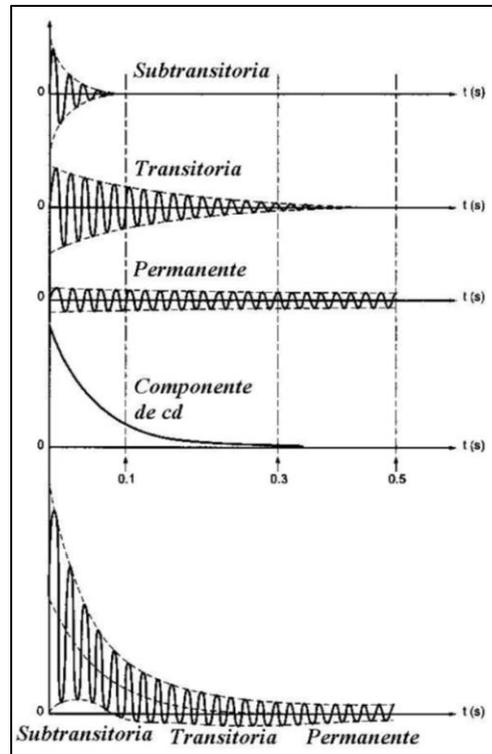


Figura 19. Periodos de tiempo para las corrientes de cortocircuito.

Fuente: Tomado de (Trinidad Hernández, 2010)

- a) Periodo transitorio: en este periodo el rotor es el causante de este problema ya que se produce una descarga de corriente en un lapso de largo de tiempo, lo que ocasiona que la descarga se conduzca al bobinado y se genere un tipo de descarga amortiguada. (Martínez Ferrán, 2017)
  
- b) Periodo sub transitorio: en este periodo el arrollamiento es el causante del problema el cual está ubicado en la parte superior de los polos del rotor del generador, esto sucede cuando se produce un cortocircuito por las conmutaciones entre el estator y el rotor, ocasionando corrientes que se dirigen al amortiguador y formando una inestabilidad en el generador. (Martínez Ferrán, 2017)

- c) Periodo sostenido o permanente: en este proceso el tiempo se extiende en un largo periodo hasta que las protecciones se accionan y liberan el aumento de intensidad en la fase de excitación del campo y la motriz. (Martínez Ferrán, 2017)

## 1.6 Estudio de estabilidad de voltaje

El equilibrio de tensión se define como la destreza que tiene un sistema de potencia para conservar las dimensiones de voltaje en todos los nodos en un costo autorizado en condiciones de operación usual o luego de haber sido sometido a un disturbio, y es dependiente de la capacidad del sistema de conservar o restaurar la estabilidad entre la demanda y la generación del sistema. Una consecuencia de esta inestabilidad es la pérdida de carga en varias zonas, o la salida de líneas de transmisión, o la pérdida de sincronismo de ciertos generadores. Estas estabilidades de voltaje se clasifican en estabilidad de voltaje ante pequeños disturbios, grandes disturbios de corto plazo y largo plazo los que se detallan en la Tabla 5.

*Tabla 5 Tipos de estabilidad de voltaje*

<b>Estabilidad de voltaje</b>	<b>Definición</b>
<b>Pequeños disturbios</b>	Esto se define con la capacidad de mantener al sistema con voltaje constante después de pequeños disturbios como por ejemplo los incrementos en la carga.
<b>Grandes disturbios</b>	Esto se define con la capacidad de mantener al sistema con voltaje constante después de grandes disturbios como por ejemplo fallas en el sistema de transmisión, perdidas de generación o cortocircuitos.
<b>Corto plazo</b>	Esta estabilidad involucra la dinámica en el tiempo de los elementos rápidos de la carga, este periodo es en el orden de

---

	varios segundos, y para analizarle es en función de ecuaciones diferenciales del sistema.
<b>Largo plazo</b>	Esta estabilidad involucra la dinámica en el tiempo de los elementos lentos tales como limitaciones de la corriente del generador, cargas controladas por temperatura. Este periodo es se puede extender a varios minutos, y para analizarle se requiere simulaciones a largo plazo.

---

*Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)*

También se considera estabilidad de voltaje cuando suceden eventos catastróficos en el sistema lo que causa un colapso de voltaje esto puede deberse a que no existe suficiente potencia reactiva y esto produce que haya una mayor reducción en el voltaje, los tipos de colapsos de voltaje se clasifican en colapso de voltaje de largo tiempo. Corto tiempo y de voltaje transitorio. (Patiño & Limas, 2018)

- **Colapso de voltaje de largo tiempo.** Es el resultado eventos inestables producidos por pequeños disturbios entre la carga y la generación que provocan sobrecargas en el sistema, los cuales duran desde minutos hasta varias horas.
- **Colapso de voltaje de corto tiempo.** Es el resultado eventos inestables producidos por varios disturbios ocasionados debido a grandes cambios en el suministro o el consumo de reactivos, que hacen que se presente una rápida disminución de los reactivos del sistema; estos eventos pueden durar entre varios segundos hasta minutos.
- **Colapso de voltaje transitorio.** Es el resultado eventos inestables producidos por disturbios muy grandes como la pérdida de paso y el arranque de motores de inducción, provocando una rápida pérdida de reactivos, los cuales duran menos de 15 segundos.

## 1.7 Curvas de potencias - voltaje

Las curvas de potencia son necesarias para que los equipos funcionen adecuadamente y el que permiten la transmisión la potencia correctamente IA que esta variable afecta al voltaje para lo cual existen el método de las curvas Q-V y el método de las curvas P-V. Estos métodos con frecuencia se utilizan basados en el flujo de potencia y dan límites de capacidad de carga en estado estable.

### 1.7.1 Método de las curvas Q-V

El método de las curvas Q-V interpreta el colapso del voltaje el cual nos indica que hay un balance inadecuado de potencia reactiva de esta forma el método consiste en aumentar el consumo la potencia reactiva en cada barra de la red hasta colapsar el voltaje, este método gráfico determina la cantidad de potencia reactiva que debe ser inyectada a una barra para mantener un nivel de voltaje deseado esto se representa en la Figura 20. (Patiño & Limas, 2018)

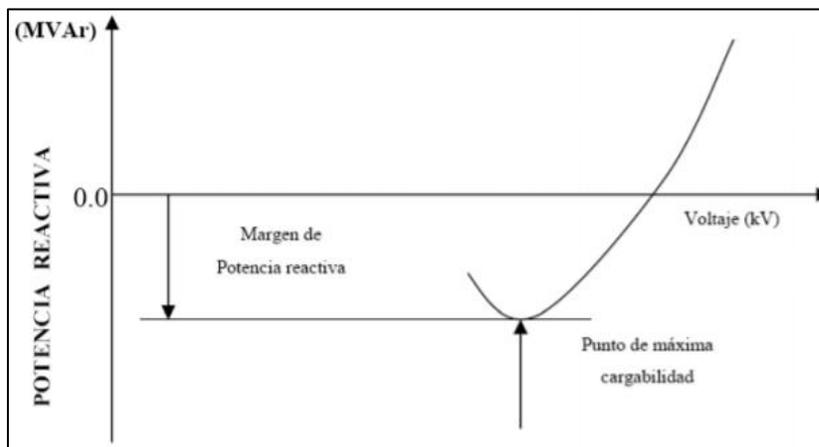


Figura 20. Curva Q-V.

Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)

La curva mostrada en la Figura 20 indica el valor máximo de la carga  $Q$  identificando el punto de colapso y también proporciona una medida del margen de potencia reactiva al colapso en esa barra.

Este colapso de voltaje parte desde el nodo más débil y se va extendiendo a otros nuevos por lo que el nodo más débil es el más importante para realizar el análisis usando la técnica de la curva  $Q-V$ . Para mantener un voltaje en niveles adecuados en el nodo es necesario hacer una compensación de reactivos ya que si hay pocos reactivos el voltaje descende hasta llegar al punto crítico. (Patiño & Limas, 2018)

En la Figura 21 que se muestra a continuación se observa el corte de la curva  $Q-V$  con el eje horizontal esto quiere decir que no se genera ninguna potencia reactiva, por ende, corresponde a la barra de carga en condiciones de operación normal. Esta gráfica representa la potencia reactiva mínima que se debería generar para que la barra tenga una atención mínima aceptable.

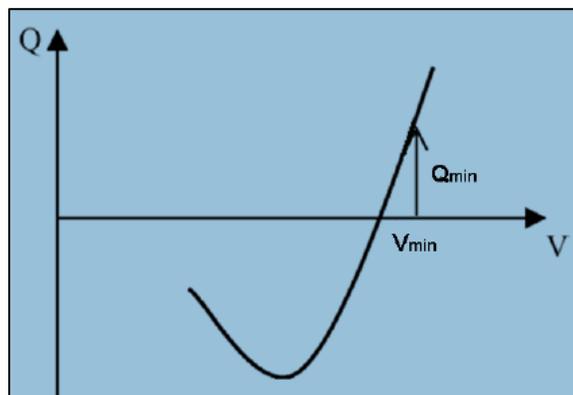


Figura 21. Curva  $Q-V$ .

Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)

Para la siguiente Figura 22 se observa que no existe el punto de corte lo que significa que el sistema está en un colapso de tensión y se debe aportar una potencia reactiva para salir de él. (Patiño & Limas, 2018)

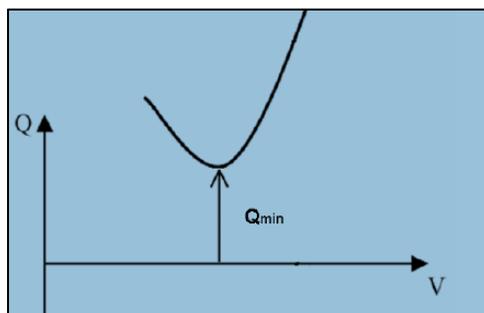


Figura 22. Curva Q-V.

Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)

### 1.7.2 Método de las curvas P-V

El método de la curva P-V simula aumentos de cargas de muchas formas esto dependerá de cómo uno elija las barras en donde se desea aumentar la carga activa o reactiva esto no es más que elegir un vector en el espacio multidimensional de la red para realizar los cálculos. La curva P-V que se observa en la Figura 23, indica cuando hay un aumento de potencia activa transmitida mientras que los voltajes decaen lentamente.

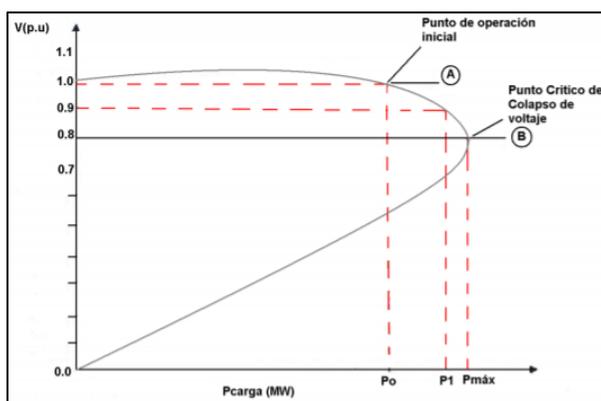


Figura 23. Curva P-V.

Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)

En la Figura 23 también se observa el punto crítico cuál es el límite entre la estabilidad y la inestabilidad de voltaje esto quiere decir que si el punto de operación se encuentra ubicado en A hay un pequeño incremento en la transferencia de potencia activa y esto lleva a una pequeña disminución del voltaje. para el otro caso ocurre lo contrario si el punto inicial A se encuentra operando en el punto crítico B hay un incremento de potencia lo que lleva a una gran disminución de voltaje y por último si la potencia transferida se encuentra ni en el punto B esto provocaría una disminución drástica en los voltajes y en la potencia transferida. (Patiño & Limas, 2018)

La Figura 24 muestra ecuaciones en función de la impedancia de línea y la impedancia de carga se indican las variaciones de voltaje la corriente y la potencia. Esta gráfica indica que a medida que crece la demanda de la impedancia de carga la corriente aumenta y el voltaje disminuye también la potencia activa llega a su máximo valor este punto representa el límite de la transferencia de potencia, si la demanda se incrementaría, el sistema dejaría de ser estable y los voltajes disminuyen rápidamente. Con esto se podría decir que a mayor transferencia de potencia mayor será el voltaje en los nudos.

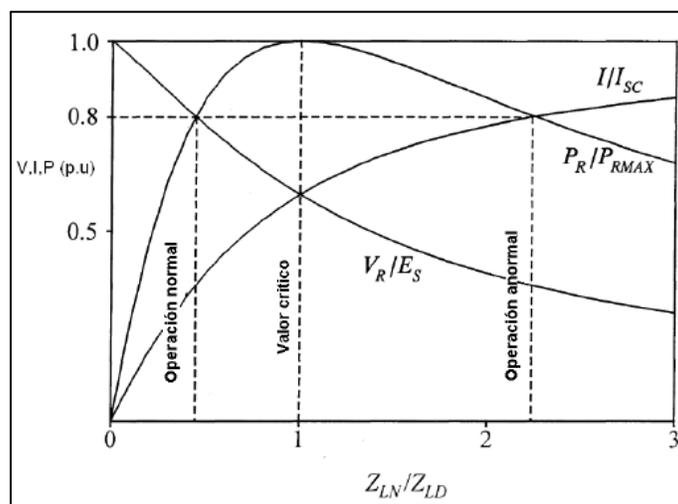


Figura 24. Curva P-V.

Fuente: Tomado de (Patiño & Limas, 2018)

## CAPÍTULO 2

### Determinar el funcionamiento del generador

#### INTRODUCCION

Los problemas de estabilidad y control de voltaje son muy familiares para la industria de servicios eléctricos, pero ahora están recibiendo una atención especial por parte de todos los analistas e investigadores de sistemas de energía. Con el tamaño creciente junto con las presiones económicas y ambientales, la posible amenaza de inestabilidad de voltaje se está volviendo cada vez más pronunciada en las redes del sistema de energía. La estabilidad de tensión cubre una amplia gama de fenómenos. Debido a esto, la estabilidad del voltaje significa diferentes cosas para diferentes ingenieros. La inestabilidad de voltaje es un proceso dinámico mientras que, en contraste con la estabilidad del ángulo del rotor, la dinámica de voltaje involucra principalmente cargas y los medios para el control de voltaje.

#### 2.1 Lugar de estudio

El generador síncrono de polos salientes está ubicado en las instalaciones de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica del Norte ubicada en la ciudad de Ibarra, Avenida 17 de Julio 15-21 y General José María Córdova, lugar en donde se realizará el estudio perteneciente a este trabajo de grado.



Figura 25. Campus UTN

Fuente: (Autor, 2022)

## 2.2 Metodología

Por medio del software MATLAB & Simulink R2020a se desarrollará la determinación de operatividad del generador síncrono de polos salientes en estado estable, permitiendo mostrar simulaciones de la funcionabilidad del generador síncrono esquematizado en un pequeño sistema eléctrico de potencia. Para realizar el diagnóstico del funcionamiento del generador dentro de un pequeño sistema eléctrico de potencia se muestra un esquema del procedimiento en el siguiente diagrama de flujo de la Figura 26, nos permitirá cumplir con el objetivo de este capítulo.

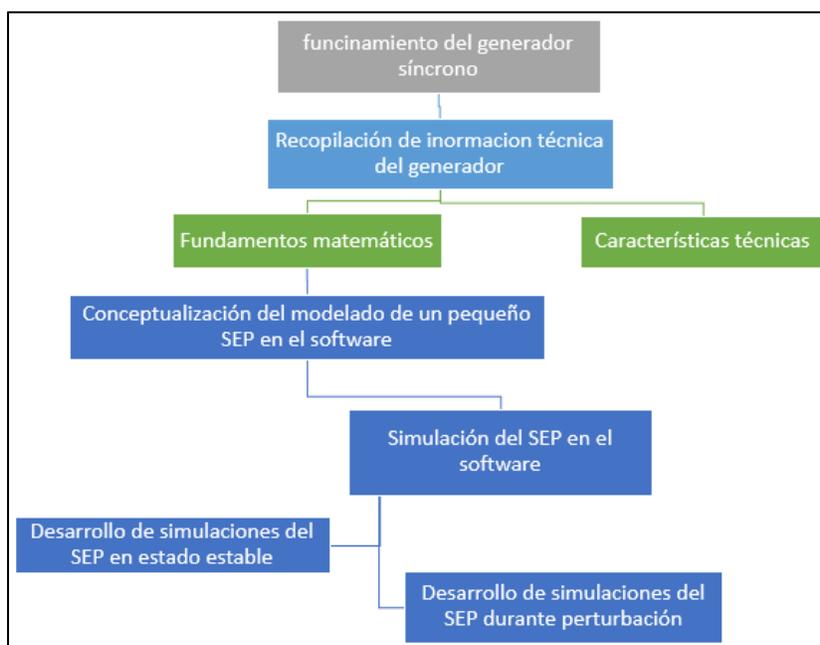


Figura 26. Diagrama de flujo de funcionamiento del generador

Fuente:( Autor, 2022)

Para determinar el funcionamiento del generador síncrono de polos salientes es necesario desarrollar cada uno de los pasos mencionados en el diagrama de flujo enfocándonos en lo que comprende a estabilidad de voltaje del generador síncrono, permitiéndonos encontrar las curvas QV y PV en la simulación.

### **2.2.1 Software MATLAB & Simulink R2020a**

El software Matlab es un programa interactivo para cálculo numérico y tratamiento de datos. Contiene muchas herramientas y utilidades que permiten además diversas funcionalidades, como la presentación grafica en diferentes dimensiones.

Matlab se ha convertido en una poderosa herramienta tanto en el ámbito educativo como en el industrial. A nivel educativo se ha convertido en la principal herramienta de los cursos relacionados con el álgebra Matricial, tanto a nivel básico como a nivel superior. A nivel industrial, tienen una gran cantidad de aplicaciones en muchos problemas prácticos de ingeniería y matemáticas. Es altamente utilizado en geofísica, en el diseño de sistemas de control, en procesamientos de señales, en inteligencia artificial y redes neuronales, en simulación de sistemas dinámicos, en optimización, en problemas de modelaje y sistema dinámicos. (Ayala Sigcha , 2016)

Simulink es una herramienta interactiva para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, nos permite construir diagramas de bloque gráficos, evaluar el rendimiento del sistema y refinar sus diseños. Simulink es la herramienta a escoger para el diseño de sistemas de control, diseños DSP, diseños de sistemas de comunicaciones y otras aplicaciones de simulación. Como una extensión de Matlab, Simulink adiciona muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de Matlab. Simulink es una extensión de Matlab y siempre está disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink. (Vivanco Loaiza, 2013)

### **2.3 Estabilidad de la tensión**

Un sistema de potencia en operación de tensión estable al ser sometido a una perturbación, las tensiones cercanas a las cargas se aproximan a los valores de equilibrio post - perturbación. La estabilidad de voltaje está relacionada con la estabilidad transitoria de un

sistema de potencia. El análisis de la estabilidad de voltaje se realiza mediante simulaciones del sistema modelado por ecuaciones algebraicas diferenciales no lineales.

Según la naturaleza de la perturbación y la dinámica del sistema/subsistema, la estabilidad de la tensión puede considerarse un fenómeno lento o rápido. El análisis de flujo de carga revela cómo los valores de equilibrio del sistema con la variación en los parámetros y controles del sistema. El flujo de potencia es una herramienta de análisis estático ya que la dinámica no se considera explícitamente. Muchos de los índices utilizados para evaluar la estabilidad de la tensión están relacionados con el estudio del flujo de carga.

### **2.3.1 Causas de caída de tensión**

Las posibles causas que pueden ocasionar o provocar la inestabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia son los elementos que provoquen una respuesta lenta en el sistema, como por ejemplo los transformadores con un funcionamiento de tap bajo carga (OLTC), los limitadores de corriente de las unidades generadoras, también puede ocasionar inestabilidad de tensión las desconexiones forzadas de líneas de transmisión y los incrementos o disminución de la potencia de carga.

### **2.3.2 Estabilidad de la tensión con pequeñas perturbaciones**

El concepto de estabilidad de voltaje de pequeña perturbación está relacionado con la estabilidad de estado estable y se puede analizar utilizando un modelo de pequeña señal del sistema. Este concepto se utiliza para la determinación en todo momento de cómo los voltajes responden frente a los cambios pequeños de cargabilidad.

### **2.3.3 Colapso de la tensión**

Los colapsos de tensión pueden ser totales o parciales esto se da cuando los voltajes inestables en un sistema de potencia son posteriores a las perturbaciones cerca de las cargas y están por debajo de los límites aceptables por lo tanto la seguridad de los voltajes es la forma en que opera de manera estable y también permanece estable luego de contingencias aumentos de carga.

## **2.4 Comparación de la estabilidad del ángulo y la tensión**

Con la sobrecarga del sistema de energía debido a factores económicos y de recursos relacionados con la adición de generadores, transformadores, líneas de transmisión y equipos relacionados, la inestabilidad del voltaje se convirtió en un problema grave. La inestabilidad angular está directamente relacionada con la potencia real y de manera similar, la potencia reactiva es esencial para los análisis de inestabilidad de voltaje.

Es bien sabido que la potencia reactiva mantiene voltajes en los sistemas de alimentación de CA. Por ejemplo, una carga del 10 % aumenta las pérdidas de la red en casi un 20 %. Además, admite inyecciones reactivas, ya que reducirá la caída de voltaje a mayor carga.

### **2.4.1 Algunas medidas**

Dado que la estabilidad de la tensión está relacionada con la potencia reactiva y el aumento de las pérdidas de potencia reactiva con el aumento de la carga, las contramedidas están relacionadas con el apoyo de la potencia reactiva o los dispositivos como transformadores que controlan las tensiones. Es importante tener en cuenta que los

transformadores no transmiten potencia reactiva al sistema para evitar una inestabilidad del voltaje, sino que afecta a las cargas dependientes del voltaje. Por lo tanto, estas medidas deben usarse con prudencia por lo que son útiles, pero de lo contrario podrían deteriorar la condición.

Ciertas contramedidas para evitar la inestabilidad de voltaje son:

- Compensación en serie: condensadores (TCSC, FACTS, etc.)
- Compensación de derivación: inyección de potencia reactiva en las ubicaciones adecuadas
- Aumento de tensión en los terminales del generador (solo es posible un control limitado)
- Bloqueo de OLTC de carga final
- aumento del grifo del transformador del generador
- Desconexión de carga estratégica (en caso de subtensión)

Dado que los problemas de inestabilidad de voltaje están relacionados con los bajos voltajes cerca de los extremos de la carga, las contramedidas que soportan la potencia reactiva del sistema en el extremo de la carga serán más efectivas. Los controles de generación de cambios tendrán un uso limitado porque la potencia reactiva no puede transmitirse a largas distancias.

