



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA  
UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA  
ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**

**Joel Elías Peña Chávez**

Asesorado por el Ing. Jorge Luis Pérez Rivera

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOEL ELÍAS PEÑA CHÁVEZ**

ASESORADO POR EL ING. JORGE LUIS PÉREZ RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armado Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Angeles
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de enero de 2020.

**Joel Elías Peña Chávez**

Guatemala, 26 de noviembre de 2020

Ingeniero  
Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Moscoso:

Por medio de la presente le informa que he asesorado el trabajo de tesis titulado: **"VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN TIC'S"**, desarrollado por el estudiante, Joel Elías Peña Chávez, previo a optar al título de Ingeniero Electricista.

Con base en la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo que el estudiante y asesor, nos hacemos responsables del contenido del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle

Atentamente,



Ing. Jorge Luis Pérez Rivera  
Colegiado No. 3057  
Asesor

Jorge Luis Pérez Rivera  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 3057

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 25 de marzo de 2021

Ingeniero  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela de Ingeniero Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería USAC

Ingeniero Rivera:

Por este medio, con base a lo indicado en el REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADUACION vigente, tengo a bien proponer la aprobación del trabajo de graduación titulado:

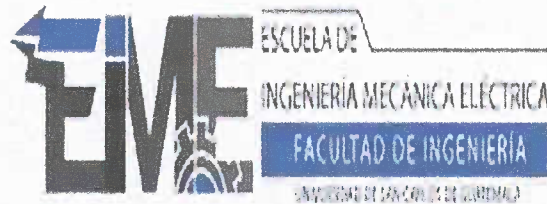
**VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN TIC'S**

del estudiante Joel Elías Peña Chávez, habiendo cumplido con los requisitos establecido en el referido reglamento y conforme la aprobación del asesor.

Sin otro particular

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira  
Coordinador Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.



REF. EIME 173. 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; JOEL ELÍAS PEÑA CHÁVEZ titulado: VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN TIC'S, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 25 DE NOVIEMBRE 2,021.





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

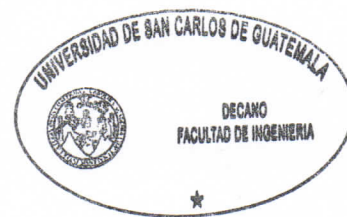
Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101 - 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 003-2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **VIRTUALIZACIÓN DEL TEMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEL CONTENIDO DE LA UNIDAD TRES DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1, DE LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Joel Elías Peña Chávez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, enero de 2022.

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>La vida</b>	Por darme tanto cada día.
<b>Mi madre</b>	Petrona Chávez Ramírez, por su sacrificio, ejemplo y apoyo en cada etapa de mi vida. Este logro es más tuyo que mío. ¡Te amo!
<b>Mi padre</b>	Víctor Manuel Peña Mansilla, razón por la cual decidí estudiar esta carrera. Si bien ya no pudo compartir conmigo este momento, seguro lo pudo ver mucho antes.
<b>Mi hermano</b>	Josué Peña, por sus consejos en cada situación.
<b>Yolanda Alarcón</b>	Por sus cuidados y ser una segunda madre.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme el privilegio de poder estudiar una carrera universitaria y ser mi casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por cada catedrático y auxiliar que compartieron sus conocimientos y por enseñarme que siempre se puede dar más.
<b>Ing. Jorge Luis Pérez</b>	Por el apoyo y el valioso tiempo brindado para que pudiera culminar la carrera.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por hacer ameno este camino que recorrimos juntos cada semestre.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. MÉTODO CONSTRUCTIVISTA PARA EL APRENDIZAJE Y EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN .....	1
1.1. Modelo constructivista para el aprendizaje.....	1
1.1.1. Objetivos del uso de la teoría del constructivismo para el aprendizaje .....	2
1.1.2. Papel que desempeña el estudiante bajo la teoría del constructivismo .....	3
1.2. Aprendizaje B-Learning – aprendizaje semipresencial.....	4
1.2.1. Papel que desempeña el profesor bajo la teoría B-Learning .....	4
1.2.2. Características del aprendizaje B-Learning .....	5
1.3. Tecnologías de la información y comunicación .....	7
1.3.1. Herramientas informáticas para el aprendizaje.....	9
1.3.1.1. Plataformas virtuales .....	9
1.3.1.2. Software de simulación.....	11
1.3.1.3. Medios audio visuales .....	13
2. CONCEPTOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....	15
2.1. Definición de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia ..	15

2.2.	El problema de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia.....	16
2.3.	Clasificación de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia.....	17
2.4.	Técnicas de análisis.....	19
2.4.1.	Simulación digital .....	19
2.4.1.1.	Integración numérica.....	19
2.4.1.2.	Métodos directos .....	20
2.4.1.3.	Métodos probabilísticos.....	20
2.4.2.	Métodos Heurísticos.....	21
2.4.2.1.	Sistema experto .....	21
2.4.3.	Métodos de entrenamiento.....	21
2.4.3.1.	Reconocimiento de patrones.....	22
2.4.3.2.	Redes neuronales .....	22
2.5.	Propagación de una perturbación en redes .....	23
2.6.	Propagación de una perturbación electromecánica en un sistema eléctrico de potencia.....	25
2.7.	Estabilidad transitoria.....	27
2.7.1.	Ecuación de oscilación de la máquina síncrona.....	28
2.7.2.	Ecuación potencia-ángulo .....	35
2.7.3.	Criterio de áreas iguales.....	40
2.7.4.	Ángulo crítico de despeje de falla.....	46
2.7.5.	Factores que afectan la estabilidad transitoria .....	51
2.7.6.	Solución por partes de la curva de oscilación .....	53
2.7.7.	Métodos de integración numérica .....	57
2.7.7.1.	Método de Euler.....	58
2.7.7.2.	Método de Runge-Kutta de cuarto orden .....	59

2.7.8.	Métodos y mecanismos para mejorar la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia.....	60
3.	EJERCICIOS DE APLICACIÓN .....	63
3.1.	Ejercicios aplicando la ecuación de oscilación .....	63
3.1.1.	Problema 1 .....	63
3.2.	Ejercicios aplicando la ecuación potencia-ángulo .....	64
3.2.1.	Problema 1 .....	65
3.2.2.	Problema 2 .....	67
3.3.	Ejercicios aplicando el criterio de áreas iguales .....	70
3.3.1.	Problema 1 .....	70
3.3.2.	Problema 2 .....	72
3.4.	Ejercicios aplicando la solución por partes de la curva de oscilación.....	81
3.4.1.	Problema 1 .....	81
4.	SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MEDIANTE POWERWORLD .....	87
4.1.	PowerWorld Simulator.....	87
4.1.1.	Descarga e instalación .....	88
4.1.2.	Manual de usuario .....	88
4.1.3.	Interfaz gráfica.....	89
4.2.	Consideraciones técnicas en los estudios de estabilidad transitoria.....	89
4.3.	Diseño del ejercicio de aplicación.....	91
4.3.1.	Simulación despeje de falla, posterior al tiempo crítico .....	96
4.3.2.	Simulación despeje de falla, aislando la línea afectada.....	100

4.3.3.	Simulación despeje de falla, eliminando el corto circuito .....	103
5.	EVALUACIÓN CONCEPTUAL Y DE APLICACIÓN .....	107
5.1.	Estabilidad transitoria .....	107
5.1.1.	Evaluación conceptual .....	107
5.2.	Ecuación de oscilación.....	108
5.2.1.	Evaluación de aplicación .....	108
5.3.	Ecuación potencia-ángulo .....	109
5.3.1.	Evaluación de aplicación .....	109
5.4.	Criterio de áreas iguales .....	110
5.4.1.	Evaluación de aplicación .....	110
5.5.	Práctica en PowerWorld Simulator.....	111
5.5.1.	Evaluación de aplicación .....	111
	CONCLUSIONES.....	115
	RECOMENDACIONES .....	117
	BIBLIOGRAFÍA.....	119
	APÉNDICES.....	123

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Clasificación de estabilidad en SEP .....	18
2.	Péndulos acoplados en cadena .....	24
3.	Comportamiento dinámico del ángulo del rotor.....	27
4.	Rotor de una máquina, indicando dirección de rotación y ángulo mecánico.....	30
5.	Representación de la máquina síncrona para estudios de estabilidad transitoria .....	36
6.	Diagrama fasorial de la máquina síncrona .....	36
7.	Curva potencia-ángulo .....	39
8.	Diagrama unifilar de un SEP, adicionando una línea de transmisión corta .....	40
9.	Curvas potencia ángulo para un generador .....	41
10.	Curva potencia ángulo, mostrando el ángulo crítico de libramiento $\delta_{cr}$ .....	48
11.	Curva potencia ángulo, caso específico .....	50
12.	Diferentes tipos de fallas para un SEP.....	52
13.	Valores reales y supuestos de $P_a$ , $\omega_r$ , y $\delta$ en función de t .....	56
14.	SEP problema 1, ecuación potencia-ángulo .....	65
15.	Diagrama de reactancias problema 1, ecuación potencia-ángulo.....	65
16.	Curva potencia-ángulo problema 1, ecuación potencia-ángulo.....	67
17.	Diagrama de reactancias problema 2, ecuación potencia-ángulo.....	68
18.	Curva potencia-ángulo problema 2, ecuación potencia-ángulo.....	69
19.	Curva potencia-ángulo para el problema 1, criterio de áreas iguales ..	71



20.	Diagrama de reactancias problema 2, criterio de áreas iguales .....	73
21.	Curva potencia-ángulo problema 2, criterio de áreas iguales .....	74
22.	Diagrama de reactancias durante la falla problema 2, criterio de áreas iguales .....	75
23.	Diagrama de reactancias después de la falla problema 2a, criterio de áreas iguales .....	76
24.	Curva potencia-ángulo después de la falla problema 2a, criterio de áreas iguales .....	77
25.	Curva potencia-ángulo después de la falla problema 2b, criterio de áreas iguales .....	79
26.	Interfaz gráfica PowerWorld Simulator.....	89
27.	Diagrama de bloques del modelo de excitación IEEE T1 .....	90
28.	Herramientas de creación y edición.....	92
29.	Sistema eléctrico de potencia de 4 barras .....	94
30.	Selección de eventos.....	95
31.	Ventana Transient Stability Analysis.....	96
32.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 1 .....	97
33.	Datos de los eventos ingresados en la ventana <i>Transient Stability Analysis</i> – Caso 1 .....	98
34.	Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 1 .....	99
35.	Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 1 .....	99
36.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 2.....	100
37.	Datos de los eventos ingresados en la ventana <i>Transient Stability Analysis</i> – Caso 2 .....	101
38.	Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 2 .....	102
39.	Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 2 .....	102
40.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 3.....	103

41.	Datos de los eventos ingresados en la ventana <i>Transient Stability Analysis</i> – Caso 3.....	104
42.	Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 3.....	105
43.	Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 3.....	105
44.	Diagrama de reactancias .....	110
45.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 1 .....	113
46.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 2 .....	113
47.	Diagrama de tiempos de operación – Caso 3 .....	113

## TABLAS

I.	Cálculo de la curva de oscilación .....	84
II.	Datos de las barras .....	92
III.	Datos del generador.....	93
IV.	Valores de reactancias.....	93
V.	Datos del generador.....	112
VI.	Datos de las barras .....	112
VII.	Valores de reactancias.....	112



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Amperio
<b>HP</b>	Caballo de fuerza
$\Delta$	Cambio en variable
<b>M</b>	Constante de inercia
<b>I</b>	Corriente
<b>d/dt</b>	Derivada con respecto del tiempo
$\alpha$	Desfase angular
$\theta$	Desplazamiento angular
$\delta$	Desplazamiento angular del rotor
<b>F.P.</b>	Factor de potencia
<b>f</b>	Frecuencia
<b>Hz</b>	Hertz
<b>MJ</b>	MegaJoule
<b>MVA</b>	MegaVolt-Amper
<b>MW</b>	MegaWatt
<b>J</b>	Momento de inercia
<b>r</b>	Multiplicador en potencia activa
<b>Nm</b>	Newton-metro
<b>T</b>	Par o torque
<b>P</b>	Potencia activa
<b>S</b>	Potencia aparente
<b>Q</b>	Potencia reactiva
<b>rad</b>	Radianes

<b>X</b>	Reactancia equivalente
<b>s</b>	Segundo
<b>t</b>	Tiempo
<b>pu</b>	Valores por unidad
<b><math>\omega</math></b>	Velocidad angular
<b>E'</b>	Voltaje interno del generador
<b>V</b>	Volt

## GLOSARIO

<b>Aceleración angular</b>	Cambio que experimenta la velocidad angular por unidad de tiempo.
<b><i>B-Learning</i></b>	Eficiencia de la educación presencial con la flexibilidad de la educación virtual.
<b>Barra infinita</b>	Idealización de un sistema de potencia, el cual es tan grande que en él no varían ni el voltaje ni la frecuencia.
<b>Disyuntores</b>	Dispositivo capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando ocurren fallas de aislación en un equipo o instalación eléctrica.
<b>Energía</b>	Capacidad de realizar un trabajo.
<b>Factor de potencia</b>	Eficiencia y relación entre la potencia activa y aparente.
<b>Generador</b>	Máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica.
<b>Integración</b>	Concepto fundamental del cálculo y del análisis matemático, básicamente es una generalización de la suma de infinitos sumandos.

<b>Línea de transmisión</b>	Medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica.
<b>Máquina síncrona</b>	Máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de rotación del eje y la frecuencia eléctrica están sincronizadas y son mutuamente dependientes.
<b>Perturbación</b>	En el sentido eléctrico, son fallos en los centros de transformación y maniobras, fallos en las líneas o por condiciones atmosféricas.
<b>Potencia</b>	Consumo de energía para un determinado tiempo.
<b>Potencia activa</b>	Potencia en la cual se realiza un trabajo real: creando calor, operando una carga, entre otros.
<b>Potencia aparente</b>	Combinación matemática entre la potencia activa y potencia reactiva.
<b>Potencia reactiva</b>	Potencia en la cual no se realiza un trabajo real: la corriente que se carga en un capacitor o la que crea un campo magnético alrededor de una bobina.
<b>Reactancia</b>	Oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores y condensadores.
<b>Rotor</b>	Componente que gira con respecto a su estator en una máquina eléctrica, ya sea un motor o un generador.



<b>SEP</b>	Sistema eléctrico de potencia.
<b>Software</b>	En informática, es el nombre que se le da a los programas.
<b>TIC</b>	Tecnologías de la información y comunicación
<b>Valores por unidad</b>	Relación entre una cantidad y su cantidad base expresada como un decimal.
<b>Velocidad angular</b>	Medida de velocidad de rotación, definida como el ángulo girado por una unidad de tiempo.



## RESUMEN

El presente trabajo de estudio pretende desarrollar de manera digitalizada los conceptos correspondientes a la estabilidad transitoria; los cuales, forman parte del curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1, de modo que el catedrático con la labor de dar el curso, pueda tomarlo como una herramienta de apoyo y facilitar el aprendizaje de los estudiantes.

Esta digitalización de los conceptos ayudara a que los estudiantes en cualquier momento puedan estudiar o bien reforzar los temas, para así comprenderlos de una mejor manera; por otro lado, será un apoyo para el catedrático y que este, pueda enfocar más tiempo a resolver posibles dudas que vayan surgiendo durante el desarrollo del curso.

En los videos desarrollados se definen, desarrollan y se aplican los conceptos de estabilidad transitoria en los sistemas eléctricos de potencia, esto para ser consultados en cualquier momento que se requiera y así facilitar su comprensión.

Finalizando este proceso de aprendizaje con sesiones de clases magistrales servidas por el catedrático, reforzando con los videos de los temas ya mencionados, combinando ejercicios de aplicación y evaluaciones tanto conceptuales como aplicativas y así, determinar si el conocimiento de estos temas se da por consolidado o bien, es necesario reforzar ciertos puntos.



# OBJETIVOS

## General

Virtualizar de manera estructurada los temas relacionados a la estabilidad transitoria correspondiente al curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1, bajo el método constructivista del aprendizaje y el uso de TIC, para que el estudiante pueda tener acceso a estos temas de manera remota.

## Específicos

1. Desarrollar los conceptos relacionados al tema de estabilidad transitoria para los sistemas eléctricos de potencia, realizando videos explicativos de los temas.
2. Realizar ejercicios relacionados a los conceptos expuestos y explicarlos por medios audiovisuales.
3. Proponer evaluaciones conceptuales y de aplicación correspondiente a los conceptos a desarrollar.
4. Desarrollar mediante un software especializado, una serie de prácticas de laboratorio.



## INTRODUCCIÓN

Aplicar el método constructivista, nace de la necesidad de tener en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica un mejor sistema de enseñanza y desarrollo académico, utilizando las herramientas con las que se cuenta actualmente. De tal forma, que el aprendizaje del estudiante se construya a la vez que se aproveche de mejor manera el tiempo en clase, de modo que el catedrático pueda distinguir las posibles debilidades, al resolver dudas durante la mayor parte de este tiempo.

Al existir una retroalimentación de parte de los estudiantes hacia el catedrático con las posibles dudas que puedan surgir durante el proceso, se logra una mejor construcción y adquisición del conocimiento, en lugar de memorizar una exposición como sucede en la mayoría de clases.

Este trabajo de estudio pretende aplicar estos métodos de enseñanza y aprendizaje para los temas de estabilidad transitoria correspondientes al curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1 y así lograr esta eficiencia de aprendizaje. Siendo esto un complemento del curso que, combinado con las clases presenciales y resolución de dudas por parte del catedrático, se finalizara con evaluaciones de aplicación para culminar la formación de los futuros profesionales.





# 1. MÉTODO CONSTRUCTIVISTA PARA EL APRENDIZAJE Y EL USO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

## 1.1. Modelo constructivista para el aprendizaje

Básicamente, el constructivismo se basa en la idea de ver el aprendizaje como un proceso en el cual el alumno se forma y construye conceptos e ideas nuevas a través de experiencias presentes o pasadas, es decir, viviendo las mismas a lo largo de su formación y de ahí el nombre de este concepto, ya que es una construcción del conocimiento.

Las raíces del constructivismo básicamente están en la filosofía, psicología, sociología y educación. Construir proviene del latín *streure*, lo cual significa “arreglar” o “dar estructura”<sup>1</sup>. La idea central de este concepto es que el aprendizaje del ser humano se construye, esto a través de las experiencias que este ha pasado y la manera en que el mismo asimila dicho conocimiento. Este concepto es muy distinto al modelo clásico de aprendizaje en el cual, la metodología es básicamente expositiva, es decir, solo el catedrático expone sus ideas y los alumnos solamente escucha, a diferencia del constructivismo en el cual todos participan y exponen su punto de vista.

El alumno al participar, su aprendizaje se vuelve activo en lugar de escuchar y observar de manera pasiva. En esto difieren el modelo clásico y el constructivismo, en que el primero, si bien es útil para la memorización, no lo es

---

<sup>1</sup> HERNÁNDEZ, Stefany. *El modelo constructivista con las nuevas tecnologías: aplicado en el proceso de aprendizaje*. p. 27.

para un aprendizaje a largo plazo ya que el alumno no experimenta con la información adquirida recientemente. A diferencia del constructivismo en que el alumno comparte, opina, o bien le encuentra un sentido a su manera a lo que se le acaba de enseñar, es decir, construye su propio conocimiento a través de la experiencia.

Visto desde este punto, en que el conocimiento se adquiere o se construye a través de la experiencia, esta se construye por medio de esquemas<sup>2</sup>. Básicamente los esquemas son modelos mentales que se almacenan en la mente del alumno y estos pueden cambiar dependiendo de dos factores: la asimilación y el alojamiento.

### **1.1.1. Objetivos del uso de la teoría del constructivismo para el aprendizaje**

El uso de la metodología del constructivismo para el aprendizaje tiene como objetivos principalmente:

- Que el estudiante pueda trabajar para aclarar y ordenar sus ideas, esto con el fin de poder dar a conocer sus conclusiones hacia los demás.
- Elaborar lo aprendido, es decir, experimentarlo, asimilarlo, vivirlo y compartirlo. Al punto de ser capaz de poder explicarlo de tal manera que los demás entiendan y hagan lo mismo con dicho conocimiento.
- Resaltar acciones auténticas de manera significativa a lo aprendido, en lugar verlo como unas simples instrucciones. Desde otro punto de vista, ver dicho aprendizaje como entornos en la vida diaria y de manera útil, en lugar de una secuencia de ordenes o instrucciones.

---

<sup>2</sup> ROMERO, Fabiola. *Aprendizaje significativo y constructivismo*. p. 2.

- Proveer a las personas de un contacto con múltiples representaciones de la realidad, es decir el conocimiento adquirido se puede interpretar de varias maneras, si cada alumno expone su punto de vista y la manera en que lo asimiló.
- Apoyar la construcción colaborativa del aprendizaje, por medio de una negociación social, en lugar de una competencia entre estudiantes para obtener una nota o calificación alta.

### **1.1.2. Papel que desempeña el estudiante bajo la teoría del constructivismo**

El papel que desempeña el estudiante en esta teoría de aprendizaje es un papel constructor, como se menciona anteriormente por medio de esquemas. Esto debido a que el alumno se hace responsable de su propio proceso de aprendizaje y el procesador activo de la información, construye el conocimiento por sí mismo y nadie puede sustituirle en esta tarea, ya que debe relacionar la información nueva con los conocimientos previos, para establecer relaciones entre elementos en base a la construcción del conocimiento y es así cuando da verdaderamente un significado a las informaciones que recibe. Esto le obliga a cumplir unas series de normas:

- Este participa en las actividades propuestas, dado que el mismo da a conocer y defiende su punto de vista.
- Construir y formar a sus propias ideas, así como la de los demás con respecto al tema.
- Aceptar diferentes puntos de vista esto para comprender y clarificar.
- Proponer soluciones con respecto al tema a discutir.
- Escuchar las diferentes propuestas tanto de sus compañeros como las del catedrático.

- Cumplir con las distintas actividades propuestas y respetando los plazos estipulados, con el fin de ir entrando su disciplina al mismo tiempo.

## **1.2. Aprendizaje B-Learning – aprendizaje semipresencial**

Blended Learning o Aprendizaje combinado o mixto, básicamente es un método de enseñanza que integra tecnología y medios digitales con actividades tradicionales en el aula dirigidas por un instructor, con el fin de brindar a los estudiantes mayor flexibilidad y apertura de distintas opciones para experiencias dinámicas de aprendizaje<sup>3</sup>.

La tecnología bajo este método no solamente es un complemento, sino también es utilizado para transformar y mejorar el proceso de aprendizaje. No debe confundirse con un curso completamente en línea o un curso de conferencias que se transmite por Internet, tampoco pretende sustituir algún curso que simplemente intercambian herramientas analógicas por digitales. En el B-Learning, las personas y las herramientas involucradas trabajan juntos para crear una experiencia de aprendizaje más amena y enriquecedora.

### **1.2.1. Papel que desempeña el profesor bajo la teoría B-Learning**

En esta modalidad de enseñanza el docente debe revisar el conjunto de roles y funciones a desempeñar, los cuales incluyen el análisis y diagnóstico de las necesidades formativas de los alumnos, el diseño e instrumentación de estrategias de enseñanza-aprendizaje, hasta la evaluación de los aprendizajes adquiridos por sus alumnos.

---

<sup>3</sup> GONZÁLEZ, María. *El b-learning como modalidad educativa para construir conocimiento*. p. 502.

Todo lo anterior implica explorar nuevas formas y medios para la autoformación; no solo de los contenidos que imparte, sino también sobre las competencias necesarias para diseñar propuestas idóneas que combinen estrategias y actividades de enseñanza-aprendizaje presenciales y virtuales.

En cuanto a los roles a ejercer bajo esta modalidad, el docente debe básicamente:

- Ser un facilitador de aprendizajes hacia sus alumnos, guía y acompañante.
- Identificar y poner a disposición de sus alumnos bloques de información valiosos y relevantes.
- Inculcar el trabajo cooperativo y colaborativo con el fin de aprovechar la inteligencia colectiva.
- Interactuar e involucrarse con los estudiantes de forma permanente y programada, a fin de aclarar dudas, dar las instrucciones y orientarlos.
- Evaluar y analizar las mejores estrategias y herramientas TIC para lograr los objetivos de aprendizaje.

### **1.2.2. Características del aprendizaje B-Learning**

Este método de enseñanza se caracteriza principalmente porque se pueden utilizar tutorías personalizadas, videoconferencias, chats, clases presenciales, etc. No obstante, algunos profesionales ven este método como un retraso en la educación y, por otro lado, otros lo ven como un avance que permite utilizar lo mejor de la educación presencial y la educación en online. Las principales características de este método de formación son las siguientes:

- Formación flexible y a su vez personal. El alumno tiene mayor libertad en cuanto a la hora y la forma que estudia, por lo tanto, un curso se hace más

flexible, y a la vez es personal ya que también se incluyen clases presenciales en las que el docente puede tratar a sus alumnos de una forma más cercana.

- Asistencia a clases presenciales, permitiendo así que el docente interactúe con el alumno de manera personal.
- Debatir acerca de casos prácticos en grupo. La interacción entre los alumnos en las clases presenciales permite que tenga la oportunidad de debatir acerca de la opinión que cada uno tiene acerca de los temas que se tratan.
- Conferencias de expertos. Las clases en línea y videoconferencias pueden ser dadas además de los profesores, por expertos y especialistas en los temas sin importar el lugar en el que estos residan.
- Tutorías personales. Mediante este método de formación se puede atender de manera personalizada a los alumnos y apoyar a los que lo requieran mediante tutorías que pueden ser online.
- Exámenes de certificación. Los alumnos se pueden certificar mediante evaluaciones del trabajo desarrollado en línea y a la vez de las clases presenciales que se tomaron.
- Gran cantidad de diversidad en cuanto a técnicas y metodologías de enseñanza. La combinación de este aprendizaje permite diversificar las metodologías que se usan en la enseñanza tradicional, dando como resultado una multiplicidad de técnicas que enriquecen y facilitan el aprendizaje: hay actividades presenciales como clases cara a cara, laboratorios, estudios de campo, también se dan actividades online, chats, encuentros virtuales y recepción de eventos en vivo.
- Orientado a la comunidad. El aprendizaje combinado permite que el alumno desarrolle habilidades para trabajar en equipo, ya que al usar las herramientas digitales los estudiantes tendrán mayor posibilidad de interactuar con los otros estudiantes del curso.

- Resolución de problemas desde diferentes puntos de vista. Al facilitarse el aprendizaje compartido es posible que un problema sea visto desde diferentes enfoques y no solamente desde uno, como ocurre normalmente en los cursos tradicionales, lo que acerca más a las situaciones reales en campo y el alumno se da cuenta como se resuelven los problemas en la práctica diaria de la profesión.
- Optimizar eficientemente el tiempo presencial. El B-Learning reduce el tiempo que el profesor tiene que interactuar en persona con los alumnos, debido a que muchos de los conceptos que antes tenía que exponerlos en el aula, ahora se encuentran en línea.

### **1.3. Tecnologías de la información y comunicación**

Al mencionar las TIC, se refiere a un grupo diverso de prácticas, conocimientos y herramientas, vinculados con el consumo y la transmisión de la información y desarrollados a partir del cambio tecnológico exponencial que ha experimentado la humanidad en las últimas décadas, sobre todo a raíz de la aparición del internet<sup>4</sup>.

No existe un concepto claro de las TIC, sin embargo, este término se emplea de modo semejante al de la sociedad de la información, es decir, se usan para indicar el cambio de paradigma en la manera en que se consumía la información hoy en día, comparado a épocas pasadas.

Con ello se quiere decir que las nuevas TIC han revolucionado la manera de vivir, permitiendo la invención de nuevos bienes y servicios, de nuevos

---

<sup>4</sup> RODRÍGUEZ, Jesús; MARTÍNEZ, Nerwis; LOZADA, Joan Manuel. *Las TIC como recursos para un aprendizaje constructivista*. p. 125.



métodos de comercialización, así como medios alternativos para el manejo de la información.

A diferencia de épocas anteriores, las TIC permiten hoy en día la comunicación instantánea sin importar las enormes distancias geográficas, superando fronteras y fomentando así el proceso conocido como la globalización.

Entre las virtudes que tienen las TIC están: su mayor velocidad, capacidad y distribución en que la información le permite a usuarios de distintas partes del planeta se puedan conectar usando computadores y dispositivos electrónicos, para comunicarse así de múltiples maneras y realizar diversas transferencias como: comprar y vender objetos e información, compartir datos personales, conversar en tiempo real, inclusive jugar videojuegos de manera online aún sin hablar el mismo idioma. Esto ha revolucionado la vida cotidiana.

La información que antes estaba en las bibliotecas, bases de datos, hoy se encuentra dispersa en las varias fuentes de la red y puede circular más libre para todos los usuarios, aunque en ocasiones de manera mucho menos organizada, hoy en día basta con un smartphone con cámara y conexión a Internet para compartir información con alguien del otro lado del mundo.

Sin embargo, no todo es positivo con las TIC. Entre otras cosas, han fomentado una dispersión de la información, fuera de sistemas de catalogación y legitimación del conocimiento, lo cual se traduce en mayor grado de desorden del contenido como ocurre con internet, e incluso acceso prematuro al mismo, fomentando la ignorancia y la irresponsabilidad en el gran público, incapaz de discernir si las fuentes son confiables o no.

Asimismo, estas nuevas tecnologías han impulsado una gran exposición de la vida íntima y personal, además de una casi necesidad de la conexión permanente a las distintas comunidades virtuales que se han establecido, dando pie a conductas adictivas o poco saludables, y a nuevas formas de riesgo, como lo es el autismo cultural, lo cual se describe como el aislamiento social y la hiperestimulación infantil, así como los enormes riesgos a la privacidad, son algunos de los inconvenientes que más preocupan con respecto de las TIC actualmente.

### **1.3.1. Herramientas informáticas para el aprendizaje**

Las nuevas TIC permiten establecer un ambiente de autoaprendizaje, debido a los múltiples mecanismos de comunicación y de difusión de la información que crean formas originales de interacción entre los mismos estudiantes y tutores. Entre las herramientas que facilitan a crear dicho entorno se encuentran las siguientes:

#### **1.3.1.1. Plataformas virtuales**

Actualmente en los modelos didácticos, toma gran notoriedad el aprendizaje colaborativo, en donde se deja de centralizar la labor del docente frente a los estudiantes, convirtiendo al estudiante como la figura central en el aula de clase, facilitando así la construcción del conocimiento, la interacción y la evaluación. La cooperación e interacción son elementos importantes de enorme ayuda, y esos elementos son características importantes de las plataformas virtuales.

Las aulas virtuales son una nueva modalidad formativa que se aplica en la educación presencial y no presencial, que a pesar de la distancia se facilita la

comunicación entre docentes y estudiantes, incorporando así herramientas y recursos en la formación para enriquecer el aprendizaje.