#### **2.4.2 Sistemas por unidad PU**

El valor en por unidad de cualquier cantidad está definido como una relación de la cantidad a una base y puede expresarse como un decimal. La relación en por ciento es 100 veces el valor en por unidad.

Los dos métodos de cálculo tanto en por unidad y porcentual, son más informativos y más simples que los amperes, los volts y los ohms reales.

$$\text{Impedancia valor PU} = \frac{\text{Impedancia valor real}}{\text{Impedancia valor base}} \quad \text{Ecuación 1}$$

### 2.4.3 Ley de ohm para inductancia

En un circuito de corriente alterna además de una resistencia podemos tener un capacitor (capacitancia) y una bobina (inductancia), en corriente continua la inductancia y capacitancia no tenían efecto alguno, pero en corriente alterna es diferente. Teniendo en cuenta un circuito donde tenemos elementos como una fuente de corriente alterna V conectado a una resistencia R, una inductancia L y una capacitancia C podemos aplicar la ley de Ohm en alterna en donde para encontrar la reactancia inducida XL y la reactancia capacitiva XC se aplican las siguientes ecuaciones:

$$WL = W * L \quad \text{Ecuación 2}$$

$$WC = \frac{1}{W * C} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

$W=2\pi f$  (siendo f la frecuencia en hertz [Hz])

L = inductancia en henrios (H)

C = Capacitancia en faradios (F)

## 2.5 Flujo de potencia reactiva y colapso de la tensión

Algunas situaciones en el sistema de potencia causan problemas en la potencia reactiva esto conduce a un colapso algunas de estas situaciones son las siguientes:

- **Líneas de transmisión largas:** un sistema de energía estas situaciones crean problemas de voltaje durante condiciones de carga ligera o pesada.
- **Líneas de transmisión radiales:** Las pérdidas en una línea EHV en la red Una mejora en la respuesta efectiva del sistema en algunas situaciones el aumento de potencia reactiva que entrega a las niñas de carga es menor que el aumento de potencia reactiva requerida por la carga. Debido a esto un pequeño aumento de la carga hace que el sistema alcance un estado de tensión inestable.
- **Escasez de energía reactiva local:** Esto puede ocurrir cuando ocurre una interrupción desorganizada o un programa de mantenimiento causa una escasez de energía reactiva por lo que al intentar importar energía reactiva a través de las líneas largas no se tendrá éxito y produciría una caída de voltaje considerable.

## 2.6 Formulación matemática del problema de estabilidad de la tensión

La forma menos rápida para el análisis de inestabilidad con problemas de estado estacionario utiliza la simulación de flujo de energía. Se utilizan dos métodos basados en el flujo de potencia que son Curvas PV y curvas QV. Estos dos métodos dan límites de capacidad de carga en estado estable que están relacionados con la estabilidad del voltaje. Los programas de flujo de carga convencionales se pueden demostrar las curvas P-V y son útiles para el análisis conceptual de la estabilidad del voltaje y para el estudio de sistemas radiales.

El modelo que se utilizará para observar el comportamiento la atención en una sola línea como se muestra en el sistema radial de la Figura 27.

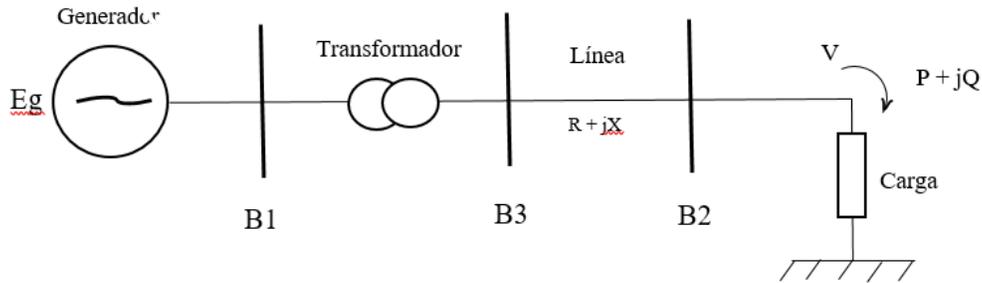


Figura 27. Diagrama unifilar del SEP

Fuente: (Autor, 2022)

### 2.6.1 Criterio de curva PV

Por medio del sistema radial de 3 barras, en el extremo emisor hay un elemento generador, que mantiene la tensión constante al valor  $V$  con impedancias de la potencia transmitida, dada esta tensión es posible relacionar el voltaje  $V$  y  $fp$  con las potencias en ambos extremos. Se considerará el caso de una carga perfectamente compensada ( $Q_n=0$ ). Para este caso resultan las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$Prn = \frac{1}{2} \text{sen } 2\delta - k \cdot \text{sen} 2\delta \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

$k$  = Es un factor de la relación de impedancia entre la parte real y la parte reactiva ( $R/X$ )

$\delta$  = Es el ángulo del factor de potencia

$$Vn^2 = \left(\frac{1}{2} \text{sen } 2\delta\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} - (k + Prn)Prn}$$

Ecuación 5

Por medio de la Ecuación (4) y (5) se tiene el voltaje V, en función de la potencia activa P mostrando la Figura 28.

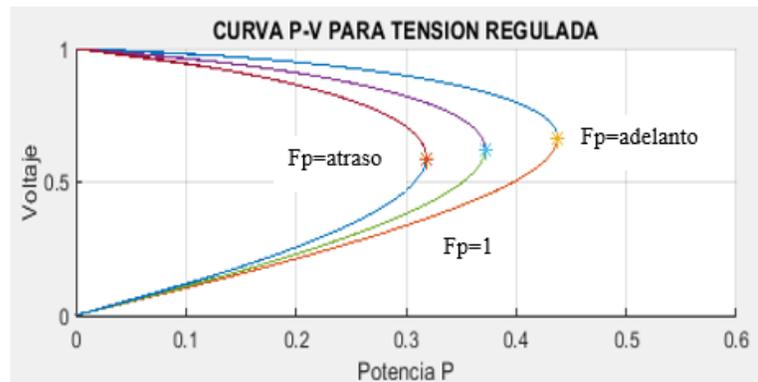


Figura 28. Curvas PV para distintos factores de potencia

Fuente: (Autor,2022)

En la Figura 28, cada valor  $f_p$  la solución de mayor tensión indica el caso de tensión estable mientras que el de menor tensión se encuentra en una zona de tensión inestable. La carga por encima de  $P_{max}$  causa una inversión de la tensión y la carga mientras que la reducción de tensión provoca un aumento de corriente absorbida por la carga.

Para el caso de un sistema de una sola línea la inestabilidad de la tensión se produce a partir de la carga en la barra y ciertas inyecciones de Q, esto indica la singularidad del jacobiano en las ecuaciones de flujo de carga por lo que el nivel de inestabilidad de la tensión se evalúa por el valor singular mínimo. Algunos resultados que tienen importancia para la estabilidad de la atención son los siguientes:

1. El límite de estabilidad de la tensión se alcanza cuando más se acerque la magnitud de la Ecuación 2 a la unidad menor será el margen de estabilidad.

$$1 = \left| \frac{S}{Y_{LL} * V^2} \right| \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

S= potencia compleja de la barra de la carga.

YLL= admitancia de barra de carga.

V= tensión de barra de carga.

2. El límite de carga de una línea de transmisión puede determinarse a partir de la Ecuación 3

$$|S| = \frac{V_{cri}^2}{X_{cri}} \quad \text{Ecuación 7}$$

X<sub>cri</sub> Es la reactancia crítica del sistema a partir de la cual se pierde la estabilidad atención esta también se puede expresar como la Ecuación (8)

$$X_{cri} = \frac{E^2}{2P} * (-\tan\phi + \sec\phi) \quad \text{Ecuación 8}$$

## 2.6.2 Criterio de curva QV

Este se basa en la capacidad del sistema para suministrar potencia reactiva a la carga para una demanda de potencia real determinada, por lo que es conveniente separar la demanda de la potencia reactiva de la potencia real como se muestra en la Figura 29.

Donde  $PL(V)$  y  $QL(V)$  son la demanda de carga y  $PS(V)$  y  $QS(V)$  son las potencias suministradas por la fuente a la carga.

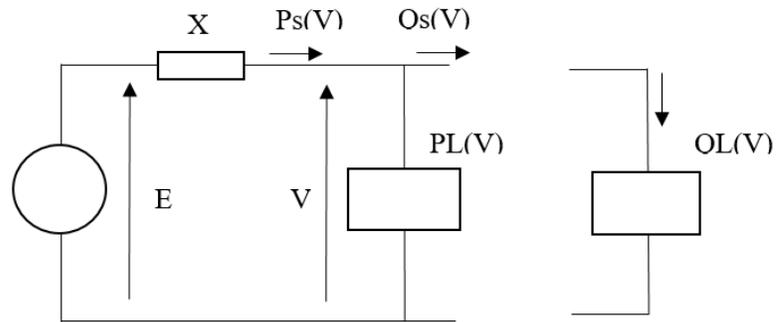


Figura 29: Circuito equivalente para determinar la potencia reactiva

Fuente: (Autor,2022)

Como la potencia real está conectada al enlace de transmisión se cumple que  $PL(V) = PL(V)$  de igual manera durante el normal funcionamiento  $QL(V) = QS(V)$  pero a efecto de análisis de estabilidad el vínculo entre  $QL(V)$  y  $QS(V)$  están teóricamente separados.

Las potencias de carga real y reactiva están expresadas en la ecuación (9) y (10):

$$PL(V) = PS(V) = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad \text{Ecuación 9}$$

$$QS(V) = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad \text{Ecuación 10}$$

Eliminando las funciones trigonométricas usando la identidad de la ecuación 11 se obtiene la ecuación 12:

$$\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\left(\frac{EV}{X}\right)^2 = PL^2(V) + \left(QS(V) + \frac{V^2}{X}\right)^2 \quad \text{Ecuación 12}$$

Y la solución para QS(V) resulta:

$$QS(V) = \sqrt{\left(\frac{E \cdot V}{X}\right)^2 - (PL \cdot V)^2} - \frac{V^2}{X} \quad \text{Ecuación 13}$$

La Ecuación (13), determina la característica de voltaje en función de potencia reactiva y muestra cuanto reactivo suministrará la fuente si el sistema se carga solo con potencia real PL(V) y la tensión de carga será una variable.