El gran potencial de las aulas virtuales debe enfocarse en las máximas capacidades intelectuales y de interrelación que los docentes y alumnos deben de tener, así como la mediación que la tecnología puede ofrecer. La educación virtual hace una invitación a innovar y al estar atento a los cambios que la tecnología pueda demandar para ofrecer nuevas alternativas para promover la interacción y que los estudiantes sean los principales protagonistas de su formación y que desarrollen el autoaprendizaje, así mismo que sean autocríticos y poder ofrecer más al desarrollo cognitivo para realizar un aporte a la sociedad del conocimiento.

Las tecnologías de la información y la comunicación han permitido el crecimiento de la educación en línea, una de las características más importante es la flexibilidad para la interacción entre profesores y estudiantes. La facilidad y versatilidad de la educación en línea presenta cambios en la educación convencional en el proceso de enseñanza, ya que es considerada innovadora en las instituciones educativas.

El dinamismo de la educación virtual dependerá del diseño de la metodología que realice el docente responsable de la cátedra, en base a los contenidos que se desea enseñar. El solo hecho de tener un aula virtual no significa que todo funcione bien como medio de aprendizaje, ya que serían utilizadas como una simple agenda con recordatorios y recursos poco importantes, por lo tanto, se requiere de una planificación sistemática de acuerdo con los lineamientos educativos de la institución.

Las aulas virtuales forman estudiantes con competencia en el área cultural y social, aplicando siempre conocimientos y procedimientos. Las competencias creativas son en realidad necesarias actualmente, es útil en la resolución de problemas, toma de decisiones, desarrollando hipótesis y adaptación al entorno.

Las plataformas virtuales se han convertido en una herramienta de mucho potencial en la educación, con capacidad de desarrollar la independencia del aprendizaje en muchos casos y el acercamiento virtual entre docentes<sup>5</sup>. La tecnología educativa como modelo pedagógico se enfoca en la corriente psicológica del conductismo y la cual considera al aprendizaje básicamente en estímulos y respuestas, dando como resultado la enseñanza programada.

Las plataformas virtuales en la educación a distancia muestran que la enseñanza programada satisface tanto a los catedráticos como a los alumnos. Los estudiantes obtienen fuera de clases un aprendizaje autodidacta, en donde también se auto instruyen, aprenden al ritmo deseado, desarrolla memoria reproductiva y también de pensamiento crítico y creativo según el estímulo que se reciba en las instrucciones de las actividades y estrategias del catedrático.

### **1.3.1.2. Software de simulación**

Para casos similares al de estudio, en el cual es necesario habilitar la ejecución de tareas fuera del horario de estudio, y donde se precisa generar un entorno virtual capaz de reproducir un contexto real, la mejor herramienta docente a emplear es la utilización de simuladores. El simulador es capaz de reproducir el comportamiento de un determinado proceso o sistema físico de manera virtual.

---

<sup>5</sup> BUZÓN, Olga. *La tecnología educativa como modelo pedagógico se enfoca en la corriente psicológica del conductismo y la cual considera al aprendizaje básicamente en estímulos y respuestas, dando como resultado la enseñanza programada.* p. 78.

En este proceso se sustituyen las situaciones reales por otras, creadas artificialmente en las cuales se aprenden ciertas acciones, habilidades, hábitos, etc. Posteriormente se pueden transferir a una situación de la vida real y cotidiana con igual efectividad. Ésta es una actividad en la que la información teórica se lleva a la práctica. Los simuladores constituyen un procedimiento, tanto para la formación de conceptos y construcción en general de conocimientos, como para la aplicación de éstos a nuevos ámbitos a los que, por diversas razones, el estudiante le es difícil acceder desde el contexto metodológico donde se desarrolla su aprendizaje.

Las ventajas de usar simuladores en la educación son:

- Favorece el aprendizaje basado en la experimentación y el ensayo-error.
- Permite ejercitar el aprendizaje basándose en la puesta en práctica del conocimiento.
- Suministra un ambiente de aprendizaje abierto basado en modelos reales.
- Brinda un alto nivel de interactividad.
- Es seleccionado para proporcionar el aprendizaje de un contenido determinado.
- Facilita la comprensión de las variables que intervienen en un proceso, su influencia y como este repercute en un proceso determinado, permitiendo así el poder controlarlo y cómo actuar en diversas circunstancias.
- Motivar al usuario y que este pueda crear entornos que incentiven la excitación mental y la curiosidad.
- El usuario es un ser activo, convirtiéndose en el constructor de su aprendizaje a partir de su propia experiencia.

### **1.3.1.3. Medios audio visuales**

La educación a través de medios audiovisuales posibilita una mayor apertura para el alumno y para la institución educativa hacia el mundo exterior, permitiendo traspasar las fronteras geográficas. El uso de los materiales audiovisuales puede acercar a los alumnos a experiencias más allá de su propio ámbito escolar y difundir la educación a otras regiones y países, es accesible a más personas. El interés de la política educativa por incorporar el uso de tecnología en las escuelas y vincularla al proceso de formación de los alumnos y capacitación docente no es una estrategia reciente, existen experiencias en distintos ámbitos educativos anteriormente.

Estos medios forman parte de los recursos didácticos denominados multisensoriales, procuran acercar la enseñanza con la experiencia directa, utilizando como vías la percepción a los sentidos del oído y la vista; de esta manera, el medio audiovisual recrea imágenes y sonidos. Por tal motivo, los medios audiovisuales se convierten en herramientas de gran valor en la educación tanto presencial como a distancia y como auxiliares didácticos en la práctica del catedrático.

Es importante citar que la sola posesión de los medios audiovisuales o de los recursos informáticos, no moderniza los procesos ni garantiza los resultados. Es necesario articular la incorporación de la tecnología con el pensum de estudio, mediante el proceso de enseñanza-aprendizaje, darle un nuevo significado al papel del alumno y del docente, garantizar la capacitación, entre otros aspectos. Para el presente trabajo de estudio se enlisto en la sección anexos, todos los videos realizados, relacionados con el tema de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia.



## 2. CONCEPTOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

### 2.1. Definición de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia

En general, el término estabilidad de un sistema eléctrico de potencia es la condición de equilibrio entre las fuerzas de oposición<sup>6</sup>. Esto se refiere a mantener la sincronización de los generadores involucrados en dicho sistema ante una perturbación; es decir, que las velocidades angulares de estos generadores sean iguales y que la diferencia relativa entre los ángulos de los rotores permanezca constante al presentarse la falla.

Si una perturbación llegase a producir algún desbalance sostenido entre estas fuerzas de oposición, se presenta la condición llamada inestabilidad, la cual se puede llegar a manifestar como la pérdida del sincronismo u oscilaciones de magnitud creciente en los generadores que conforman dicho sistema. El tiempo en que esta nueva condición toma lugar, se le conoce como periodo transitorio y al comportamiento del sistema durante este periodo transitorio se lo llama comportamiento dinámico del sistema. Por ende, el criterio de estabilidad es el hecho de que las máquinas síncronas, sean capaces de mantener el sincronismo al final del periodo transitorio.

Al presentarse algún tipo de perturbación, la estabilidad del sistema eléctrico de potencia prácticamente se vuelve una función de la magnitud de dicho disturbio, el diseño de la red de transmisión y de la condición inicial de

---

<sup>6</sup> AGUILAR Q., Cristian Antonio; HERNÁNDEZ M., José M. *Análisis y simulación de estabilidad transitoria en sistemas multimáquina*. p. 30.



operación del sistema. Las perturbaciones a las que el sistema eléctrico de potencia se encuentra expuesto, pueden clasificarse de acuerdo a la magnitud de los mismos, como *perturbaciones de magnitud pequeña*, los cuales son las variaciones normales en la carga del sistema y la pérdida de generadores de pequeña capacidad y, por otro lado, están los *perturbaciones severas o de gran magnitud*, a los que se consideran como la pérdida de generadores importantes y la ocurrencia de algún corto circuito en el sistema de transmisión. En la realidad es imposible evitar las fluctuaciones, ya que estas se dan constantemente en todo momento en un sistema eléctrico en magnitudes pequeñas. No obstante, se asume que el sistema se encuentra originalmente en condiciones de operación estable al evaluar su estabilidad, al ser sometido a una determinada perturbación.

## **2.2. El problema de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia**

La pérdida de la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es la mayor causa u origen de los apagones eléctricos, blackout, que se registran a nivel mundial, razón por la cual se realizan los análisis de estabilidad. Este problema se vincula directamente al comportamiento de las maquinas síncronas después de haberse producido una falla en el sistema eléctrico de potencia. Dada la ocurrencia de dicha falla, esta provoca una variación en el flujo de potencia, por lo que las maquinas síncronas deben regresar a su estado original, de no ser así se requiere alcanzar un nuevo estado de operación. Las causas que provocan estos desequilibrios son varias, ya sea por una pérdida de carga, generación, o algún tipo de variación en las condiciones de la red como la apertura de una línea de transmisión. Ya sea, que se conserve el estado original de operación o no, las máquinas síncronas deben de mantenerse en estado de sincronismo con el sistema. Esto quiere decir, en paralelo y con la misma velocidad de dicho sistema eléctrico de potencia, con el fin de que el mismo sea estable.

El estado transitorio tras una falla en el sistema es oscilatorio por naturaleza, si el sistema eléctrico de potencia a analizar se estabiliza tras la falla, dichas oscilaciones se amortiguan. Las cuales se manifiestan como fluctuaciones en el flujo de potencia en las líneas de transmisión.

Se debe de definir las condiciones operativas del sistema, el lugar y tipo de falla con las cuales fue analizada la estabilidad, esto para poder considerar si el sistema eléctrico de potencia es estable, de no ser así una afirmación de tal magnitud es muy imprecisa, ya que, una misma línea de transmisión es capaz de tolerar oscilaciones de potencia, dependiendo del tipo de falla sufrida y de las condiciones iniciales de operación. No es factible tanto practica como económicamente diseñar un sistema eléctrico de potencia por cada posible falla que este sistema sufra, por tal razón se selecciona en base a una probabilidad de ocurrencia de falla.

Puede haber otro tipo de problemas, por ejemplo, que el sistema eléctrico de potencia posea capacitancias apreciables, por lo que es necesario tomar acciones para evitar sobre voltajes en condiciones de baja demanda de la energía eléctrica, esto para prevenir que las máquinas no se auto exciten y evitar daños a equipos. No obstante, es más común que una perturbación ocurra debido a una falla, o bien por la desconexión del circuito de una de las varias líneas en paralelo, o por la combinación de una falla y su posterior aislamiento por desconexión de parte del sistema eléctrico de potencia.

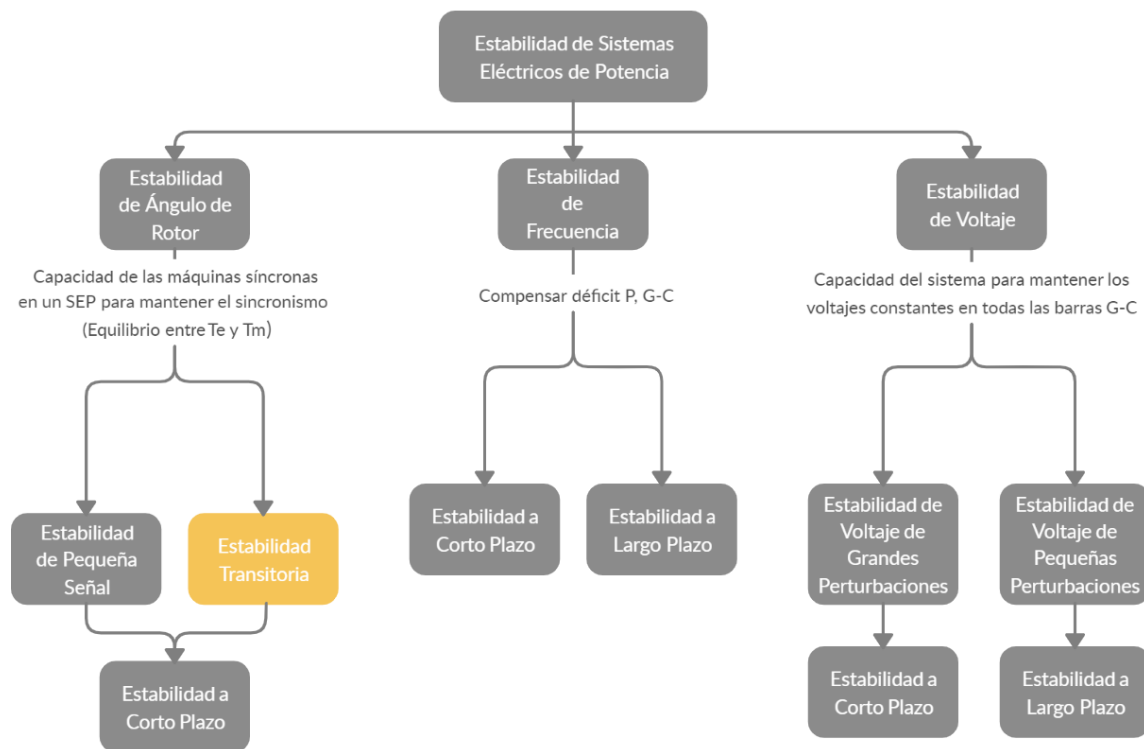
### **2.3. Clasificación de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia**

Es de suma importancia recalcar que, si bien la estabilidad se manifiesta como fluctuaciones de magnitudes eléctricas, la solución a este problema se da de distintas maneras. Analizar en base al tipo de estabilidad permite poder aplicar

métodos más adecuados de cálculo, predicción y una adecuada técnica analítica. Al clasificarlas por diferentes categorías facilita de gran manera el análisis de los problemas de estabilidad, identificar factores esenciales que contribuyen a la inestabilidad y la formación de métodos con el fin de mejorar la operación estable.

En la figura 1 se presenta una clasificación de la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia. En donde, para fines de este documento se le dará más énfasis a la estabilidad transitoria.

Figura 1. **Clasificación de estabilidad en SEP**



Fuente: elaboración propia, a partir de varias fuentes y como base CUZCO SILVA, Javier Rolando. *Análisis de Estabilidad Transitoria de las Centrales Hidroeléctricas de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS*, p. 34.

## **2.4. Técnicas de análisis**

El cómo responde el sistema eléctrico de potencia a las perturbaciones mencionadas anteriormente conlleva grandes variaciones en el ángulo del rotor y este se define por la relación no lineal entre la potencia y el mismo ángulo. Para el análisis de la estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de potencia se puede clasificar en tres bases, que a su vez estas se subdividen en seis métodos<sup>7</sup>, los cuales son:

### **2.4.1. Simulación digital**

A continuación, se presentan los siguientes métodos de simulación digital:

#### **2.4.1.1. Integración numérica**

Este método brinda soluciones exactas vinculadas a la estabilidad transitoria por medio de la resolución de ecuaciones diferenciales, las cuales modelan el comportamiento dinámico del sistema eléctrico de potencia.

Para la solución de estas ecuaciones se utiliza el método de Euler, el método de Euler modificado y los métodos de Runge-Kutta. Debe de tomarse las siguientes consideraciones para poder aplicarlos:

- Cada falla se analiza de forma individual.
- Los límites de estabilidad, tiempos críticos de despeje de falla, se obtienen en intentos independientes.

---

<sup>7</sup> MACHUCA M., Alejandra, *Análisis de estabilidad transitoria basado en teoría de redes complejas y el fenómeno de percolación*. p. 7.

- Idealmente se deben simular pequeños intervalos de tiempo para así mantener la precisión del método por medio de programas computacionales.

#### **2.4.1.2. Métodos directos**

Conocidos como funciones de Lyapunov, buscan sustituir a los métodos de integración numérica de las ecuaciones posteriores a la falla del sistema por un criterio de estabilidad. Es decir, determinando una región de atracción hacia un punto de equilibrio para poder evaluar si dicho punto de equilibrio se adapta a las condiciones de operación nominales del sistema. Sin embargo, la deducción de una función de Lyapunov puede variar para analizar cada caso en particular, además de que, si el punto de operación se encuentre fuera de la región definida como estable, no se puede afirmar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

#### **2.4.1.3. Métodos probabilísticos**

Como es de esperar este método no es determinista sino más bien estocástico, es decir que el comportamiento lo definirán ciertas acciones predecibles como también aleatorias. Los factores que originarán la perturbación o falla, como el tipo y lugar de dicha falla, a esto sumado las condiciones del sistema como la carga y tipología de la red, todos estos son de naturaleza estocástica. Por lo que la probabilidad de ocurrencia de cada uno de estos factores mencionados, los cuales pueden iniciar una perturbación es muy diferente. Es decir, cada estado puede ocurrir, sin embargo, no todos sucederán con la misma probabilidad y no con el mismo impacto. No obstante, el objetivo bajo este método es el de construir una distribución de probabilidad para la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

## **2.4.2. Métodos Heurísticos**

A continuación, se presentan los siguientes métodos aproximados o heurísticos:

### **2.4.2.1. Sistema experto**

Bajo el siguiente método, el conocimiento sobre el sistema se construye en un programa basada en reglas de estructura lógica básica como lo es: “Si - Entonces”. Dichas reglas combinadas con algoritmos numéricos forman lo que viene siendo un sistema experto. Este método básicamente es la combinación del método directo con el enfoque del dominio del tiempo.

Este método recolecta en su base de datos simulaciones estacionarias como, lo es el flujo de carga, y dinámicos como el análisis de estabilidad, donde las salidas se seleccionan y clasifican con el objetivo de determinar el estado de la red a la cual se está estudiando, esto para ser usadas en la construcción de un árbol de decisiones y dicho sistema experto.

El sistema experto, tanto como los análisis probabilísticos, se debe realizar para una gran variedad de condiciones del sistema eléctrico de potencia, tales como: topología de la red, condiciones de carga, así como para el tipo, localización y duración de las fallas. Dichas condiciones, dependiendo del tamaño del sistema eléctrico de potencia, pueden llegar a ser bastante extensas.

## **2.4.3. Métodos de entrenamiento**

A continuación, se presentan los siguientes métodos de entrenamiento:

### **2.4.3.1. Reconocimiento de patrones**

Bajo este método se tiene como objetivo minimizar la utilización de programas de cómputo y preservar la precisión de métodos de integración numérica. Este método consiste básicamente en crear un conjunto de estados operativos seguros o bien inseguros, los cuales representen la operación del sistema eléctrico de potencia, con el objetivo de construir un vector en los que sus estados sean variables de dicho sistema y poder calcular un vector patrón para cada estado. De esta forma que se obtendrá un conjunto de puntos en un espacio de  $n$  dimensiones, llamada espacio de representación, en donde  $n$  es la dimensión del vector patrón, con el fin de poder desarrollar una función de decisión en la que se podrá definir la trayectoria entre un estado seguro e inseguro de dicho espacio de representación para cualquier tipo de contingencia que se dé.

Lo confiable y el éxito de este método, dependerá de la elección del vector patrón, por lo que este método requerirá de una considerable comprensión de como el sistema eléctrico de potencia se comporta. Generalmente, la dimensión del vector patrón es grande e idealmente debe de reducirse para poder así mejorar el tiempo de procesamiento. La reducción se puede hacer proyectando el espacio de representación en un subespacio en el que se conserva la información en el que se puede permitir diferenciar de un estado seguro a uno inseguro.

### **2.4.3.2. Redes neuronales**

Este es un modelo computacional muy similar a la inteligencia artificial, el cual se define como un arreglo de elementos y nodos que se interconectan entre sí. Este método se basa en utilizar toda la información disponible y la capacidad

que esta red pueda aprender relaciones no lineales para resolver los problemas de estabilidad. La arquitectura de estas redes en lugar de ser programadas, son entrenadas en base al historial de sucesos, en el sentido convencional.

El método más utilizado para resolver problemas de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia es el Perceptrón multicapa, compuesto por una capa de entrada, una capa de salida y  $n$  capas ocultas entremedias, en donde estas capas ocultas son los diferentes sucesos por los que el sistema ha atravesado. Este método puede resolver problemas que no son linealmente separables. El concepto básico es poder entrenar el algoritmo de tal manera en que se minimice el error entre la salida deseada y la salida aproximada. Sin embargo, su aplicación en sistemas eléctricos de potencia se restringe a un modelo de generador de segundo orden y fallas trifásicas.

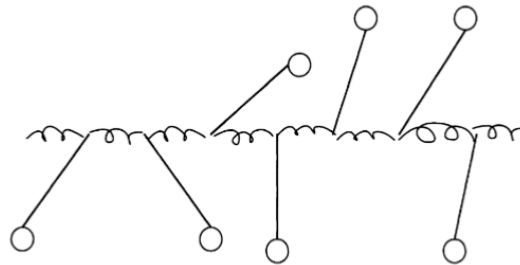
## **2.5. Propagación de una perturbación en redes**

Analizar la propagación de una perturbación en las redes involucra una cantidad significativa de temas como: terremotos, fenómenos financieros, densidades poblacionales, entre otros. Uno de los modelos que representa muy bien este fenómeno, es el arreglo de péndulos en cadena tal como se muestra en la figura 2. Estos péndulos están conectados entre sí uno después de otro por medio de resortes y la manera en que dicho sistema recibe esa excitación es seleccionando un péndulo al azar y empujando el mismo lo suficiente para que altere la estabilidad de dicho sistema. La perturbación del péndulo seleccionado al azar tendrá un efecto sobre los que tiene al lado conectados por los resortes, obligando así a mover a los péndulos de al lado, la gran medida en que los demás péndulos se muevan dependerá de las propiedades mecánicas de los resortes que conecta a dichos péndulos y la fricción del sistema. Dependiendo de la medida de la perturbación, el sistema total acumulara energía hasta que los otros



péndulos que no estaban directamente conectados directamente al péndulo perturbado empezaran a moverse también. A esta reacción en cadena se le conoce como *avalancha*.

Figura 2. **Péndulos acoplados en cadena**



Fuente: MACHUCA MORENO, Alejandra. *Análisis de estabilidad transitoria basado en teoría de redes complejas y el fenómeno de percolación*. p. 13.

Este sistema tan básico de comprender ayuda a desarrollar el análisis de la interconectividad de sistemas más complejos como lo son las redes eléctricas, o bien la topología de un sistema eléctrico de potencia, influyendo así el tamaño y frecuencia de la *avalancha*. Tomando como punto de partida dos redes independientes y probando así diferentes niveles de interconexión, como es de esperar mientras más alto sea el nivel de interconexión esto representará desventajas, esto debido a las siguientes razones: la primera es debido a que las conexiones abren vías para que las perturbaciones usuales de las redes vecinas afecten a la red que se conectó y otra razón, es que las nuevas interconexiones aumentarán la capacidad de la red en general, de crear perturbaciones más grandes.

No obstante, desde el punto de vista de la estabilidad de voltaje, los resultados muestran que la simetría de la distribución de las cargas y generadores afectan el rendimiento de la red, así como el nivel de enmallado de la misma. Una red con una interconexión más compleja y de mayor tamaño no

necesariamente tiene mejor rendimiento en comparación con una de menor tamaño de interconexión.

## **2.6. Propagación de una perturbación electromecánica en un sistema eléctrico de potencia**

Al ser perturbado de su condición de equilibrio un SEP, reacciona con la dinámica de todos sus elementos y controles. Provocando diversas oscilaciones en el sistema, como resultado de una propia respuesta de parte del SEP. Estas oscilaciones por lo regular desaparecerán al transcurrir el tiempo hasta que el sistema llegue de nuevo a su condición de equilibrio.

Es de interés cuando las oscilaciones mencionadas no desaparecen al pasar del tiempo y estas se mantienen por largos periodos o bien estas oscilaciones crecen provocando así mayores problemas. Por lo que es de importancia darle una característica para cada tipo de oscilaciones e identificar sus variables en particular. Para un estudio más amplio de estas oscilaciones en los SEP se requiere modelar todos los elementos y controles mediante ecuaciones diferenciales que describan la respuesta de estos ante las perturbaciones. Para los casos de estabilidad en pequeñas perturbaciones el modelo del SEP es posible aplicar técnicas para así poder linealizarlo.

Cada elemento que compone el SEP tiene un tiempo de respuesta caracterizando la dinámica de este elemento o control. En base a si la dinámica es lenta o rápida, es lo que se conoce como respuestas oscilatorias de baja y alta frecuencia. En algunos casos donde es posible modelar estas dinámicas de los elementos del SEP, el enfoque está dirigido hacia poder representar los que mayor influencia tienen en el fenómeno de interés, en donde los valores de las constantes de tiempo son claves para determinar elementos importantes y el

resto de sus componentes se modelan en estado estable o bien, no modelando dicho efecto.

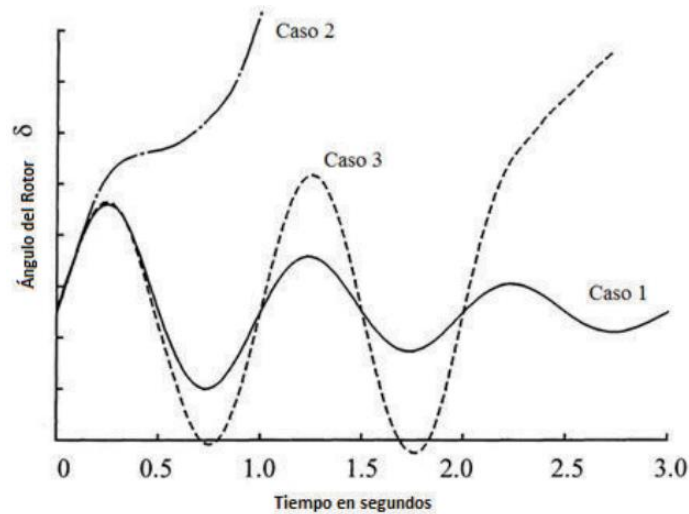
Las oscilaciones electromecánicas están directamente relacionadas con la dinámica de la oscilación de los rotores de las máquinas de generación y, en consecuencia, relacionada a las oscilaciones de potencia provocadas por cambios en las posiciones angulares de estas unidades generadores. Por el impacto en el comportamiento de variables en el sistema, este tipo de oscilaciones son de mayor importancia. Por lo general se considera que las frecuencias naturales de estas oscilaciones vienen determinadas por las inercias de los generadores y la reactancia característica que se encuentra en el sistema de transmisión, asumiendo que efecto de controles tiene un mayor impacto en el amortiguamiento de las oscilaciones y un efecto mínimo en la frecuencia.

Analizando el comportamiento dinámico del ángulo del rotor del generador, es posible determinar si el generador mantiene el sincronismo o sale de paso. Existen tres posibles casos que describen el comportamiento dinámico del ángulo del rotor del generador, tal como se muestra en la figura 3.

El caso 1 - estable, se puede observar que el ángulo del rotor aumenta hasta un valor pico, posteriormente decrece y oscila, a medida que sigue oscilando su amplitud decrece, esto hasta llegar a un estado de operación estable.

El caso 2 - inestable, el ángulo de rotor incrementa de manera progresiva hasta salir completamente del sincronismo, a este tipo de inestabilidad es conocida como "*inestabilidad de primer ciclo*", ya que, prácticamente no presenta una oscilación previa a salirse de paso, esto debido a la ausencia de un torque sincronizante.

Figura 3. **Comportamiento dinámico del ángulo del rotor**



Fuente: NÚÑEZ LÓPEZ, José Carlos. *Comparación técnica entre los programas de simulación de Sistemas de Potencia DlgSILENT PowerFactory y PSS/E*. p. 41.

El caso 3 - inestable, similar a los casos anteriores, ya que, en el primer ciclo es estable. Sin embargo, posteriormente se presenta una oscilación creciente para después salirse del sincronismo, como resultado de dicho crecimiento oscilatorio.

## 2.7. Estabilidad transitoria

El concepto de estabilidad transitoria o estabilidad del ángulo del rotor de grandes perturbaciones se refiere a la capacidad que un sistema eléctrico de potencia tiene para mantener el sincronismo después de ser expuesto a perturbaciones severas. Siendo el reajuste de los ángulos de los rotores de las máquinas síncronas la respuesta que el sistema eléctrico de potencia da ante tal evento, en el cual influye la relación no lineal potencia-ángulo.

En la estabilidad transitoria se depende de las condiciones iniciales de operación y de la severidad de la falla en el sistema eléctrico de potencia. Esta inestabilidad por lo regular, se le detecta por la separación angular del tipo aperiódica de los rotores de las máquinas síncronas que conforman el sistema eléctrico de potencia. Comúnmente el sistema eléctrico de potencia después de sufrir la perturbación se altera de tal manera que la operación de régimen permanente antes y después de la falla, son totalmente distintos.

El sistema eléctrico de potencia se diseña y opera para ser estable ante contingencias seleccionadas, como lo pueden ser cortocircuitos de tipo monofásico, bifásico y trifásico. Usualmente las fallas se dan en las líneas de transmisión y ocasionalmente en las barras y transformadores. El despeje de estas fallas es realizado mediante la correcta operación de los interruptores, de modo que se aislé el elemento perturbado, tomando en cuenta la velocidad de estas maniobras.

### **2.7.1. Ecuación de oscilación de la máquina síncrona**

Los estudios de estabilidad transitoria implican el análisis de la ecuación de oscilación de la máquina síncrona, ya que la misma describe la oscilación electromagnética entre los rotores de las máquinas síncronas y el sistema eléctrico de potencia.

Por lo que primero se analizará la ecuación que gobierna el movimiento del rotor de la máquina síncrona, la cual se basa en un principio elemental de dinámica, que viene dada de la siguiente manera:

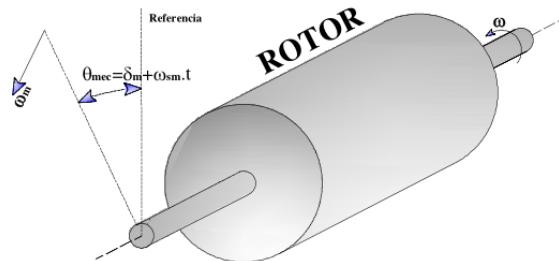
$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{Ec. 1}$$

En donde:

- $J$  Es el momento de inercia de la masa del rotor, expresado en  $[kgs \cdot m^2]$
- $\theta_m$  Es el desplazamiento angular del rotor con respecto al eje estacionario, expresado en  $[rad]$
- $t$  Es el tiempo, expresado en  $[s]$
- $T_m$  Es el par mecánico, suministrado por la fuente de energía mecánica menos el par de retardo debido a las pérdidas rotacionales, con dimensionales en  $[N \cdot m]$
- $T_e$  Es el par electromagnético, expresado en  $[N \cdot m]$
- $T_a$  Es el par de aceleración total, expresado en  $[N \cdot m]$

Considerando que tanto el par mecánico como el eléctrico son positivos para un generador síncrono. Es decir que el par mecánico es el par resultante en la flecha que tiende a acelerar el rotor en la dirección positiva  $\theta_m$  de rotación. Operando de manera estable ambos pares son de magnitudes iguales, siendo el par de aceleración es cero. Por lo que en este caso no existe aceleración o desaceleración de la masa del rotor dando como resultado la velocidad de sincronismo.