Para una carga de potencia real idealmente rígida PL(V) = PL = constante con la Ecuación (13), toma la forma de una parábola invertida como se muestra en la siguiente Figura 30

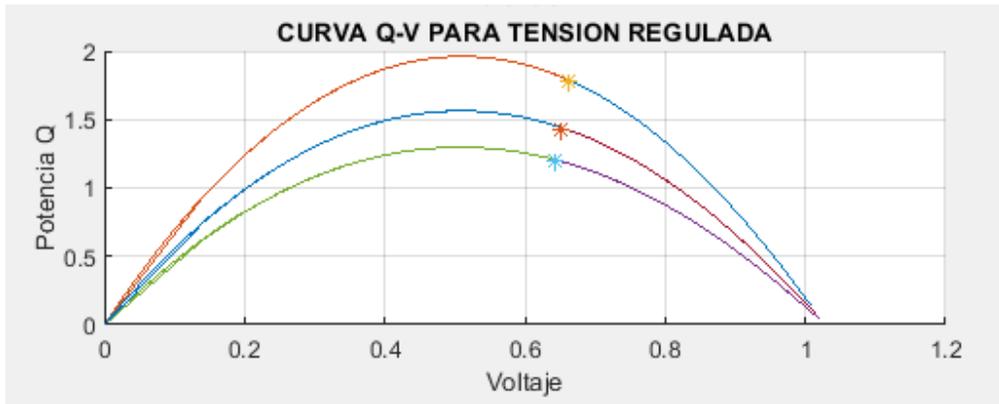


Figura 30. Criterio de curva QV

Fuente: (Autor,2022)

Hasta el momento se consideró como características del factor de potencia de carga constante afectan a la atención que sigue la estabilidad de un sistema, esto se ve reflejado en QV, la cual manifiesta la sensibilidad y variación de la tensión en la barra con respecto a las inyecciones de potencia reactiva. Consideramos el nuevo sistema radial simple que es suficientemente preciso para suponer que  $X \gg R$  i.e.,  $\phi \approx 90^\circ$ .

$$Q = \frac{EV}{X} * \cos\delta - \frac{V^2}{X} \tag{Ecuación 14}$$

$$V^2 - EV\cos\delta + QX = 0 \tag{Ecuación 15}$$

Tomando la derivada con respecto a V se obtiene la Ecuación (16)

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{E\cos\delta - 2V}{X} \tag{Ecuación 16}$$

Teniendo en cuenta estos parámetros el sistema es estable en intención en la región donde  $dQ/dV$  es positivo mientras que la estabilidad en tensión se alcanza en  $dQ/Dv=0$  Que también puede denominarse el punto de funcionamiento crítico. El valor límite de la transferencia de potencia reactiva en la fase límite de la estabilidad de atención viene dado por la Ecuación (17).

$$Q_{lim} = \frac{V^2}{X} * \cos 2\delta \quad \text{Ecuación 17}$$

Otros factores que contribuyen al colapso de la tensión son fuerza del sistema de transmisión, niveles de transferencia de potencia, características de la carga, límites de potencia reactiva y características de los dispositivos de compensación de potencia reactiva.

### 2.6.3 Voltaje interno del generador

Para el diagrama del sistema eléctrico de potencia de la figura 28 asumiendo que la carga es una barra infinita, la metodología para calcular el voltaje interno del generador en estado estable depende de reactancia equivalente del sistema, del voltaje en los terminales del generador y de la corriente del sistema como se muestra en la ecuación 18.

$$Ea = Vt + (Xg \times I) \quad \text{Ecuación 18}$$

Para encontrar la corriente del sistema eléctrico de potencia se obtiene de la relación entre los voltajes de la barra infinita y el voltaje de los terminales del generador entre la reactancia entre la barra infinita y la barra 1 de la figura 28.

$$I = \frac{Vt - Voo}{Xoo} \quad \text{Ecuación 19}$$

Para encontrar la reactancia entre la barra infinita y la barra 1 de la figura 28 se obtiene de la sumatoria de reactancias que se encuentran entre ambas barras, para este caso la suma de reactancia del transformador y el paralelo de las reactancias de las 2 líneas de transmisión línea 1 y línea 2.

$$X_{oo} = X_t + \frac{x_1 \times x_2}{x_1 + x_2} \quad \text{Ecuación 20}$$

Conociendo voltaje en terminales y voltaje de barra infinita podemos calcular la potencia del generador para una reactancia equivalente

$$P = \frac{V_t \times V}{X_{oo}} \times \text{sen}\delta \quad \text{Ecuación 21}$$

## 2.7 Métodos de evaluación de estabilidad de tensión

Dentro de la evaluación de estabilidad de tensión se emplean métodos con el propósito de identificar secciones que sean vulnerables en un sistema con el fin de mejorar la seguridad de funcionamiento de un sistema.

Estos métodos deben ser eficientes en cuanto a su precisión y rapidez ayudando al operador del sistema a seleccionar las distintas decisiones en el momento adecuado.

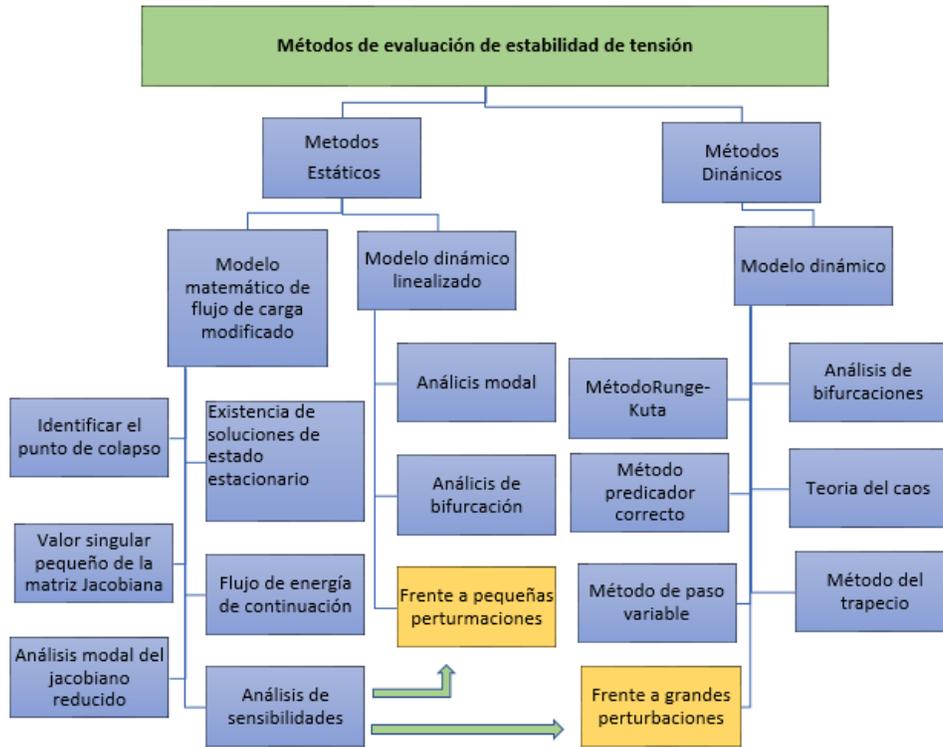


Figura 31. Métodos de evaluación de estabilidad de tensión

Fuente: (Autor,2022)

En la Figura 31 se tiene dos métodos para la evaluación de estabilidad de tensión, que son el método de estado estable y métodos dinámicos, dependiendo del tipo de simulación y de las pruebas a realizar para identificar distintos problemas de estabilidad de tensión.

## 2.8 Análisis de la estabilidad de la tensión

El análisis estabilidad de implicados aspectos importantes que son los siguientes:

- **Proximidad a la inestabilidad de la tensión:** estas inestabilidades pueden medirse en cantidades físicas como a nivel de carga, flujo de potencia real a través de una interfaz crítica y la reserva de potencia reactiva.
- **Mecanismo de la inestabilidad de la tensión:** ¿pero es comprobar la inestabilidad de la atención las preguntas de realizarse son cómo y por qué se produce la estabilidad de la tensión? ¿cuáles son las principales causas que conducen a la inestabilidad? ¿cuáles son las zonas de tensión débil?, etc.

Estas técnicas de análisis permiten examinar una amplia gama de condiciones del sistema ya que describen el problema para dar soluciones contribuyentes.

### **2.8.1 Requisitos de modelación de diversos componentes del sistema eléctrico**

La moderación de la carga es importante para el análisis de estabilidad ya que representa detalladamente el sistema de subtransmisión en una zona contención débil. Por lo cual es necesario considerar la dependencia de la tensión y la frecuencia de las cargas para lo que también es necesario modelar los motores de inducción.

### **2.8.2 Generadores y sus controles de excitación**

Necesariamente se debe tener en cuenta las características estáticas del regulador, la compensación de la carga, los SVS (sistemas de varilla estática), la protección y los controles también deben modelarse adecuadamente.

### 2.8.3 Análisis dinámico

Los modelos dinámicos para algunas cargas como grandes motores asíncronos y síncronos, algunos de estos en específico son inadecuados para complejos modelados de carga, para ello se han desarrollado los llamados modelos dinámicos genéricos que describen el comportamiento de una carga cuando es sometida a perturbaciones severas de tensión

El modelo para sistemas de análisis estabilidad es similar a la estructura del análisis de la estabilidad transitoria para lo cual las ecuaciones generales del sistema pueden expresarse como un conjunto de ecuaciones de algebraicas diferenciales con un conjunto de condiciones iniciales conocidas ( $X_0, V_0$ ) como en la Ecuación (22).

$$I(X, V) = Y_N V \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde

$X$ = vector de estado del sistema.

$I$ = vector de inyección de corriente.

$Y_N$ = matriz de admitancia del nodo de la red.

La rigidez de las ecuaciones diferenciales del sistema es considerablemente mayor que la de los modelos de estabilidad transitoria. La Ecuación 9 puede resolverse en el dominio del tiempo empleando cualquiera de las integraciones numéricas.

#### 2.8.4 Análisis estático

El análisis estático captura las condiciones de instantáneas en varios marcos temporales que en función del tiempo son trayectorias largas por lo que en la Ecuación 9 el valor de X es cero y las variables estado toman valores al marco temporal específico.

Dentro de este análisis la estabilidad de tensión se obtiene por medio del cálculo de las curvas VP y QV, para esto se han desarrollado métodos que están relacionados en la sensibilidad de QV. Estos métodos permiten proporcionar información de estabilidad desde una perspectiva global de todo el sistema en donde define áreas de problemas potenciales.

#### 2.8.5 Proximidad a la inestabilidad

La proximidad a la inestabilidad el voltaje cuando se dan pequeñas perturbaciones se puede localizar aumentando la generación de carga en procesos hasta que el sistema se vuelve inestable o el flujo de carga no converge.

#### 2.8.6 Evaluación de la estabilidad de la tensión mediante análisis modal

La Ecuación 10 se considera el incremento del flujo de potencia de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde J1-J4 son subjacobinos recargados por la Ecuación 11.

$$[J_1] = \left( \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right], [U_2] \right) = \left( \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right], [J_3] \right) = \left( \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right], [U_4] \right) = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde el problema de la estabilidad está relacionado con la variación de tensión y la variación en la potencia reactiva se establece que  $\Delta P = 0$  y se obtiene las Ecuaciones 12, 13, 14.

$$[J_1][\Delta\delta] + [J_2][\Delta V] = 0 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$[\Delta\delta] = -J_1^{-1}J_2[\Delta V] \quad \text{Ecuación 26}$$

$$[J_3][\Delta\delta] + [J_4][\Delta V] = \Delta Q \quad \text{Ecuación 27}$$

Colocando el valor  $[\Delta\delta]$  de la ecuación 13 en la ecuación 14 se obtiene la siguiente relación en la Ecuación 15.

$$[J_4 - J_3 - J_1^{-1}J_2] * [\Delta V] = [\Delta Q] \quad \text{Ecuación 28}$$

O la Ecuación 16.

$$[J_R][\Delta V] = [\Delta Q] \quad \text{Ecuación 29}$$

Cuando JR se conoce el jacobiano reducido se define como la Ecuación 17.

$$[J_R] = [J_4] - [J_3][J_1^{-1}][J_2] \quad \text{Ecuación 30}$$

Si se desprecia el acoplamiento Q-d y PV, el jacobiano reducido a es la Ecuación 18

$$[J_R] = [J_4][J_R] = [J_4] \quad \text{Ecuación 31}$$

La solución nodal se escribe en la Ecuación 19.

$$\Delta V = \sum_i \frac{(\eta_i^T \Delta Q) \xi_i}{\lambda_i} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde  $\lambda_i$  y  $\xi_i$  son los valores propios y el valor propio derecho de la jacobiana [JR].  $\eta_i^T$  es el valor propio de la izquierda que corresponde a  $\lambda_i$ . también  $\Delta Q$  representa la inyección de potencia reactiva en las barras de carga.

### **2.8.7 El análisis del poder de continuación del flujo**

matriz jacobiana se transforma a singular en el límite de la estabilidad lo que provoca que los algoritmos normales del flujo de carga presenten problemas de convergencia, por tal forma el análisis de flujo de potencia de continuación mejor a este problema ya que reformula las ecuaciones de manera que permanezcan condicionadas dando paso a una solución del problema ante rangos superiores e inferiores de la curva P-V.

El método de continuación es robusto y flexible, pero a la vez lento y requiere mucho tiempo por lo que es recomendable utilizar el método de flujo de carga convencional y el método de continuación Así iniciando con el método convencional para que el curar las soluciones de flujo de potencia hasta que no se pueda obtener una solución y a partir de eso utilizar el método de continuación para obtener las soluciones de flujo de carga.

### **2.8.8 Estabilidad de la tensión con enlaces hvdc**

Los enlaces HVDC se utilizan en transmisiones extremadamente largas y para interconexiones asíncronas por lo que un enlace HVDC puede ser rectificador inversor. Los enlaces HVDC pueden presentar características de cargas desfavorables para el sistema eléctrico ya que el convertidor consume una potencia reactiva equivalente al 50-60% de la potencia de corriente continua.

## 2.9 Sistema de potencia de prueba para el generador

Para el sistema eléctrico de potencia se asignaron los distintos valores característicos de cada uno de los componentes, generador síncrono, transformador, líneas de transmisión y carga a continuación en las siguientes tablas se muestra cada uno de los valores del sistema eléctrico de potencia que se utilizaran para el estudio.

Los datos para este análisis son referenciados del grupo 1 de la central hidroeléctrica Illuchi 1 de ELECOP S.A. (Correa Masache, 2007)

Tabla 6 Datos del generador síncrono de polos salientes.

Barra de conexión	Xg (ohm)	Xg (H)	Potencial Nominal (KVA)	Voltaje (V)	Corriente(A)	Fp
1	7.3836	0.0195	872	2400	210	0.8

Fuente: (Autor, 2022)

Tabla 7 Datos del transformador.

Barras de conexión		Impedancia	
Barra i	Barra j	R(Ohms)	Xl (H)
1	3	0.001	0.006521

Fuente: (Autor, 2022)

Tabla 8 Datos de las líneas de transmisión.

Barras de conexión		Impedancia		
Barra i	Barra j	R(OHms)	Xl (Ohm/Km)	Xl (Ohm/0.8463Km)
3	2	0.002	0.046218	0.0391
3	2	0.002	0.046218	0.0391

Fuente: (Autor, 2022)

Tabla 9 Datos de la carga.

Barra de conexión	Impedancia		
	R	Xl(Ohms)	Xc (H)
Barra j			
2	1	0.2	0.005

Fuente: (Autor, 2022)

El diagrama de la figura 32 corresponde al ejercicio de simulación en representación a un pequeño SEP que nos permitirá determinar valores de parámetros eléctricos del sistema en estado estable de funcionamiento.

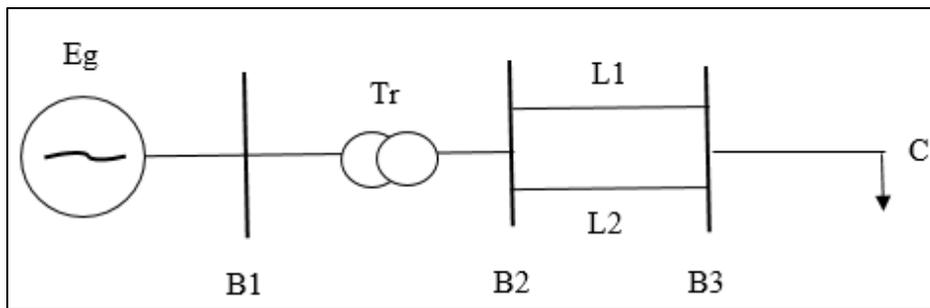


Figura 32. Diagrama unifilar del SEP.

Fuente: (Autor,2022)

### 2.9.1 Bloques de Simulink de la configuración del SEP

Para la simulación del sistema eléctrico de potencia la librería utilizada en simulink está determinada por Simscape, Sinks, Signal routing, a continuación, se describe cada uno de los bloques utilizados en la simulación.

- **Three Phase Source:** Representa al generador síncrono de polos salientes para el pequeño SEP.

- **Three Phase Series RLC Branch:** Identifica tanto como a las líneas de transmisión, al transformador y la carga ya que este elemento presenta una impedancia RLC.
- **Three Phase V-I Measurement:** Representa las barras donde confluyen las mediciones de voltaje y corriente de cada nodo en nuestra simulación.
- **Powergui:** Permite resolver las ecuaciones diferenciales del sistema ya sea en función del tiempo o de manera fasorial.
- **Display:** Muestra los valores numéricos de las señales que han sido introducidas al bloque.
- **Scope:** Muestra las señales generadas durante la simulación que han sido introducidas a la entrada del bloque.
- **From:** Recibe las variables de voltaje y corriente que se encuentran en las barras de transmisión
- **Power positive sequence:** Calcula la potencia trifásica activa y reactiva de secuencia positiva a partir de las variables de voltaje y corriente de entrada.

En la Figura 33, se muestran los bloques mencionados anteriormente que serán utilizados en la simulación.

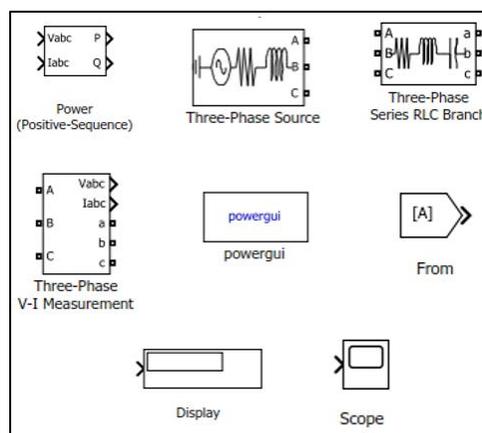


Figura 33. Bloques utilizados en Simulink

Fuente: (Autor,2022)

## 2.9.2 Simulación de funcionamiento del sistema de potencia en estado estable

Iniciamos con el diseño del diagrama de la Figura 34, utilizando cada uno de los bloques de Simulink mencionados anteriormente. Conectamos generador a una barra B1, entre las barras B3y B2 tenemos el transformador a continuación entre las barras B3 y B2 se encuentran las líneas de transmisión L1 y L2, finalmente a la barra 2 se conecta una carga.

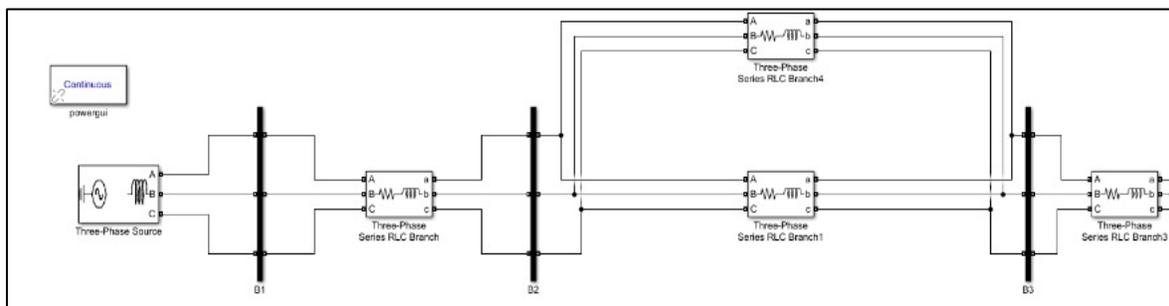


Figura 34: Diagrama unifilar del SEP en Simulink

Fuente: (Autor,2022)

## 2.9.3 Desarrollo de la simulación de funcionamiento del SEP en estado estable

A cada uno de los bloques de la Figura 33, les asignamos los respectivos valores que nos permitan realizar la simulación del pequeño sistema eléctrico de potencia. Para cada uno de los elementos se les asigna valores que están mostrados en las tablas 6,7,8 y 9 respectivamente.

Para el bloque Three Phase Source el cual representa al generador síncrono de polos salientes para el pequeño SEP se le asigna los valores del generador

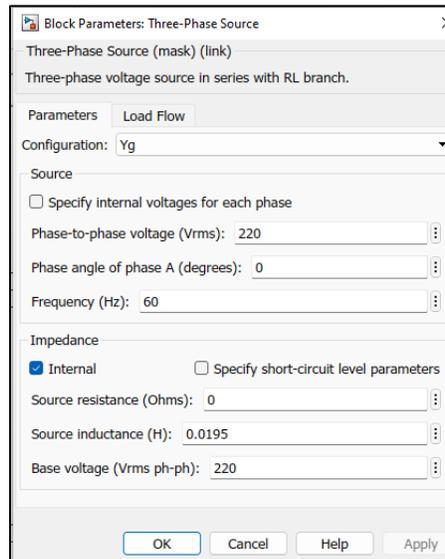


Figura 35. Valores para bloque de generador.

Fuente: (Autor 2022)

Para el transformador con el bloque Three Phase Series RLC Branch identifica este elemento a una impedancia RL asignado los siguientes valores de línea

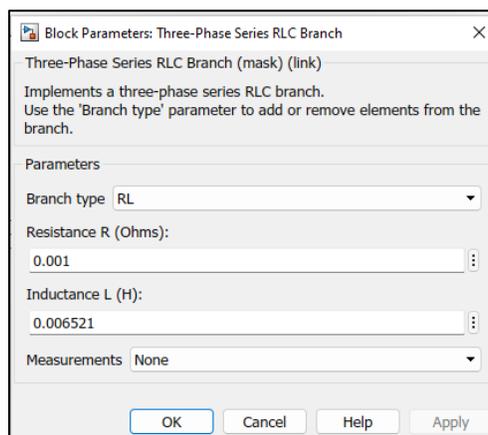


Figura 36. Valores para bloque de transformador.

Fuente: (Autor 2022)

Para las líneas de transmisión L1 Y L2 con el bloque Three Phase Series RLC Branch identifica este elemento a una impedancia RL. y se le asigna los siguientes valores.

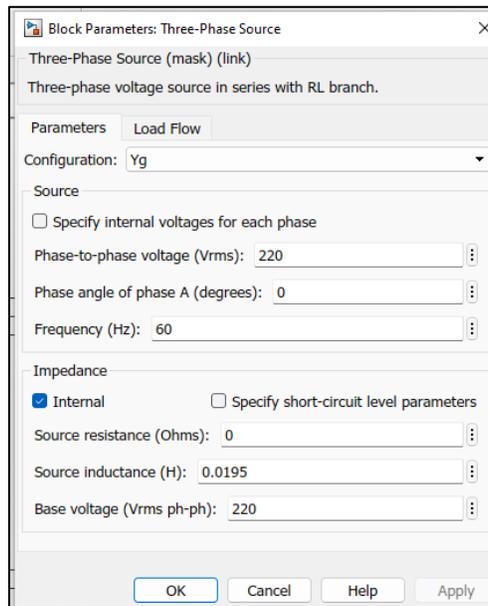


Figura 37. Valores para bloques de líneas L1 y L2.