Figura 4. **Rotor de una máquina, indicando dirección de rotación y ángulo mecánico**



Fuente: CUZCO SILVA, Javier Rolando. *Análisis de Estabilidad Transitoria de las Centrales Hidroeléctricas de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS*, p. 45.

La masa giratoria incluida en el rotor de la máquina y la fuente de energía mecánica se encuentra en sincronismo junto con las otras máquinas operando a la misma velocidad de sincronismo en un SEP, donde la fuente de energía mecánica puede ser una turbina a vapor, existiendo distintos niveles de complejidad, sin embargo, se considerará constante  $T_m$  para cualquier condición de operación que se dé y el para eléctrico  $T_e$  corresponderá a la potencia neta de entrehierro de la máquina y con esto tomar en cuenta la potencia de salida total del generador más las pérdidas por efecto Joule en el devanado de armadura.

Como  $\theta_m$  es medido con respecto al eje de referencia estacionario sobre el estator, se toma como una medida absoluta del ángulo del rotor. Por consiguiente, este se incrementará conforme el tiempo lo haga aun a una constante velocidad de sincronismo. Dado que esta velocidad del rotor relativa a la de sincronismo es de interés, es de mayor conveniencia medir la posición angular del rotor con respecto al eje de referencia que rota a velocidad síncrona. Por lo que, se define de la siguiente manera:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

$\omega_{sm}$  Es la velocidad de sincronismo de la máquina, expresada en  $[rad \cdot s]$

$\delta_m$  Es el desplazamiento angular del rotor, expresado en  $[rad]$

Aplicando la segunda derivada con respecto del tiempo se obtiene:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad \text{Ec. 4}$$

La ecuación 3, muestra que la velocidad angular del rotor, dada por  $d\theta_m/dt$ , es constante e igual a la velocidad de sincronismo cuando  $d\delta_m/dt$  se hace cero. Por lo que,  $d\delta_m/dt$  es la desviación que hay entre la velocidad en que gira el rotor con respecto a la velocidad de sincronismo, con dimensionales dadas en radianes por segundo. Por otro lado, la ecuación 4, indica la aceleración del rotor expresada en radianes por segundo al cuadrado.

Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 1, se obtiene:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{Ec. 5}$$

Debido a la facilidad en la notación, es de conveniencia utilizar para expresar la velocidad angular del rotor, la siguiente expresión:



$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad \text{Ec. 6}$$

Sabiendo que, la potencia es igual al par por la velocidad angular, tal como se tienen expresadas la ecuación 5 y 6 respectivamente, se obtiene:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{Ec. 7}$$

En donde:

$P_m$  Es la salida de potencia mecánica, expresada en [W]

$P_e$  Es la potencia eléctrica desarrollada por la máquina, expresada en [W]

$P_a$  Es la potencia de aceleración, expresada en [W]

El coeficiente  $J\omega_m$  se le conoce como el momento angular del rotor; en el que a una velocidad de sincronismo  $\omega_{sm}$ , dicho coeficiente se denota con la letra  $M$  y se le llama *constante de inercia*, expresada en joules-segundo por radian, por lo que la ecuación 10 puede expresarse de la siguiente manera:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{Ec. 8}$$

Sin embargo, en un sentido estricto  $\omega_m$  no es igual a la velocidad del sincronismo en todas las condiciones de operación de la máquina. No obstante, en la práctica esta velocidad angular no difiere mucho a la velocidad de sincronismo cuando la máquina opera en estado estable, por lo que es preferible el uso de la ecuación 8, ya que es de más conveniencia utilizar en los cálculos la potencia que el par.

Al realizar estudios de estabilidad, en los datos que la máquina proporciona se encuentra otra constante, la cual es relacionada con la inercia y esta se conoce como *constante H* y viene definida por:

$$H = \frac{\frac{1}{2} I \omega_{sm}^2}{S_{m\acute{a}q}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{m\acute{a}q}} \quad Ec. 9$$

En donde, todo el numerador representa la energía cinética almacenada en Megajoules a una velocidad de sincronismo; y el denominador  $S_{m\acute{a}q}$  representa la capacidad de la máquina en MVA. Despejando el momento angular del rotor  $M$ , se obtiene lo siguiente:

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{m\acute{a}q} \quad Ec. 10$$

Sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 8, se encuentra la siguiente expresión:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{m\acute{a}q}} = \frac{P_m - P_e}{S_{m\acute{a}q}} \quad Ec. 11$$

La expresión anterior conduce a un resultado muy simple, en donde, si se observa que  $\delta_m$  sus dimensionales están en radianes y  $\omega_{sm}$  sus dimensionales están dados en radianes por segundo. La ecuación se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad Ec. 12$$

Esto se cumple siempre que  $\delta$  y  $\omega_s$  tengan unidades consistentes, ya sean estos grados mecánicos o eléctricos, o bien radianes mecánicos o eléctricos. Al asociar el subíndice  $m$  con  $\omega_s$ ,  $\omega$ , y  $\delta$ , esto indica que deben utilizarse unidades *mecánicas* ya que, de otra forma estarían implicadas unidades *eléctricas*. Por consiguiente,  $\omega_s$  es la velocidad de sincronismo en unidades eléctricas en el cual, para un sistema como tal esta velocidad tiene una frecuencia eléctrica  $f$ , expresada en Hertz, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{Ec. 13}$$

A la ecuación 12, se le conoce como *ecuación de oscilación* de la máquina, la cual, para los estudios de estabilidad es la ecuación fundamental que gobierna la dinámica rotacional de la máquina síncrona. Es de notar que dicha expresión es una ecuación diferencial de segundo orden que bien pueden expresarse como dos ecuaciones diferenciales de primer orden, de la siguiente manera:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad \text{Ec. 14}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad \text{Ec. 15}$$

La solución de la ecuación de oscilación ofrece una expresión del ángulo delta del rotor  $\delta$  en función del tiempo. A la gráfica de esta solución, se le conoce como *curva de oscilación* de la máquina. Al ser estas curvas analizadas para todas las máquinas involucradas en un SEP, esta gráfica indicará si dichas unidades permanecen en sincronismo posterior a la ocurrencia de una perturbación.

### 2.7.2. Ecuación potencia-ángulo

Para la ecuación de oscilación de un generador, se considerará que la entrada de potencia mecánica que proviene de la fuente de energía mecánica  $P_m$  será constante debido a que, las condiciones que se dan en la red eléctrica pueden cambiar antes de que el control gobernador que tenga la turbina ocasione que la misma reaccione. Por lo que, la potencia eléctrica  $P_e$  será la que determinará el movimiento del rotor de la máquina, es decir, si acelera, desacelera o bien permanece a una velocidad síncrona. La máquina operara a la velocidad de sincronismo cuando  $P_e$  sea igual a  $P_m$  y que cuando  $P_e$  cambie su valor el rotor se desviara de la velocidad de sincronismo. Por lo que, los cambios de  $P_e$  serán los que determinara las condiciones en las redes de trasmisión y distribución, del mismo modo por las cargas del sistema al que la unidad generadora suministra su potencia.

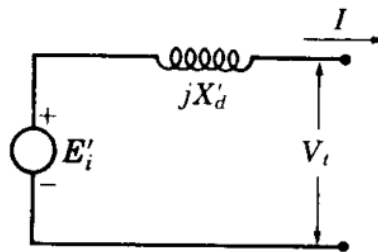
Por lo general, lo que puede causar que la salida del generador  $P_e$  cambie abruptamente son los disturbios en las redes eléctricas, los cuales vienen siendo resultados de severos cambios en las cargas, fallas en la red o bien maniobras en los interruptores, provocando así transitorios electromecánicos. Lo relevante en lo anteriormente mencionado es que el efecto que tienen las variaciones en la velocidad de la máquina sobre el voltaje generado es mínimo y, por la tanto, despreciable. Por lo que el cambio en la  $P_e$  viene determinado por las ecuaciones de flujo de potencia que se aplicadas al estado de la red, así como por el modelo que se seleccionar para poder representar el comportamiento eléctrico de la unidad generadora.

Para los estudios de estabilidad transitoria, la máquina síncrona será representada por el voltaje interno transitorio de esta  $E'_i$  en serie con su reactancia transitoria  $X'_d$ , tal como se muestra en la figura 5, donde el voltaje en

terminales esta denotado como  $V_t$ , lo que corresponde a la representación en estado estable.

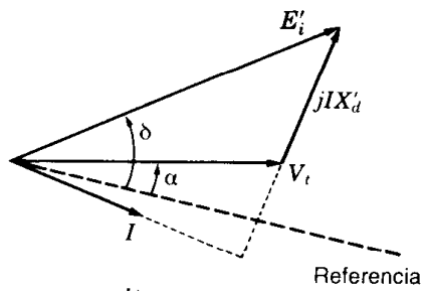
Generalmente se despreciará la resistencia de armadura, por lo que el diagrama fasorial mostrado en la figura 6 aplicará para este caso, donde los ángulos de los fasores de las cantidades de la máquina se medirán con respecto a la referencia común del sistema.

Figura 5. **Representación de la máquina síncrona para estudios de estabilidad transitoria**



Fuente: GRAINGER, John J. *Análisis de Sistemas de Potencia*, p. 666.

Figura 6. **Diagrama fasorial de la máquina síncrona**



Fuente: GRAINGER, John J. *Análisis de Sistemas de Potencia*, p. 666.

A partir de las condiciones iniciales o condiciones pre transitorias se determinan los valores de  $E'_i \angle \delta$ , donde la magnitud del voltaje interno se mantiene constante, mientras que  $\delta$  se considera como el ángulo entre la posición del rotor y el voltaje en terminal.

En el circuito que representa la máquina síncrona se tiene una corriente  $I \angle \phi$  fluyendo a través de este. Puede hallarse una potencia activa y reactiva asociada a esta corriente mediante la expresión de la potencia aparente, para valores por unidad y para valores reales, dada de la siguiente forma:

$$\bar{S} = \bar{V} * \bar{I}^* [pu] \quad \text{Ec. 16}$$

$$\bar{S} = \sqrt{3} * \bar{V} * \bar{I}^* [VA] \quad \text{Ec. 17}$$

Reemplazando los términos de voltaje y corriente que se tienen en la representación de la máquina síncrona en la ecuación 16, se obtiene:

$$\bar{S} = V_t \angle \alpha_t * (I \angle \phi) \quad \text{Ec. 18}$$

$$\bar{S} = V_t \angle \alpha_t * \left( \frac{E'_i \angle \delta - V_t \angle \alpha_t}{jX'_d} \right)^* \quad \text{Ec. 19}$$

Resolviendo el conjugado de la corriente y multiplicando el ángulo del voltaje terminal por los ángulos dentro del paréntesis, que no es más que la suma de estos, se obtiene:

$$\bar{S} = j \frac{V_t}{X'_d} * (E'_i \angle(\alpha_t - \delta) - V_t) \quad \text{Ec. 20}$$

Al voltaje interno de la ecuación anterior se le puede expresar de manera compleja de la siguiente forma:

$$E'_i \angle(\alpha_t - \delta) = E'_i * (\cos(\alpha_t - \delta) + j \sin(\alpha_t - \delta)) \quad \text{Ec. 21}$$

Remplazando el voltaje interno de manera compleja en la ecuación 20 y resolviendo, se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{S} = j \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \cos(\alpha_t - \delta) - \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \sin(\alpha_t - \delta) - j \frac{V_t^2}{X'_d} \quad \text{Ec. 22}$$

Se puede observar que la anterior ecuación tiene términos reales y complejos, correspondiendo la parte real a la potencia activa y la parte imaginaria la potencia reactiva. Cambiando el signo, sabiendo que seno es una función impar, se obtiene la siguiente expresión para la potencia activa:

$$P = \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \sin(\delta - \alpha_t) \quad \text{Ec. 23}$$

Del mismo modo se obtiene la expresión para la potencia reactiva, con la salvedad de que en esta se tiene coseno y esta es una función par.

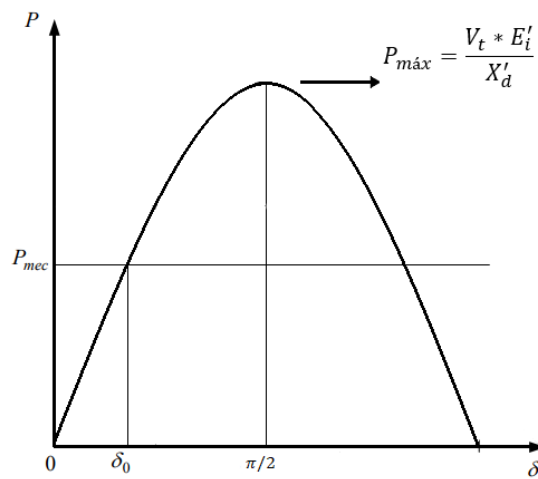
$$Q = \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \cos(\delta - \alpha_t) - j \frac{V_t^2}{X'_d} \quad \text{Ec. 24}$$

Tomando como referencia los terminales del generador,  $V_t = 1 \angle 0^\circ$ , se puede expresar a la potencia activa de la siguiente forma:

$$P = \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \sin(\delta) \quad \text{Ec. 25}$$

A lo anterior se le conoce como la ecuación potencia-ángulo, donde  $V_t$ ,  $E'_i$  y  $X'_d$  son constantes. Por lo que la relación entre la potencia  $P$  y el ángulo del rotor  $\delta$ , no es mas que una curva sinusoidal, como la que se muestra en la figura 7.

Figura 7. **Curva potencia-ángulo**



Fuente: elaboración propia.

Siendo el valor máximo para esta curva, la siguiente expresión:

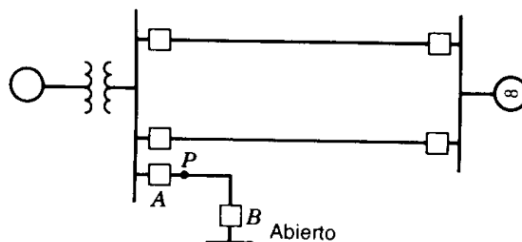
$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_t * E'_i}{X'_d} \quad \text{Ec. 26}$$



### 2.7.3. Criterio de áreas iguales

Las ecuaciones de oscilación desarrolladas anteriormente, en su naturaleza no son lineales, lo cual, complica poder encontrar soluciones formales. Aun en casos donde se tiene una sola unidad generadora oscilando respecto a una barra infinita, es complicado darle una solución. Esto obliga a recurrir a métodos computacionales. Sin embargo, se pueden utilizar métodos directos sin tener que resolver estas ecuaciones, con el objetivo de examinar la estabilidad de un sistema. Tal es el caso del sistema mostrado en la figura 8, en que se observa que el interruptor A está inicialmente cerrado, mientras en el extremo opuesto de la línea de transmisión corta, el interruptor B se encuentra abierto. Por lo tanto, las condiciones de operación del sistema son estables. No obstante, en el punto P, el cual está próximo a la barra, se da una falla trifásica, esta es liberada por el interruptor A, después de un periodo de tiempo breve.

Figura 8. **Diagrama unifilar de un SEP, adicionando una línea de transmisión corta**

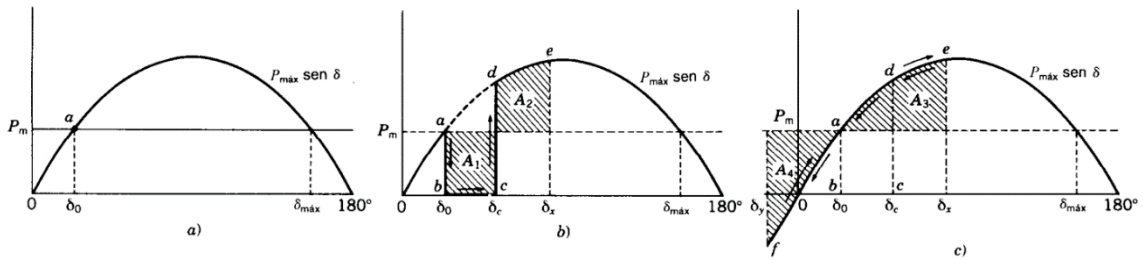


Fuente: GRAINGER, John J. *Análisis de Sistemas de Potencia*, p. 676.