Fuente: (Autor 2022)

Para la carga del sistema eléctrico de potencia con el bloque Three Phase Series RLC Branch identifica este elemento a una impedancia RLC asignado los siguientes valores de carga

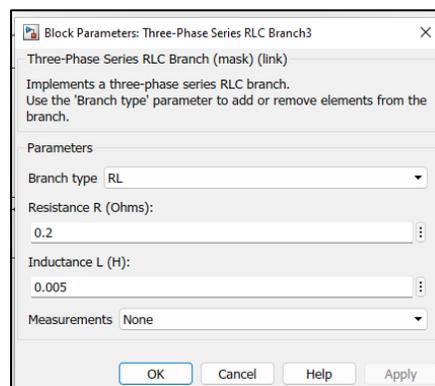


Figura 38. Valores para bloque de carga.

Fuente: (Autor 2022)

Determinamos los parámetros eléctricos del generador en estado estable como lo son la potencia activa  $P$  y la potencia reactiva  $Q$  que se originan en el flujo de potencia con el bloque Power positive sequence el cual calcula la potencia trifásica activa y reactiva de secuencia positiva a partir de las variables de voltaje y corriente de entrada.

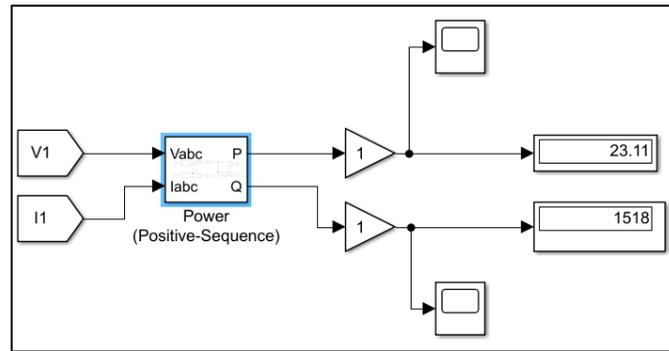


Figura 39. Bloque de cálculo de potencias  $P$  y  $Q$ .

Fuente: (Autor 2022)

#### 2.9.4 Resultados de la simulación de funcionamiento del SEP en estado estable

En grafica de la Figura 40 se muestra las curvas de potencias  $P$  y  $Q$  en función del tiempo para este pequeño sistema eléctrico de potencia en estado estable, como se puede observar en la figura 40, tanto como para la potencia activa y la potencia reactiva los valores inician en 0 a un tiempo cero y luego a un tiempo  $t_1$  se estabilizan los valores de  $P$  y  $Q$  respectivamente siendo este su estado estable para el sistema eléctrico de potencia. En la figura 40 se muestra la grafica de potencia activa en funcion del tiempo llegado estabilizarse a un nivel  $P$  equivalente a un valor de 23.11.

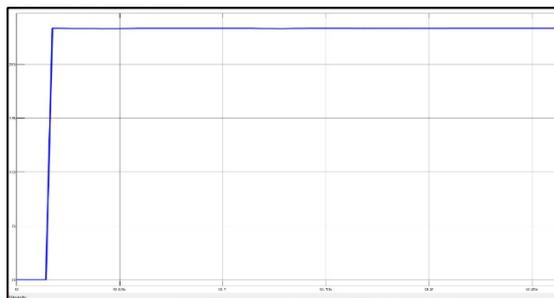


Figura 40. Curva de potencia activa  $P$  en función del tiempo

Fuente: (Autor 2022)

En la Figura 41 se muestra la grafica de potencia reactiva en funcion del tiempo llegado estabilizarse a un nivel Q equivalente a un valor de 1518.

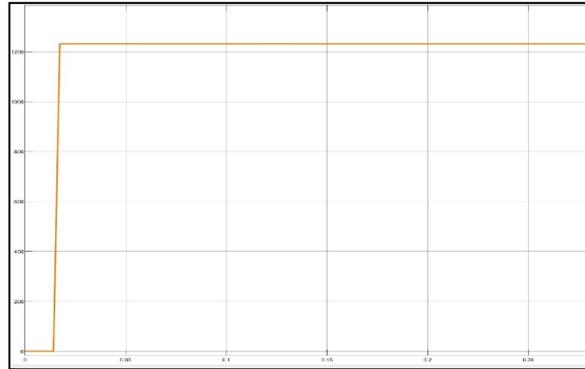


Figura 41. Curva de potencia reactiva  $Q$  en función del tiempo.

**Fuente:** (Autor 2022)

## CAPÍTULO 3

### Análisis de estabilidad de voltaje del generador síncrono durante una perturbación

Para realizar este análisis utilizamos la herramienta computacional de Matlab la cual nos permitirá llegar a encontrar las curvas PV y QV para determinar dicho análisis, se determina un pequeño sistema eléctrico de potencia el cual será sometido a una perturbación o falla y así encontramos los parámetros eléctricos necesarios para llegar a plasmar las gráficas de las curvas anteriormente mencionadas.

#### 3.1 Análisis de estabilidad en el sistema eléctrico de potencia

El diagrama unifilar de la Figura 42, se muestra al generador conectado a través de 2 líneas de transmisión a un sistema que se lo considerara como una barra infinita para este estudio y para realizar este análisis vamos a ocasionar una falla o perturbación en una de las líneas de transmisión entre las barras B3 y B2. Esta falla nos permitirá determinar la estabilidad de voltaje del generador síncrono de polos salientes de la carrera de electricidad.

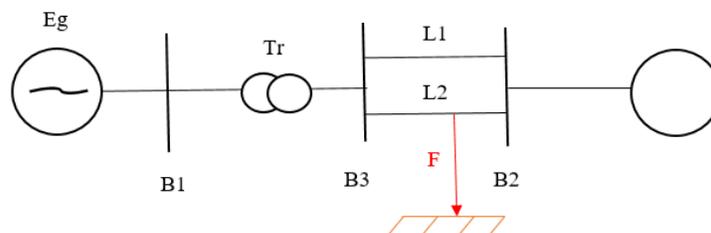


Figura 42. Lugar de falla en el SEP

Fuente: (Autor 2022)

Este generador está entregando una potencia de 1.0 por unidad y el voltaje en los terminales es de 1.0 por unidad como también en la barra infinita, en cuanto a los valores de reactancias teniendo en cuenta los valores reales los transformamos en por unidad Pu para una reactancia X base de  $j0.13042$ , teniendo en cuenta los valores de reactancias en las tablas 6,7,8 están en unidades de inductancia (Henrios) entonces les calculamos a valores de reactancias utilizando la Ecuación (3).

$$H_g = \frac{7.3836}{2\pi \times 60} = 0.0195$$

$$H_t = \frac{2.4583}{2\pi \times 60} = 0.006521$$

$$H_{L1} = \frac{4.9163}{2\pi \times 60} = 0.013041$$

$$H_{L2} = \frac{4.9163}{2\pi \times 60} = 0.013041$$

Cálculo de las reactancias en sistema por unidad del diagrama unifilar de la figura con la utilización de la Ecuación (1).

$$X_g = \frac{0.0195}{0.13042} = 0.15 \text{ Pu}$$

$$X_t = \frac{0.006521}{0.13042} = 0.05 \text{ Pu}$$

$$X_{L1} = \frac{0.0391}{0.13042} = 0.3 \text{ Pu}$$

$$X_{L2} = \frac{0.0391}{0.13042} = 0.3 \text{ Pu}$$

Construimos el diagrama unifilar equivalente del sistema eléctrico de potencia para determinar la reactancia equivalente del SEP entre las barras B1 y B2.

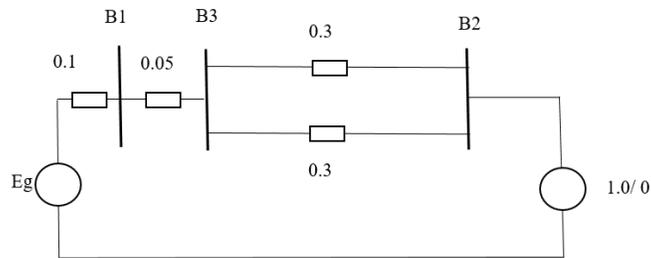


Figura 43. Diagrama unifilar con reactancias en Pu

Fuente: (Autor 2022)

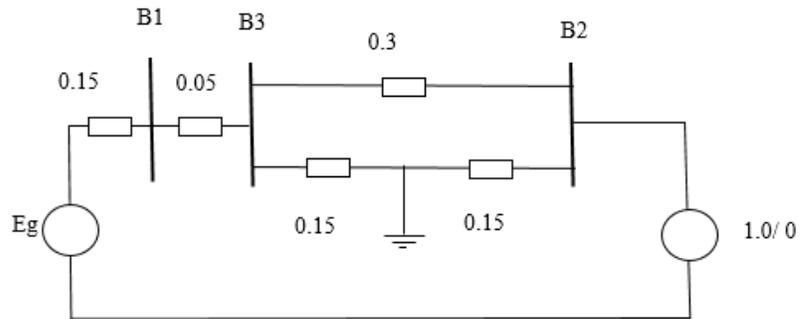


Figura 44. Diagrama unifilar con lugar de falla.

Fuente: (Autor 2022)

En este momento calculamos la reactancia entre los terminales y la barra infinita inicial  $X_{oo}$  que es la resultante de la sumatoria de la reactancia del transformador con la reactancia equivalente entre las barras B1 y B2, siendo el paralelo entre las 2 líneas de transmisión con la Ecuación (20).

$$X_{oo} = 0.05 + \frac{0.3 \times 0.3}{0.3 + 0.3}$$

$$X_{oo} = 0.2$$

Ahora la potencia del generador está determinada por la relación entre la multiplicación del valor absoluto del voltaje en los terminales y el voltaje de la barra infinita entre la reactancia serie entre el voltaje en terminales y la barra infinita con la Ecuación (21).

$$P = \frac{1 \times 1}{0.2} \times \text{sen}\delta$$

$$P = 5$$

Para encontrar la corriente de salida del generador resulta de la relación de la resta del voltaje en los terminales con el voltaje de la barra infinita, entre la reactancia serie entre el voltaje en terminales y la barra infinita con la Ecuación (19).

$$I = \frac{0.9798 + 0.2i - 1}{0.2}$$

$$I = 1 + 0.10102i$$

Para determinar el voltaje interno del generador lo encontramos sumando el voltaje en los terminales del generador con el producto de la reactancia del generador con la corriente de salida del generador con la Ecuación (18).

$$E_a = (0.9798 + 0.2i) + (0.1 \times (1 + 0.10102i))$$

$$E_a = 0.96464 + 0.35i$$

Ahora determinamos la reactancia equivalente del sistema eléctrico de potencia con la Ecuación (20).

$$X_{eq} = 0.15 + 0.5 + \frac{0.3 * 0.3}{0.3 + 0.3}$$

$$X_{eq} = 0 + 0.3i$$

### 3.1.1 Análisis de la curva PV utilizando herramienta computacional Matlab

Determinado el voltaje interno del generador y la reactancia equivalente del sistema procedemos a encontrar las curvas PV y QV respectivamente. Encontramos la potencia activa P utilizando la ecuación (4) para un valor de resistencia R=0.05 para determinar el valor del factor de relación de impedancia k siendo este directamente proporcional al valor de resistencia R e inversamente proporcional al valor de reactancia X.

```

65 % METODO 3
66 - R=0.05; % parte real de una impedancia
67 %X=imag(Xc)+imag(Xln); % reactancia equivalente
68 - X=imag(Xln);
69 - r=R/X; % relacion de impedancia
70 - k=[r]; % Factor de la relacion de impedancia
71 - fp=1; % factor de potencia
72 - for i=1:1
73 -     O=0:0.01:fp; % Iteraciones iniciando en cero hasta el factor d
74 -     o2=acos(O); % factor de potencia inverso de angulo O
75 -     P=((1/2)*sin(2*o2))-(k(i)*(sin(o2)).^2); %formula de Prn
76 -     VMAS=sqrt(((1/2)-(k(i)*P))+sqrt((1/4)-((k(i)+P).*P))); % for
77 -     VMENOS=sqrt(((1/2)-(k(i)*P))-sqrt((1/4)-((k(i)+P).*P))); %
78 -     hold on
79 -     plot(P,VMAS,P,VMENOS)
80 -     axis([0 0.6 0 1])
81 -     hold on
82 -     grid on

```

Figura 45. Código para la curva PV del SEP.