El sistema de transmisión seguirá inalterable excepto cuando se presentó la perturbación. La falla generó un cortocircuito en la barra, con lo que la potencia de salida desde la unidad generadora es cero, esto hasta que la falla sea liberada.

Al analizar las curvas de potencia ángulo mostradas en la figura 9, se podrá comprender las condiciones físicas antes, durante y después de la falla.

Figura 9. **Curvas potencia ángulo para un generador**



Fuente: GRAINGER, John J. *Análisis de Sistemas de Potencia*, p. 677.

El generador inicialmente opera a una velocidad síncrona con un ángulo de rotor denotado por  $\delta_0$ , con una potencia mecánica  $P_m$  igual a la potencia eléctrica de salida  $P_e$ , como se puede observar en la figura 9a. Al darse la ocurrencia de la falla en  $t = 0$ , con lo que la potencia eléctrica se hace cero repentinamente, mientras la potencia mecánica de entrada no sufre alteración, como se observa en la figura 9b. Esta diferencia de potencia se considera como la razón de cambio de energía cinética almacenada en la masa del rotor y esto sucede ya que hay un aumento en la velocidad como resultado de tener una potencia de aceleración  $P_m$  constante. Entendiéndose a  $t_c$  como el tiempo necesario para librar la falla, por lo que, la aceleración es constante por un tiempo menor a este tiempo crítico y esta se expresara de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad \text{Ec. 27}$$

Mientras esta falla esté presente, el incremento de la velocidad superior a la del sincronismo se deduce al integrar la ecuación anterior, obteniendo lo siguiente:

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad \text{Ec. 28}$$

Es posible obtener el ángulo del rotor integrando una vez más con respecto del tiempo, dando como resultado la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\omega_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \quad \text{Ec. 29}$$

Analizando las dos ecuaciones anteriores es de notar que la velocidad relativa del rotor incrementa de manera lineal con respecto al tiempo, mientras que el ángulo, del mismo modo aumenta desde  $\delta_0$  hasta  $\delta_c$  mientras se libera la falla. Esto se da cuando el ángulo  $\delta$  va desde el punto  $b$  hasta  $c$ , observable en la figura 9b.

Justo en el momento en que la falla es liberada, el aumento en la velocidad del rotor y de la separación angular entre la unidad generadora y la barra infinita, vienen dados por las siguientes expresiones respectivamente:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{2H} t_c \quad \text{Ec. 30}$$

$$\delta(t)|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_c^2 + \delta_0 \quad \text{Ec. 31}$$

Al ser liberada la falla en el ángulo crítico  $\delta_c$ , se incrementa pronunciadamente la potencia eléctrica de salida, esto hasta un valor correspondiente al punto  $d$ , mostrada en la curva de potencia ángulo. En ese punto la potencia eléctrica de salida sobrepasa a la potencia mecánica de entrada y con esto, la potencia de aceleración es negativa. En consecuencia, hace que el rotor vaya deteniéndose conforme  $P_e$  va del punto  $d$  al punto  $e$ , mostrado en la figura 9c. El rotor alcanza nuevamente la velocidad de sincronismo en este punto  $e$ , aunque el ángulo del rotor ha avanzado a  $\delta_x$ , este ángulo viene determinado por la condición de que  $A_1$  y  $A_2$  sean iguales. En este punto  $e$  la potencia de aceleración aun es negativa, es decir retardante, por lo que el rotor no puede permanecer a la velocidad de sincronismo, pero continuará perdiendo aceleración. La velocidad relativa es negativa y el ángulo de rotor disminuye desde el punto  $e$ , donde su valor es  $\delta_x$  en la curva, hasta el punto  $a$ , donde la velocidad del rotor es menor a la del sincronismo, tal como se muestra en la figura 9c. Desde este punto  $a$  hasta el punto  $f$ , la potencia mecánica será mucho mayor que la eléctrica por lo que, el rotor de nuevo incrementa su velocidad hasta alcanzar la de sincronismo, lo que sucede en el punto  $f$ . El punto  $f$  está localizado en la curva potencia ángulo de tal forma que  $A_3$  y  $A_4$  sean iguales. Al no tener amortiguamiento, el rotor de la máquina seguirá oscilando, alcanzando la velocidad síncrona en los puntos  $e$  y  $f$  y en esta secuencia descrita  $f-e-a$ ,  $e-a-f$ .

Para un sistema donde una máquina está oscilando con respecto a una barra infinita es aplicable este principio, para determinar la estabilidad del sistema bajo condiciones transitorias sin tener que resolver la ecuación de oscilación, este principio tiene como nombre *criterio de áreas iguales*, y aunque este criterio no aplica a sistemas de varias máquinas, es de ayuda para la comprensión de cómo es que influyen algunos factores en la estabilidad transitoria.

Este criterio por lo regular se utilizar para una máquina y una barra infinita, aunque bajo algunas consideraciones puede adaptarse fácilmente a un sistema con dos máquinas. Por lo que, la ecuación para la máquina que conecta a la barra es:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{Ec. 32}$$

Definiendo la velocidad angular del rotor relativa a la de sincronismo por:

$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad \text{Ec. 33}$$

Diferenciando la ecuación 30, con respecto a  $t$  y sustituyéndola en la ecuación 32, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e \quad \text{Ec. 33}$$

Al ser la velocidad del rotor igual a la del sincronismo, se puede notar que  $\omega$  y  $\omega_s$  serán iguales, haciendo que,  $\omega_r$  sea cero. Multiplicando ambos lados de la ecuación 33, por el  $\omega_r = d\delta/dt$ , se obtendrá:

$$\frac{H}{\omega_s} 2\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad \text{Ec. 34}$$

Reescribiendo el lado izquierdo de la ecuación 34, se tiene:

$$\frac{H}{\omega_s} \frac{d(\omega_r^2)}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad \text{Ec. 35}$$

Multiplicando por  $dt$  e integrando a la ecuación 35, para obtener:

$$\frac{H}{\omega_s} (\omega_{r2}^2 - \omega_{r1}^2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta \quad \text{Ec. 36}$$

Donde los subíndices de los términos  $\omega_r$  son correspondientes a los límites de  $\delta$ . Es decir,  $\omega_{r1}$  corresponde a  $\delta_1$  y  $\omega_{r2}$  al ángulo  $\delta_2$ . Sabiendo que  $\omega_r$  corresponde a la desviación de la velocidad del rotor con respecto a la velocidad de sincronismo, es de notar que si la velocidad del rotor es síncrona en los ángulos  $\delta_1$  y  $\delta_2$ , se tendrá que las velocidades del rotor  $\omega_{r1}$  y  $\omega_{r2}$  serán cero. Con esta condición dada, se obtiene de la anterior ecuación lo siguiente:

$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad \text{Ec. 37}$$

La anterior ecuación es aplicable a cualquiera de los puntos  $\delta_1$  y  $\delta_2$  sobre la curva potencia ángulo, si y solo si, estos son puntos en los que la velocidad del rotor sea la del sincronismo. Estos puntos serian  $a$  y  $e$ , en la figura 9b, correspondientes a  $\delta_0$  y  $\delta_x$ , respectivamente. Integrando la ecuación anterior en dos etapas, puede escribirse de las siguientes dos maneras:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad \text{Ec. 38}$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta \quad \text{Ec. 39}$$

El lado izquierdo de la ecuación anterior aplica al periodo de la falla y el lado derecha corresponde a un periodo inmediatamente posterior a la falla hasta un punto de máxima oscilación  $\delta_x$ . Se puede observar en la figura 9b, que  $P_e$  es cero durante la perturbación. La integral izquierda de la ecuación 39, corresponde al área sombreada  $A_1$ , mientras la integral derecha corresponde al área sombreada  $A_2$ , a esto corresponde que dichas áreas sean iguales.

Es de notar que en la figura 9c, la velocidad del rotor corresponde a la del sincronismo en  $\delta_x$  y en  $\delta_y$ , por lo que, en base al razonamiento anterior  $A_3$  y  $A_4$  son iguales. Estas áreas son directamente proporcionales al incremento de energía cinética del rotor conforme este acelera, mientras las áreas  $A_1$  y  $A_2$  son proporcionales al decremento de esta energía cinética del rotor conforme este disminuye su aceleración. Esto puede notarse al analizar la ecuación 36, por lo que se puede establecer que la energía cinética añadida al rotor durante la falla debe eliminarse posterior a dicha perturbación, esto con el objetivo de restaurar en el rotor la velocidad de sincronismo.

#### 2.7.4. Ángulo crítico de despeje de falla

Considerando el análisis anterior se asume que el área sombreada  $A_1$  depende del tiempo empleado para liberar la falla, si hubiese un retraso en el libramiento de esta, el ángulo  $\delta_c$  incrementa; lo mismo sucederá con  $A_1$  y bajo el criterio de áreas iguales,  $A_2$  también incrementaría para restaurar la velocidad de sincronismo en el rotor y esto ya no sucedería en el ángulo  $\delta_x$ . Si la falla persistiera y el tiempo de libramiento se ve prolongado de modo que el ángulo del rotor  $\delta$  oscile por encima del ángulo  $\delta_{m\acute{a}x}$ , la velocidad del rotor en ese punto

de la curva potencia ángulo, será superior a la velocidad de sincronismo cuando esta se encuentra nuevamente que la potencia de aceleración es positiva; en estas condiciones el ángulo  $\delta$  aumentará sin límites, dando como resultado una inestabilidad.

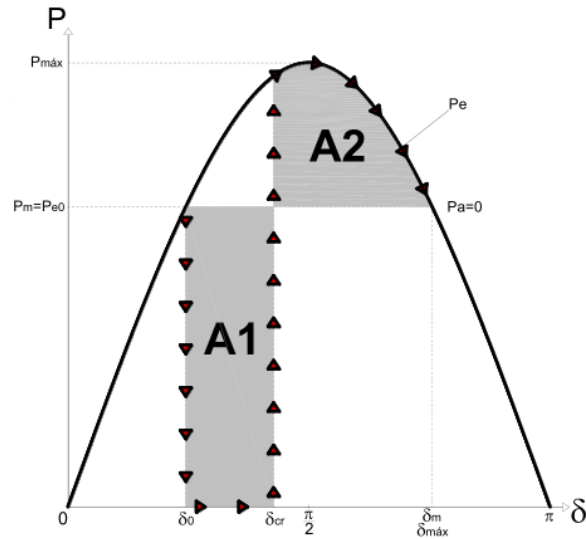
Este particular caso indica que existe un ángulo crítico para librar la perturbación, y que satisface los requisitos del criterio de áreas iguales para la estabilidad. Este ángulo se le conoce como *ángulo crítico de libramiento*  $\delta_{cr}$ , este se muestra en la figura 10. Del mismo modo, existe un tiempo crítico para eliminar la falla, al cual se le llama *tiempo crítico de libramiento*  $t_{cr}$ ; y este no es más que el tiempo máximo que ocurre desde el inicio de la perturbación hasta su aislamiento, de modo que el SEP es transitoriamente estable.

Para el caso de la figura 10, es posible determinar tanto el ángulo crítico de libramiento como el tiempo crítico de libramiento de la siguiente manera, en donde el área rectangular  $A_1$  es:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \quad Ec. 40$$



Figura 10. Curva potencia ángulo, mostrando el ángulo crítico de libramiento  $\delta_{cr}$



Fuente: CUZCO SILVA, Javier Rolando. Análisis de Estabilidad Transitoria de las Centrales Hidroeléctricas de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS, p. 63.

Mientras que para el área  $A_2$  será:

$$A_2 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_{m\acute{a}x} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$= P_{m\acute{a}x}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{m\acute{a}x}) - P_m(\delta_{m\acute{a}x} - \delta_{cr}) \quad \text{Ec. 41}$$

Igualando ambas expresiones de  $A_1$  y  $A_2$ ; y trasponiendo términos, se obtiene:

$$\cos \delta_{cr} = \left( \frac{P_m}{P_{m\acute{a}x}} \right) (\delta_{m\acute{a}x} - \delta_0) + \cos \delta_{m\acute{a}x} \quad \text{Ec. 42}$$

Se puede observar que en la curva potencia ángulo, la cual es sinusoidal se tiene:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \pi - \delta_0 \quad \text{Ec. 43}$$

$$P_m = P_{m\acute{a}x} \sin \delta_0 \quad \text{Ec. 44}$$

Sustituyendo los valores de  $\delta_{m\acute{a}x}$  y de  $P_m$  en la ecuación 42, simplificando el resultado y despejando el ángulo crítico de libramiento  $\delta_{cr}$ , da lo siguiente:

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0] \quad \text{Ec. 45}$$

De esto es posible encontrar el tiempo crítico de libramiento, basta con sustituir la ecuación 45 en la ecuación 30, dando la siguiente expresión:

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad \text{Ec. 46}$$

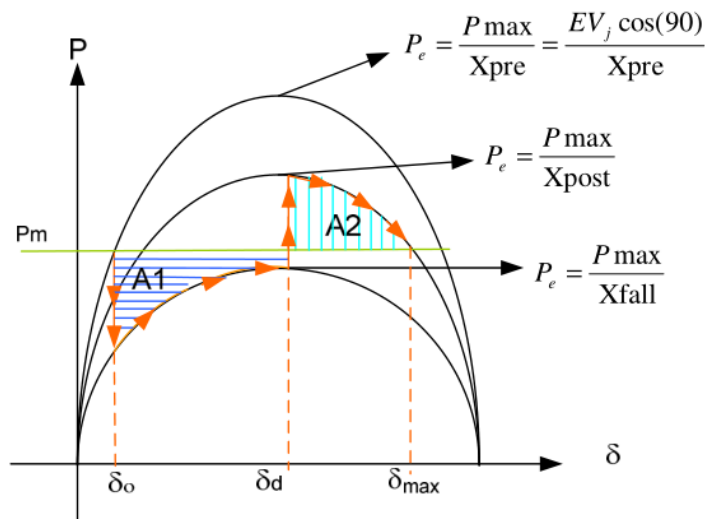
Con lo que, despejando  $t_{cr}$ , se obtiene:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad \text{Ec. 47}$$

Las ecuaciones anteriores son válidas para el caso en que el SEP vuelve a su condición inicial posterior a la falla; sin embargo, esto no suele suceder para todos los casos. Se puede tener un caso en cual un SEP de dos circuitos, uno de ellos entra en cortocircuito y para poder despejar la perturbación es necesario aislarlo de todo el SEP.

El efecto de lo anterior se verá reflejado en que la reactancia equivalente del sistema aumentará y con esto la potencia eléctrica será menor, tal como puede observar en la siguiente figura.

Figura 11. **Curva potencia ángulo, caso específico**



Fuente: AGUIRRE CÁRDENAS, Christian Wladimir. *Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software PowerFactory 13.1 de DigSILENT*. p. 245.

De la figura anterior se puede observar que existen tres distintas curvas que representan la potencia eléctrica para los distintos casos, en donde se tendrán constantes que multipliquen la  $P_{m\acute{a}x}$  para cada caso en particular.