Fuente: (Autor 2022)

En la Figura 45 muestra el código en donde se determina los parámetros necesarios para el cálculo de variables y con la aplicación de la Ecuación (5) nos permite encontrar el voltaje VMAS y VMENOS en función de la potencia activa P asignando el eje X para potencia activa y eje Y para voltaje y así obtener la curva PV de la Figura 46.

las curvas PV son un indicador de la estabilidad de tensión, porque las condiciones específicas dadas de carga y factor de potencia, permiten determinar el límite de potencia antes de que llegue a la inestabilidad de tensión.

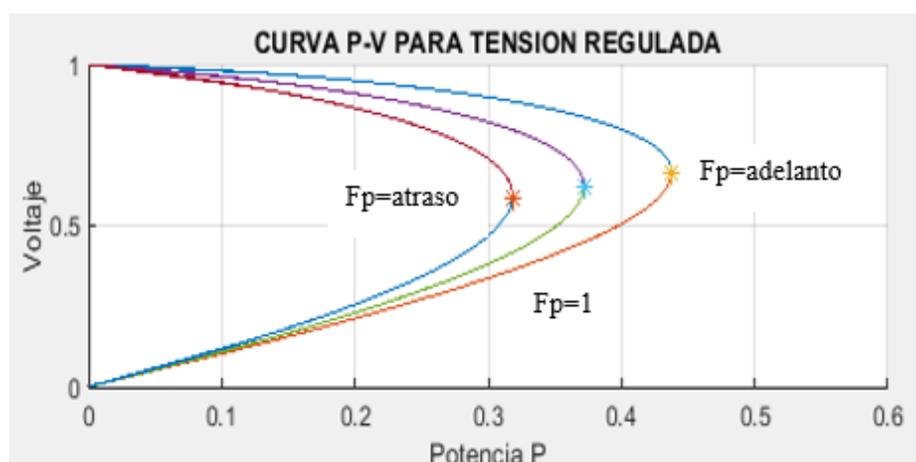


Figura 46. Curva PV

Fuente: (Autor 2022)

Los puntos  $V_{cri} - P_{max}$  para varios fp se dibuja en el lugar de los asteriscos en cualquier intento de aumentar la carga por encima de  $P_{max}$  provoca una inversión del voltaje, la reducción del voltaje hace que la carga consuma una corriente cada vez mayor. La  $P_{max}$  es la potencia máxima transferida a factor de potencia unitario.

Para cada curva se tiene un límite de estabilidad, delimitado por la región de asteriscos. Los puntos que se encuentran por debajo de dicha región de asteriscos son una región de inestabilidad. Por otra parte, la zona ubicada por encima de region de asteriscos es una región de estabilidad.

En la grafica de la Figura 46, se muestra que para el eje de las y el voltaje esta tiene un rango de 0 a 1 en valor de Pu, como tambien en el eje de las x la potencia activa esta en unidades de Pu

Para un factor de potencia de atraso el Pmax se acerca al eje de las Y en este caso la curva que se encunetra en la parte izquierda, la curva que se encuentra en la mitad esta determinada a un factor de potencia unitario , y para un factor de potencia en adelante la Pmax se aleja del eje de las Y en este caso la curva que se ubica a la derecha.

### 3.1.2 Análisis de la curva QV utilizando herramienta computacional Matlab

Para encontrar la gráfica QV aplicamos la Ecuación en donde se espresa la potencia reactiva Q y Q\_1 en función de VMAS y VMENOS, como se muestra en la Figura 47, asignando el eje de las x para los valores de voltaje y el eje de las y para valores de potencia reactiva.

```

83 - subplot(2,1,2)
84 - title('CURVA Q-V PARA TENSION REGULADA')
85 - xlabel('Voltaje')
86 - ylabel('Potencia Q')
87 - Q=sqrt(((E*VMAS)/k).^2)-(P.*(VMAS.^2))-((VMAS.^2)/k);% formula de Q
88 - Q_1=sqrt(((E*VMENOS)/k).^2)-(P.*(VMENOS.^2))-((VMENOS.^2)/k); % form
89 - % Q=-((VMAS.^2)/k)-((1/k)*(sqrt((E.^2)*(VMAS.^2))-((k.^2)*(P.^2))))
90 - % Q_1=-((VMENOS.^2)/k)-((1/k)*(sqrt((E.^2)*(VMENOS.^2))-((k.^2)*(P.^2))))
91 - % Q=(E.*VMAS/k).*(cos(o2))-((VMAS.^2)/k)
92 - % Q_1=(E.*VMENOS/k).*(cos(o2))-((VMENOS.^2)/k)
93 - % Q=((E*cos(o2))-(2*VMAS))/k
94 - % Q_1=((E*cos(o2))-(2*VMENOS))/k
95 - hold on
96 - grid on
97 - plot(VMAS,Q,VMENOS,Q_1)
98 - end
99 - subplot(2,1,1)
100 - plot(max(P),max(VMENOS),'*')
101 - hold on
102 - subplot(2,1,2)
103 - plot(max(VMENOS),max(Q),'*')
104 - hold on

```

Figura 47. Código para curva QV del SEP.

Fuente: (Autor 2022)

En la Figura 48, se muestra la grafica de potencia reactiva Q en funcion de V para nuestro sistema electrico de potencia. Los rangos de valores para la potencia reactiva en el eje de las X tanto como para los valores de voltaje en el eje de las Y se encuentran en valores por unidad Pu, a un voltaje con rango de 0 a 1 Pu.

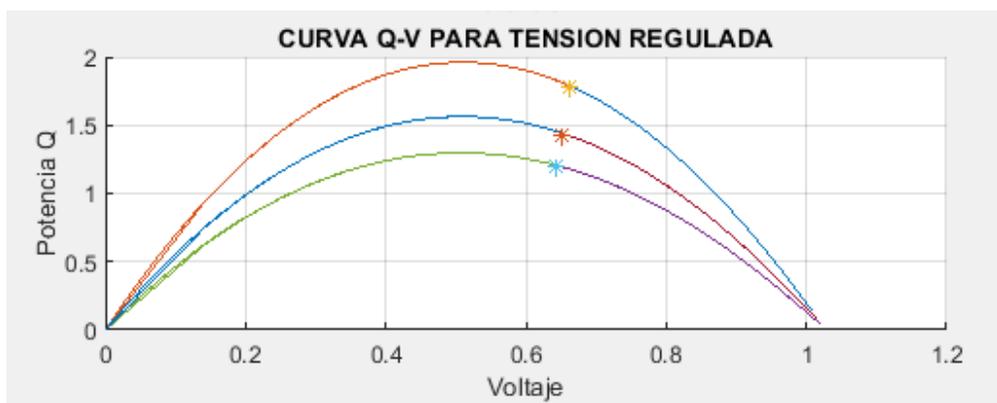


Figura 48. Curva VQ.

Fuente: (Autor 2022)

La curva Q-V muestra la relación entre la inyección de potencia reactiva y la tensión. El lugar de los asteriscos representa el límite de estabilidad. Para construir esta gráfica se debe mantener la potencia activa constante.

La región ubicada a la izquierda del lugar de los asteriscos es una zona de inestabilidad, ya que se evidencia una relación inversa entre Q y V. El lado derecho de la curva, representa un estado de operación satisfactoria, y es así como se determinan estas zonas de estabilidad.

## Conclusiones

- En la investigación que se realizó en este trabajo se concluyó que para el estudio de estabilidad de voltaje de un generador en un sistema eléctrico de potencia influyen características del generador y los métodos de análisis de estabilidad para encontrar los parámetros eléctricos del sistema necesarios que se pueden demostrar con diferentes métodos de análisis de estabilidad.
- Al realizar el análisis de estabilidad de voltaje a un sistema eléctrico de potencia por medio de la utilización de simulink podemos determinar los parámetros eléctricos de potencia activa y potencia reactiva del sistema para el caso de un sistema estable.
- El análisis de estabilidad de voltaje a través de las gráficas de las curvas PV y QV que son las indicadoras de estabilidad de tensión las determinamos a través de la herramienta computacional Matlab logrando localizar las zonas de operación estable e inestable del sistema eléctrico de potencia

## **Recomendaciones**

- La determinación de la cantidad y características de elementos que conforman un sistema eléctrico de potencia van a influir a la hora de realizar estudios de estabilidad, por lo que se debe analizar las distintas herramientas y métodos a utilizar para determinar análisis de estabilidad.
- Los diferentes métodos de análisis de estabilidad de voltaje serán los que nos permitirán llegar a obtener valores puntuales, en este trabajo dentro de simulink se utilizó una fuente ideal que simularía a un generador síncrono, pero se puede realizar este análisis con una fuente en donde se muestre el comportamiento real de un generador.
- El análisis de las curvas de potencia activa PV y potencia reactiva QV es un método de analizar la estabilidad de voltaje, pero se recomienda usar un modelo matemático de flujo de carga modificado dentro de los métodos estáticos ya sea para pequeñas perturbaciones o para estabilidad ante grandes perturbaciones.

## Referencias

- Arcos, L., & Flores, I. (2007). Análisis de estabilidad transitorio del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2709>
- Arias, M., Guillermo, L., Lopez, H., & Javier, A. (2008). Libro interactivo de máquinas síncronas. (*Tesis de tecnología*). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Asociación danesa de la industria eólica. (10 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/genpoles.htm#:~:text=El%20%C3%A9rmino%20%22velocidad%20del%20generador,velocidad%20en%20vac%C3%ADo%20del%20generador.>
- Aulo, L. (16 de Agosto de 2020). *Patentados*. Obtenido de <https://patentados.com/2001/grupo-porta-escobillas-para-un-motor>
- Ayala Sigcha , M. I. (2016). *EL SOFTWARE MATLAB EN LAS SIMULACIONES MATEMÁTICAS DE LAS TENDENCIAS Y COMPORTAMIENTOS DE LAS VARIABLES FINANCIERAS Y ECONÓMICAS EN LOS ESTUDIANTES, DE LA CARRERA DE INGENIERÍA COMERCIAL DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXÍ*. Latacunga.
- Cabrera, E. (30 de Octubre de 2020). Obtenido de <https://alianzaautomotriz.com/la-importancia-de-los-cojinetes-en-el-motor/>
- Calero Freire, I. R. (2008). Protección de generadores eléctricos mediante relés microprocesados multifuncionales. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Calle, F., & Flores, G. (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. *Título de ingeniería*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, Loja.