Las constantes se expresan de la siguiente manera:

$$r_1 = \frac{\text{Potencia falla}}{\text{Potencia Prefalla}} = \frac{\frac{P_{m\acute{a}x}}{X_{fall}}}{\frac{P_{m\acute{a}x}}{X_{pre}}} = \frac{X_{pre}}{X_{fall}} \quad \text{Ec. 48}$$

$$r_2 = \frac{\text{Potencia Postfalla}}{\text{Potencia Prefalla}} = \frac{\frac{P_{m\acute{a}x}}{X_{post}}}{\frac{P_{m\acute{a}x}}{X_{pre}}} = \frac{X_{pre}}{X_{post}} \quad \text{Ec. 49}$$

A partir de esto, para que el SEP recupere estabilidad debe cumplirse el mismo criterio de igualdad de áreas. Por lo que calculando tanto A1 como A2, igualando sus integrales y despejando  $\delta_{cr}$ , se obtiene:

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left( \frac{1}{(r_1 - r_2)} \left[ \frac{P_m(\delta_0 - \delta_{m\acute{a}x})}{P_{m\acute{a}x}} + r_2 \cos(\delta_{m\acute{a}x}) - r_1 \cos(\delta_0) \right] \right) \quad \text{Ec. 50}$$

### 2.7.5. Factores que afectan la estabilidad transitoria

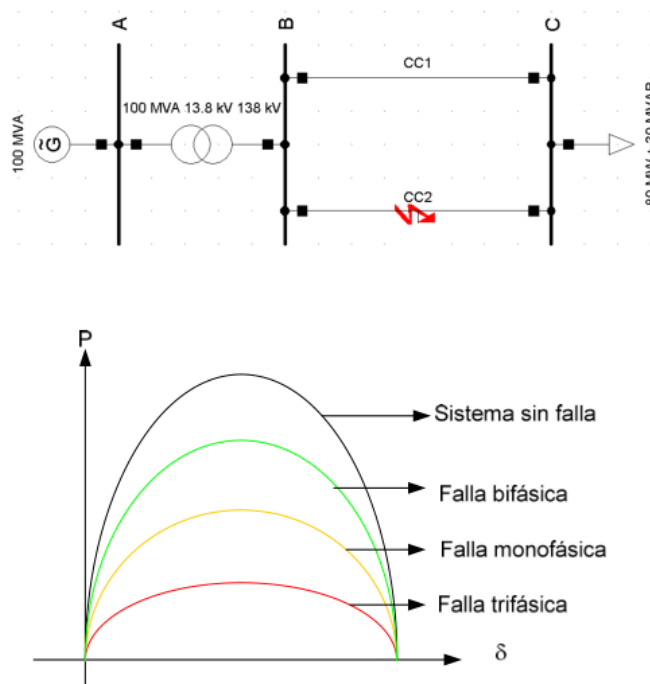
Lo complejo y robusto que puede llegar a ser un sistema eléctrico de potencia son factores importantes que llegan a determinar el comportamiento de este ante una perturbación. En consecuencia, es posible enumerar algunos factores que inciden directamente en esta estabilidad del sistema.

- Inercia del generador o del sistema.
- Tipo de falla.
- Tiempo empleado en despejar la falla.
- Impedancia del sistema pre y post falla.
- Voltaje interno del generador, así como su capacidad de respuesta de los sistemas de excitación.

- Carga del sistema preliminar a la falla.
- Configuración del sistema de transmisión.
- Capacidad de respuesta de los sistemas de control de potencia y velocidad.

No menos importante, un factor clave es la severidad de la falla. La cual, puede ser analizada con el sistema eléctrico de potencia mostrado en la figura 12. En el mismo se presentan distintos tipos de falla que pueden suceder en la línea CC2, dando como resultado distintos comportamientos en la curva potencia-ángulo para el generador.

Figura 12. **Diferentes tipos de fallas para un SEP**



Fuente: AGUIRRE CÁRDENAS, Christian Wladimir. *Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software PowerFactory 13.1 de DlgSILENT*, p. 244.

No obstante, la figura 12 no muestra una posible falla en el generador, de ocurrir una perturbación en tal elemento del sistema, toda la potencia mecánica provocaría la aceleración del generador, complicando así la transmisión de potencia eléctrica.

#### **2.7.6. Solución por partes de la curva de oscilación**

Los SEP considerablemente grandes son dependientes de una computadora para determinar  $\delta$  como una función  $t$  para todas las unidades generadores de interés. El fin de graficar esto es obtener la curva de oscilación para la máquina que sea de interés. Se calcula  $\delta$  como una función del tiempo en un periodo lo suficientemente largo para poder determinar si el ángulo  $\delta$  aumentará sin límite o bien alcanza un máximo para después descender. Este último caso lo que indicaría es que hay estabilidad. Sin embargo, es necesario para un sistema real en donde se consideran cierto número de variables, graficar  $\delta$  en función del tiempo en intervalos largos y así asegurar que este ángulo no incrementará de nuevo sin volver a un valor inferior.

Es posible encontrar el periodo de tiempo permitido antes de ser librada la perturbación, determinando las curvas de oscilación para diferentes tiempos de libramiento. Por lo regular los tiempos de interrupción estandarizados por los interruptores y sus relevadores asociados son de 8, 5, 3 o 2 ciclos posterior a la ocurrencia de la falla, con lo cual se puede especificar la velocidad del interruptor. Estos cálculos deben hacerse para una perturbación que permita en lo más mínimo la transferencia de potencia desde la máquina y para el peor de los casos, es decir, el tipo más severo de falla en el que es justificable la protección antes que la pérdida de estabilidad.

Son varios los métodos para la resolución de las ecuaciones diferenciales de segundo orden por medio de cálculos paso a paso de pequeños incrementos

en las variables independientes. Los métodos más perfeccionados y precisos como es de esperarse son por medio de softwares de cómputo o calculadoras digitales. El método manual en cambio es más sencillo que estos anteriores que son más recomendados. Para el método de cálculo a mano, el cambio en la posición angular del rotor en intervalos de tiempo cortos se calcula con las siguientes suposiciones previas:

- La potencia de aceleración  $P_a$  calculada al principio de un intervalo, se considera constante desde la mitad del intervalo que le precede hasta la mitad del intervalo a considerar.
- A lo largo de cualquier intervalo la velocidad angular  $\omega$ , se considera constante e igual al valor constante para la mitad del intervalo.

Obviamente, ninguna de las suposiciones anteriores es exacta ya que el ángulo  $\delta$  cambia continuamente y tanto  $P_a$  como  $\omega$  son funciones de dicho ángulo  $\delta$ . A medida que el intervalo de tiempo decrece, se hace más exacta la curva de oscilación calculada. Estas suposiciones se pueden apreciar mejor en la figura 13. La potencia de aceleración  $P_a$  es calculada para los intervalos  $n - 2$ ,  $n - 1$  y  $n$ , siendo estos los comienzos de los intervalos  $n - 1$ ,  $n$ ,  $n + 1$ . Tomando la suposición que  $P_a$  es constante entre los puntos medios del intervalo se obtiene parte de la curva de  $P_a$ , mostrada en la figura 13a. Lo mismo sucede en lo mostrado para la figura 13b, en donde la desviación o exceso de velocidad angular sobre la velocidad de sincronismo  $\omega_r$ , es constante a través del intervalo en valor calculado para el punto medio. Entre  $n - 3/2$  y  $n - 1/2$  existe un cambio de velocidad producido por la potencia de aceleración constante. Este cambio de velocidad es el producto de la aceleración por el intervalo de tiempo.

Lo anterior se entiende mejor, con la siguiente expresión:

$$\omega_{r,n-1/2} - \omega_{r,n-3/2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t = \frac{180f}{H} P_{a,n-1} \Delta t \quad \text{Ec. 51}$$

El cambio de  $\delta$ , para un intervalo cualquiera, es igual al producto de ese exceso  $\omega_r$  para el intervalo multiplicado por el tiempo de intervalo. Es decir, el cambio en  $\delta$  durante el intervalo  $n - 1$  es:

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \times \omega_{r,n-3/2} \quad \text{Ec. 52}$$

Siendo para el  $n$ -ésimo intervalo de la siguiente manera:

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \times \omega_{r,n-1/2} \quad \text{Ec. 53}$$

Restando las últimas dos ecuaciones y sustituyendo la sustracción en la ecuación 51, se eliminan todos los valores del exceso  $\omega_r$  y se obtiene:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + kP_{a,n-1} \quad \text{Ec. 54}$$

En donde:

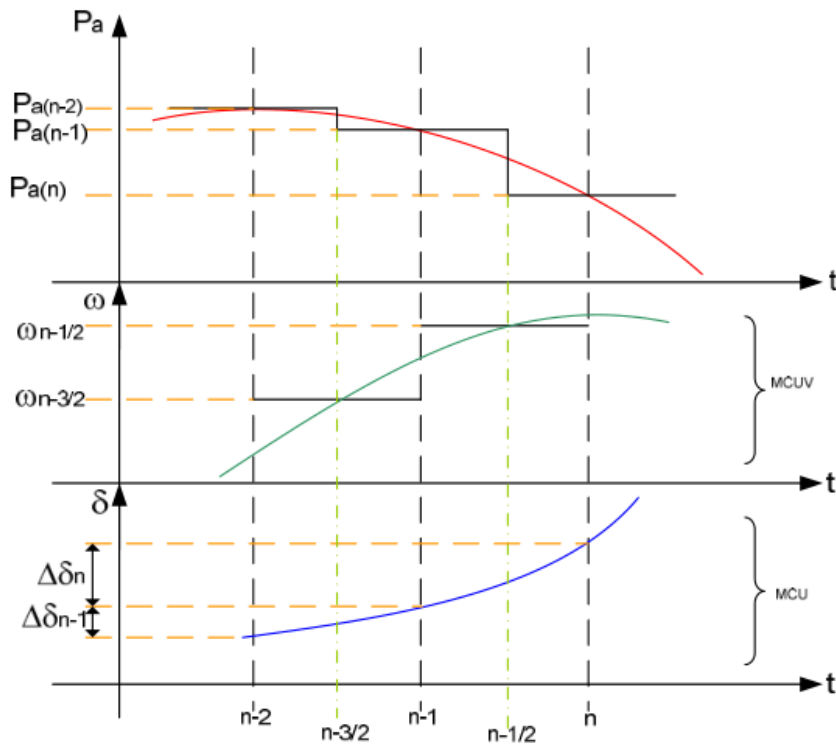
$$k = \frac{180f}{H} (\Delta t)^2 \quad \text{Ec. 55}$$

La ecuación 54 es importante en la solución por partes de la ecuación de oscilación ya que, muestra como calcular la variación en  $\delta$  durante un intervalo, sobre la base de  $P_a$  para ese intervalo y la variación en  $\delta$  en el intervalo precedente.  $P_a$  es calculada al comienzo de cada nuevo intervalo y se desarrolla la solución hasta ser obtenido los suficientes puntos para poder graficar la curva de oscilación, teniendo una mayor exactitud cuando el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es menor. Se pueden obtener resultados satisfactorios con un intervalo de tiempo de 0,05 segundos, por lo general.



Al ocurrir una perturbación se da una discontinuidad en  $P_a$ , el cual tiene un valor igual a cero previo a la falla y un valor distinto a cero posterior a la falla. La discontinuidad se da al comienzo del intervalo cuando  $t = 0$ . Se puede observar en la figura 13, que el método desarrollado en este apartado supone que  $P_a$  calculada al inicio del intervalo es constante desde la mitad del intervalo precedente hasta la mitad del intervalo a considerar. Ocurrida la perturbación, se dan dos valores para  $P_a$  al inicio de un intervalo, tomando el promedio de esos dos valores como la potencia de aceleración constante.

Figura 13. Valores reales y supuestos de  $P_a$ ,  $\omega_r$ , y  $\delta$  en función de  $t$



Fuente: AGUIRRE CÁRDENAS, Christian Wladimir. *Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software PowerFactory 13.1 de DigSILENT*, p. 247.

### 2.7.7. Métodos de integración numérica

Al realizar estudios en la dinámica de SEP de cualquier tipo conlleva las ecuaciones obtenidas son del tipo diferencial, en las que para poder resolverlas y calcular el valor numérico de las mismas se emplean métodos de integración numérica<sup>8</sup>.

En estos métodos con fines de implementarlos a estos estudios, el eje del tiempo es dividido en intervalos de tamaño  $h$ , teniendo por lo general una ecuación diferencial dada de la siguiente forma:

$$\frac{du}{dt} = f(t, t) \quad \text{Ec. 56}$$

$$u(t_0) = u_0 \quad \text{Ec. 57}$$

En donde  $u$ , será el valor de la variable a buscar por medio del método numérico a emplear y  $t$ , es el tiempo total empleado en el análisis. Como lo indica la ecuación 57, el valor de  $u$  para un tiempo igual a cero será  $u_0$ , por lo que el propósito del método de integración a utilizar será, el de buscar los valores de  $u_1$ ,  $u_2$  correspondiente a valores tales como  $t_0 + h$ ,  $t_0 + 2h$ , y seguir así hasta un dar con un valor de  $u$  correspondiente a una  $t_{final}$ .

A continuación, se presentan dos diferentes métodos de integración numérica empleados en la resolución de ecuaciones diferenciales algebraicas que describen el comportamiento de las unidades generadoras de un SEP durante un estudio de estabilidad.

---

<sup>8</sup> GÓMEZ CH., Ana M. *Herramienta computacional para el análisis de estabilidad transitoria en sistemas multimáquina*. p. 64.

### 2.7.7.1. Método de Euler

Una ecuación diferencial como la presentada en la ecuación 56, puede estimarse su valor de la siguiente iteración, empleando el *método de integración numérica de Euler*, dado por la siguiente ecuación:

$$u_{n+1} = u_n + hf(u_n, t_n) \quad \text{Ec. 58}$$

Utilizando la anterior ecuación, se procede iterativamente hasta obtener el tiempo máximo de simulación y con esto, obtener el valor final de la variable  $u$  correspondiente. Este método es de primer orden, dado que el error de aproximación de la solución discretizada es proporcional al tamaño de paso y el punto queda expresado en función del paso, lo que hace a este método del tipo explícito. El tamaño de este paso idealmente debe de ser muy pequeño, para que la aproximación realizada a través de este método sea precisa.

El fenómeno de propagación de error, en el que los errores de aproximación de los primeros pasos del método se hacen más grandes con cada nuevo paso, lo cual es el principal problema del método de integración numérica de Euler, produciendo así, una solución inestable. Si la solución real es de por sí inestable, es normal la presencia de propagación de error. No obstante, si la solución real es estable y se presenta dicha propagación, pueden malinterpretarse completamente los resultados al clasificar como inestable una solución que en realidad es estable. Por tal razón, la necesidad de utilizar tamaños pequeños de paso y con esto reducir la propagación de error.

### 2.7.7.2. Método de Runge-Kutta de cuarto orden

Este en realidad es un conjunto de métodos con n número de órdenes, que para propósitos de estudios de estabilidad se le presentara mayor énfasis al *método de Runge-Kutta de cuarto orden RK4*, que para ecuaciones diferenciales como la presentado en la ecuación 56, puede emplearse dicho método para encontrar el valor de la siguiente iteración. Este método está dado por la siguiente expresión:

$$u_{n+1} = u_n + \frac{h}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad \text{Ec. 59}$$

Estando definidos los términos  $k_1, k_2, k_3$  y  $k_4$  por las siguientes expresiones:

$$k_1 = hf(u_n, t_n) \quad \text{Ec. 60}$$

$$k_2 = hf\left(u_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad \text{Ec. 61}$$

$$k_3 = hf\left(u_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad \text{Ec. 62}$$

$$k_4 = hf(u_n + k_3, t_n + h) \quad \text{Ec. 63}$$

Siendo el siguiente valor  $u_{n+1}$  determinado por el valor presente  $u_n$  adicionando el producto del tamaño del intervalo  $h$  y una pendiente estimada  $k_i$ . Esta pendiente estimada  $k_i$  no es más que, el promedio ponderado de las pendientes, donde  $k_1$  es la pendiente al principio del intervalo,  $k_2$  la pendiente en el punto medio, empleando  $k_1$  para determinar el valor de  $u$  en el punto  $t_n + h/2$  utilizando Euler.  $k_3$  sería de nuevo la pendiente en el punto medio, pero ahora

utilizando  $k_2$  para determinar el valor de  $u$  y  $k_4$  es la pendiente al final del intervalo, con el valor de  $u$  determinado por  $k_3$ . El error de aproximación de la solución discretizada para este método es proporcional a cuatro veces el tamaño de paso, razón por la que dicho método es de cuarto orden.