- Castillo, M., Garzón, V., & Michael, S. (2016). Tipología de fallas en generadores síncronos hidráulicos de la empresa de energía del pacífico. (*Tesis de ingeniería*). Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Chimarro, A. (2019). INTERFAZ GRÁFICA PARA EL MONITOREO DE LA OPERACIÓN EN ESTADO ESTABLE DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE LA CENTRAL COCA CODO SINCLAIR. *Título de ingeniería*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito.
- Cisneros, O., & Yugsi, E. (2013). Implementación y montaje de un motor - generador AC-AC trifásico de 5 kw en el laboratorio de maquinas electricas de la universidad técnica de cotopaxi, con la elaboración de un manual de operacion, para realizar practicas demostrativas. *Título de ingeniería*. Universidad Técnica De Cotopaxi, Latacunga.
- Correa Masache, D. H. (2007). *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL GRUPO 1 DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI 1 DE ELECOP S.A. QUITO*.
- Cortés, J., & Orjuela, L. (2020). *Estimación de los parámetros del generador síncrono del módulo*. Tesis, Universidad de la Salle, Bogota. Recuperado el 12 de Agosto de 2021
- Cumbre Pueblos. (16 de Julio de 2019). Obtenido de <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/solar/tension-nominal/>
- Eléctrica. (12 de Julio de 2021). Obtenido de <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/que-es-la-frecuencia>
- 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.
- Factorled. (7 de Enero de 2020). Obtenido de <https://www.factorled.com/blog/es/factor-de-potencia-que-es-y-como-funciona/>
- Gallardo, C. (2009). Estabilidad y Amortiguamiento de oscilaciones en Sistemas Eléctricos con alta Penetración Eólica. (*Tesis doctoral*). Universidad Carlos III Madrid, Leganés/Getafe. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/29400628.pdf>

- García, Á. (11 de Agosto de 2021). *Asifunciona*. Obtenido de [http://www.asifunciona.com/respuestas/respuesta\\_2/respuestas\\_2.htm](http://www.asifunciona.com/respuestas/respuesta_2/respuestas_2.htm)
- Isla, E. (2019). análisis y aplicación del triangulo de potier en las máquinas síncronas. *titulo de ingeniería*. Universidad nacional del centro del Peru, Peru.
- Lagunas Sánchez, M. (2013). Puesta en servicio del modelo DL30190 para generadores síncronos trifásicos. (*Tesis de ingeniería*). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Lagunas, M. d. (2013). Puesta en servicio del modelo DL30190 para generadores síncronos trifasicos. *Titulo de ingeniería*. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Mexico,D.F.
- Martínez Ferrán, D. (2017). Cortocircuitos en el generador síncrono trifásico. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Mayorga, G. (2015). Estudio de factibilidad de la producción energética en el ecuador y sus proyecciones con la matriz productiva. (*tesis de ingeniería*). Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/10688>
- 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.
- Mondragón, V., Pineda, W., & Trejo, C. (2015). Generación de energía eléctrica por imanes de neodimio. (*tesis de Ingeniería*). Institupopolitécnico nacional unidad profesional Adolfo López Mateos, Mexico,D.F. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/14915>
- Moreno, R., & Herrera, N. (2015). Análisis de estabilidad de voltaje de sistemas eléctricos de potencia usando curvas Q-V. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Carabobo, Naguanagua. Obtenido de <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4951/torrealban.pdf?sequence=1>

- Muñoz, M. (2018). *StuDocu*. Obtenido de <https://www.studocu.com/co/document/universidad-tecnologica-de-pereira/maquinas-electricas-rotativas/devanados-amortiguadores/5282158>
- 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.
- Orta, A. (Marzo de 2015). Obtenido de <http://asbrubalorta.blogspot.com/>
- Pahuanquiza Guamantica, J. A. (2015). Dispositivos electrónicos utilizados en generadores eléctricos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Quito.
- Paredes, L. (2014). Análisis económico, técnico y ambiental de la implementación del generador eléctrico de la universidad técnica de Cotopaxi extensión la maná. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/3419>
- Patiño, F., & Limas, G. (2018). *Metodologías para el análisis de estabilidad de Tensión en estado estacionario*. Tesis, Universidad Tecnológica de pereira. Recuperado el 12 de Agosto de 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/71396041.pdf>
- Pozueta, M. (2018). *CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. Obtenido de <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/constitucion%20maq%20elec%20caminos.pdf>
- Ramirez, H., & Sánchez, R. (2012). Diseño y construcción de un tablero de transferencia y sincronización de generadores de emergencia con PLC y pantalla táctil. (*Tesis de Ingeniería*). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3058>
- Rodríguez Pozueta, M. Á. (2018). *Máquinas Eléctricas II*. España: Universidad de Cantabria.
- Rodriguez, L. (2021). Obtenido de <https://como-funciona.co/un-rotor/#:~:text=Eje%3A%20Es%20la%20estructura%20que,as%C3%AD%20como%20el%20proceso%20inverso.>

- Sanafria, M. (2019). Estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia usando modelos de carga estático-dinámicos. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17457>
- Sánchez, A. (Febrero de 2016). *Maquinas Eléctricas*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/201602maquinaselectricas/home>
- Snell Group. (14 de Abril de 2017). Obtenido de [https://www.thesnellgroup.com/blog/lo-que-se-necesita-conocer-acerca-del-factor-de-servicio#:~:text=El%20factor%20de%20servicio%20de,de%20servicio%20\(ver%2014.37\)](https://www.thesnellgroup.com/blog/lo-que-se-necesita-conocer-acerca-del-factor-de-servicio#:~:text=El%20factor%20de%20servicio%20de,de%20servicio%20(ver%2014.37)).
- Thotty, M. (22 de Julio de 2016). Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos72/generadores-electricos/generadores-electricos2.shtml>
- 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.
- Vivanco Loaiza, C. A. (2013). *ANALISIS DE SISTEMAS DE CONTROL DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN USANDO LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN MATLAB-SIMULINK*. Guayaquil.

## Anexos

### Anexo A: Generador Síncrono de polos salientes de la carrera de electricidad



### Anexo B: Código de programación

```
% UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
% CARRERA DE INGENIERIA EN MATENIMIENTO ELÉCTRICO  
% REVELO CELIMO  
% ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE
```

```
clc; clear all;  
format short g  
xg=0.15i; %reactancia del generador  
xt=0.05i; %reactancia del transformador  
xl1=0.3i; %reactancia de la lidea 3-2 (1)  
xl2=0.3i; %reactancia de la linea 3-2 (2)  
Xc=0.4i; %reactancia de la carga  
V1=1; % voltaje en los terminales  
Voo=1; % voltaje de la barra infinita
```

```
X13=xg+xt;
```

```

X32_1=x11;
X32_2=x12/2;

xoo=xt+(x11*x12/(x11+x12)); % reactancia serie entre el voltaje en
terminales y la barra infinita
Pperm1=(V1*Voo)/imag(xoo); % Potencia del generador Pu
V1r=(V1*cos(acsc(Pperm1))+V1*sin(acsc(Pperm1))*i); %Voltaje en los
terminales coordenadas rectangualres
Voor=(Voo*cos(0))+(Voo*sin(0)*i); % voltaje en la barra infinita
coordenadas rectangulares
I=(V1r-Voor)/xoo; % corriente de salida del generador
Ea=V1r+I*X32_2; % voltaje interno transitorio

```

```

subplot(2,1,1)
title('CURVA P-V PARA TENSION REGULADA')
xlabel('Potencia P')
ylabel('Voltaje')

```

```

Es=Ea;
E=abs(Es);
Xln=X13+((x11*x12)/(x11+x12));
hold on

```

```
%METODO 1
```

```

% fp=0:0.01:1;
% % fp=acos(0);
% % fp=0.9
% P=Vr*abs(I)*cos(fp)
% % P=0:0.01:1.5;
% % Q=0:0.01:1.5;
% Q=(Vr*abs(I)*sin(fp));
% a=((2*Q*X)+(E^2))/2;
% b=(2*Q*X)-(E^2);
% c=(4*(X^2))*((P.^2)+(Q.^2));
% d=sqrt((b.^2)-c);
% V_1=abs(sqrt(-(a)+((1/2)*d)))
% V_2=abs(sqrt(-(a)-((1/2)*d)))
% hold on
% plot(P,V_1)

```

```
%METODO 2
```

```

% fp=0:0.01:1;
% % fp=acos(0)
% P=(Vr*abs(I)*cos(fp));
% Q=(Vr*abs(I)*sin(fp));
% a=(E^2)-(2*Q*X);
% b=(E^4);
% c=-(4*(E^2)*X*Q)-(4*(X^2)*(P.^2));
% d=sqrt(b+c);
% V_1=abs(-sqrt((a+d)/2))
% V_2=abs(-sqrt((a-d)/2))
% hold on
% plot(P,V_1)

```

```

% METODO 3
R=0.05; % parte real de una impedancia
%X=imag(Xc)+imag(Xln); % reactancia equivalente
X=imag(Xln);
r=R/X; % relacion de impedancia
k=[r]; % Factor de la relacion de impedancia
fp=1; % factor de potencia
for i=1:1
    O=0:0.01:fp; % Iteraciones iniciando en cero hasta el factor de
potencia
    o2=acos(O); % factor de potencia inverso de angulo O
    P=((1/2)*sin(2*o2))-(k(i)*(sin(o2)).^2); %formula de Prn
    VMAS=sqrt(((1/2)-(k(i)*P))+sqrt((1/4)-((k(i)+P).*P))); % formula de
Vn resultado positivo
    VMENOS=sqrt(((1/2)-(k(i)*P))-sqrt((1/4)-((k(i)+P).*P))); %
formula de Vn resultado negativo
    hold on
    plot(P,VMAS,P,VMENOS)
    axis([0 0.6 0 1])
    hold on
    grid on
    subplot(2,1,2)
    title('CURVA Q-V PARA TENSION REGULADA')
    xlabel('Voltaje')
    ylabel('Potencia Q')
    Q=sqrt(((E*VMAS)/k).^2)-(P.*(VMAS.^2))-((VMAS.^2)/k); % formula de Q
resultado positivo
    Q_1=sqrt(((E*VMENOS)/k).^2)-(P.*(VMENOS.^2))-((VMENOS.^2)/k); %
formula de Q resultado positivo
% Q=-((VMAS.^2)/k)-((1/k)*(sqrt((E.^2)*(VMAS.^2))-((k.^2)*(P.^2))))
% Q_1=-((VMENOS.^2)/k)-((1/k)*(sqrt((E.^2)*(VMENOS.^2))-((k.^2)*(P.^2))))
% Q=(E.*VMAS/k).*(cos(o2))-((VMAS.^2)/k)
% Q_1=(E.*VMENOS/k).*(cos(o2))-((VMENOS.^2)/k)
% Q=(E*cos(o2))-(2*VMAS)/k
% Q_1=(E*cos(o2))-(2*VMENOS)/k
    hold on
    grid on
    plot(VMAS,Q,VMENOS,Q_1)
end
subplot(2,1,1)
plot(max(P),max(VMENOS),'*')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(max(VMENOS),max(Q),'*')
hold on

```