### **2.7.8. Métodos y mecanismos para mejorar la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia**

Los mecanismos para un mejoramiento de estabilidad en un SEP son clasificados de acuerdo con el estado en que el sistema se encuentre, siendo el estado estable y el estado dinámico por los que tendrá que atravesar.

Para un SEP en estado estable se tienen los siguientes:

- La tensión de la red de transporte y la tensión interna del generador. Esto porque, cuanto mayores son estas tensiones, mayor es la sinusoide que representa la potencia vertida después del fallo y más estable es el caso.
- Disminuir la reactancia utilizando circuitos en paralelo en líneas de transmisión y transformadores.
- Instalar centrales de generación cerca de la carga, disminuyendo así el ángulo del rotor  $\delta$ .

Para un SEP en estado dinámico aplican los siguientes puntos:

- La selectividad de las protecciones: cuanto mayor es, mayor es la sinusoide que representa la potencia vertida después del fallo y más estable es el caso<sup>9</sup>, entre los que aplican lo siguiente:

---

<sup>9</sup> GONZALEZ FLORES, Ebelio Prisciliano. *Fundamentos en la aplicación de relevadores de protección en sistemas eléctricos de potencia*. p 8.

- Instalar disyuntores de alta velocidad
  - Instalar relés de distancia de alta velocidad
  - Instalar relés y disyuntores monopolares
  - Instalar relés de bajo voltaje
  - Instalar reconectores tripolares o monopolares
- 
- Discriminar oscilaciones de potencia entre áreas.
  - Seccionar cargas con relés de baja frecuencia.
  - Instalar y calibrar relés de baja frecuencia y velocidad en centrales de generación.
  - Trabajar a velocidades dentro del rango de operación.
  - Operar a generadores sobreexcitados.
  - Instalar sistemas de regulación de velocidad, incluyendo válvulas rápidas y servomotores.
  - Tener una realimentación de voltaje terminal, como parte de la fuente del regulador de voltaje.
  - La inercia del generador, cuanto mayor es menos se acelera la máquina, y este regresa a su estado estable en menos tiempo.



### 3. EJERCICIOS DE APLICACIÓN

#### 3.1. Ejercicios aplicando la ecuación de oscilación

A continuación, se presenta un problema del tema de la ecuación de oscilación para así poder facilitar su comprensión.

##### 3.1.1. Problema 1

Un turbogenerador de 4 polos, 60 Hz, con valores nominales de 500 MVA y 22 kV, tiene una constante de inercia  $H = 7,5$  MJ/MVA. Encontrar:

- La energía cinética almacenada en el rotor a velocidad síncrona.
- La aceleración angular si la potencia eléctrica desarrollada es de 400 MW, cuando la potencia de entrada menos las pérdidas rotacionales dan 740 000 HP.

*Resolución:*

La energía cinética almacenada, se puede calcular utilizando los datos de la constante de inercia  $H$  y la potencia aparente que da el problema.

$$E_k = \left(7,5 \frac{MJ}{MVA}\right) \cdot (500 MVA) = 3\,750 MJ$$

Teniendo la potencia de entrada, considerando las pérdidas rotaciones de 740 000 HP y haciendo la conversión a Watts, se obtiene la potencia mecánica.



$$P_m = (740\,000 \text{ HP}) \cdot \left(746 \frac{\text{W}}{1 \text{ HP}}\right) = 552 \text{ MW}$$

Restándole a  $P_m$  la  $P_e$  dada por el problema y dividiéndolo por el valor base de 500 MVA, se obtiene la potencia de aceleración en valores por unidad.

$$P_a = \frac{552 \text{ MW} - 400 \text{ MW}}{500 \text{ MVA}} = 0,304 \text{ pu}$$

Calculando la velocidad angular  $\omega_s$  y considerando que el turbogenerador es de 4 polos (2 pares de polos) se obtiene lo siguiente:

$$\omega_s = \frac{\omega_0}{P} = \frac{2\pi f}{2} = \pi f$$

$$\omega_s = 60\pi \text{ rad/s}$$

Utilizando la ecuación de oscilación (Ec. 12) y sustituyendo.

$$\frac{2H d^2 \delta}{\omega_s dt^2} = P_a$$

$$\frac{2 \left(7,5 \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}}\right) d^2 \delta}{(60\pi \text{ rad/s}) dt^2} = 0,304 \text{ pu}$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 3,82 \text{ rad/s}^2$$

### 3.2. Ejercicios aplicando la ecuación potencia-ángulo

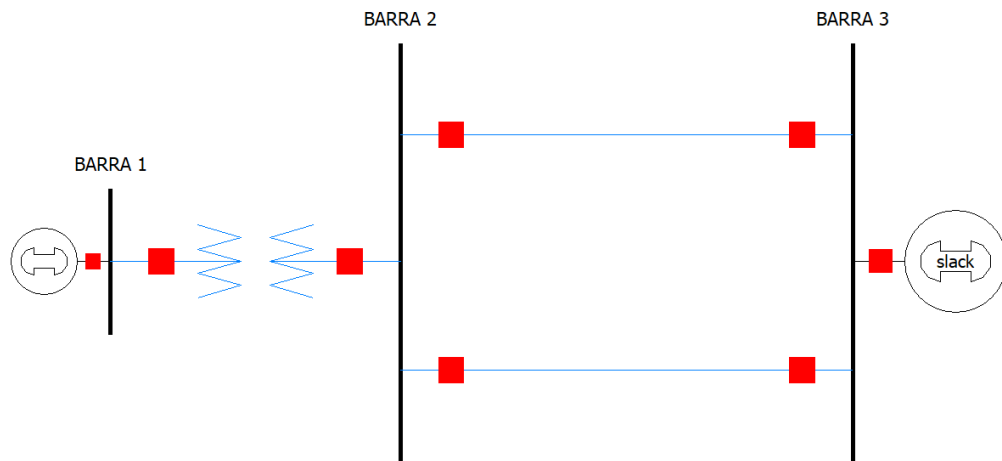
A continuación, se presentan dos problemas del tema de la ecuación de potencia-ángulo para así poder facilitar su comprensión.

### 3.2.1. Problema 1

Un generador síncrono con reactancia transitoria de  $j0,2$  pu el cual suministra una potencia de  $0,8$  pu cuando el voltaje en terminales de la máquina y el de la barra infinita son  $1,0$  pu. Con el siguiente diagrama de reactancias:

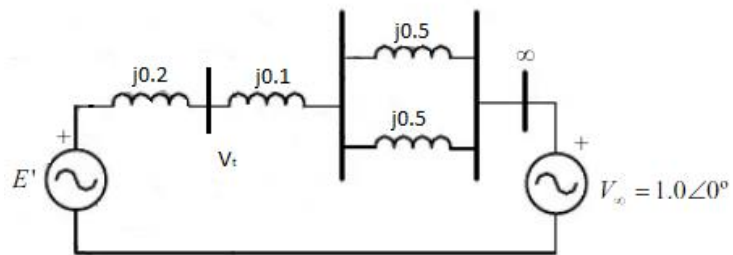
Con el siguiente sistema eléctrico de potencia:

Figura 14. **SEP problema 1, ecuación potencia-ángulo**



Fuente: elaboración propia

Figura 15. **Diagrama de reactancias problema 1, ecuación potencia-ángulo**



Fuente: elaboración propia

Determinar la ecuación potencia-ángulo para el sistema durante las condiciones de operación dadas.

- Resolución:

Se puede encontrar el valor de la reactancia equivalente entre  $V_t$  y  $V_\infty$ .

$$X_{V_t-V_\infty} = j0,1 + \frac{j0,5}{2} = j0,35 = 0,35 \angle 90^\circ pu$$

El mismo problema, da la magnitud del voltaje en terminales, más no el ángulo correspondiente a dicha magnitud, este puede encontrarse utilizando el dato de la potencia suministrada.

$$0,8 = \frac{1,0 \times 1,0}{0,35} \sin \alpha$$

$$\alpha = 16,26^\circ$$

Con lo anterior es posible encontrar el valor de la corriente que entrega el generador a la barra infinita.

$$I = \frac{1,0 \angle 16,26^\circ - 1,0 \angle 0^\circ}{0,35 \angle 90^\circ}$$

$$I = 0,808 \angle 8,13^\circ pu = 0,8 + j0,1143 pu$$

Por lo que el voltaje interno de la máquina se puede calcular multiplicando la corriente por su reactancia transitoria y sumando la caída de voltaje en sus terminales.

$$E' = 1,0 \angle 16,26 + (0,808 \angle 8,13)(0,2 \angle 90^\circ)$$

$$E' = 1,0352 \angle 25,15^\circ pu$$

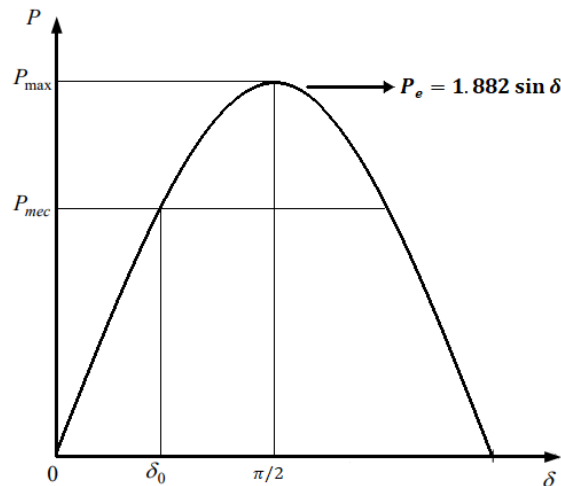
De tal manera que la ecuación y su curva potencia-ángulo característica del SEP para las condiciones especificadas queda de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{|V_\infty||E'|}{X_{V_g-v_\infty}} \sin \delta$$

$$P_e = \frac{1,0352 \times 1,0}{0,35 + 0,2} \sin \delta$$

$$P_e = 1,882 \sin \delta \text{ pu}$$

Figura 16. **Curva potencia-ángulo problema 1, ecuación potencia-ángulo**



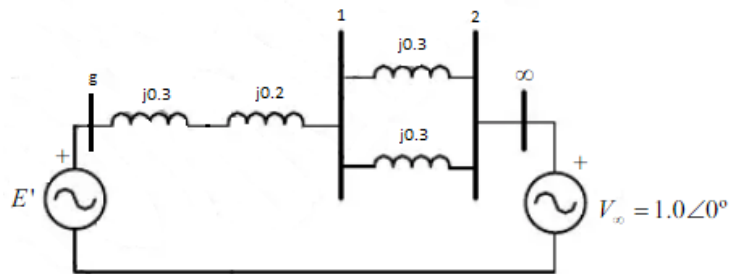
Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Problema 2

Un SEP similar al del problema 1 de este apartado, el cual tiene un generador síncrono, de rotor liso 60 Hz, con una constante de inercia  $H = 9,94 \text{ MJ/MVA}$ , y una reactancia transitoria de  $0,3 \text{ pu}$ . El mismo está conectado a una barra de potencia infinita por medio de un sistema de transmisión puramente reactivo. Este generador entrega a la barra de potencia infinita una potencia  $P = 0,6 \text{ pu}$ , con un factor de potencia de  $0,8$  a la barra de potencia infinita, la cual

tiene un voltaje de 1,0 pu. Determinar la ecuación característica potencia-ángulo para este sistema, en el que su diagrama de reactancias equivalentes es el siguiente:

Figura 17. **Diagrama de reactancias problema 2, ecuación potencia-ángulo**



Fuente: elaboración propia con datos para este SEP a partir de GONZALEZ-LONGATT, Francisco M. *Estabilidad en Sistemas de Potencia*, Capítulo II, p. 2.

- Resolución:

Se determina la reactancia equivalente de todo el SEP en base a diagrama de reactancias.

$$X_{V_g - V_{\infty}} = j0,3 + j0,2 + \frac{j0,3}{2} = j0,65 = 0,65 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

Para la ecuación característica potencia-ángulo de este SEP, es necesario encontrar el voltaje interno del generador, el cual se encuentra a partir de la corriente que pasa a través de él, esta es posible determinarla con los datos de potencia dados por el problema.

$$0,6 = S \times 0,8; \theta = \cos^{-1}(0,8)$$

$$S = 0,75 \angle 36,86^\circ \text{ pu}$$

Con esto es posible determinar la corriente del SEP:

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0,75 \angle -36,86^\circ}{1,0 \angle 0^\circ} = 0,75 \angle -36,86^\circ \text{ pu}$$

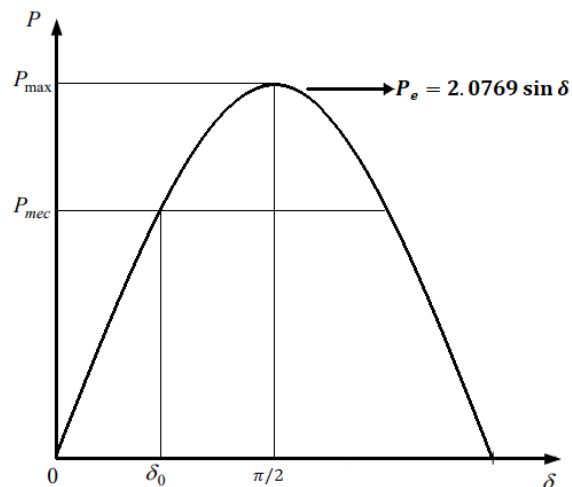
En base a los datos anteriores, ahora si es posible calcular el voltaje interno del generador, multiplicando esta corriente por la reactancia equivalente y sumándole la caída de voltaje en la barra infinita.

$$E' = V + jX_{V_g-V_\infty} I = 1 \angle 0^\circ + j(0,65)(0,75 \angle -36,86^\circ) = 1,35 \angle 16,79^\circ \text{ pu}$$

Por lo que la ecuación y curva característica de potencia-ángulo queda de la siguiente forma:

$$P_e = \frac{|V_\infty||E'|}{X_{V_g-V_\infty}} \sin \delta = \frac{1,0 \times 1,35}{0,65} \sin \delta = 2,0769 \sin \delta \text{ pu}$$

Figura 18. **Curva potencia-ángulo problema 2, ecuación potencia-ángulo**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Ejercicios aplicando el criterio de áreas iguales

A continuación, se presentan dos problemas para el tema del criterio de áreas iguales para así poder facilitar su comprensión.

#### 3.3.1. Problema 1

Un generador con una constante de inercia  $H = 6,0$  MJ/MVA está suministrando una potencia de 1,0 pu a una barra infinita por medio de una red puramente reactiva, cuando una falla reduce a cero la potencia de salida del generador; la potencia máxima que se puede suministrar es de 2,5 pu.

Al ser liberada la falla, se dan las condiciones iniciales de la red nuevamente. Determinar el ángulo crítico de libramiento y el tiempo crítico de libramiento.

- Resolución:

Es posible encontrar el ángulo inicial  $\delta_0$  a partir de las condiciones dadas por el problema.

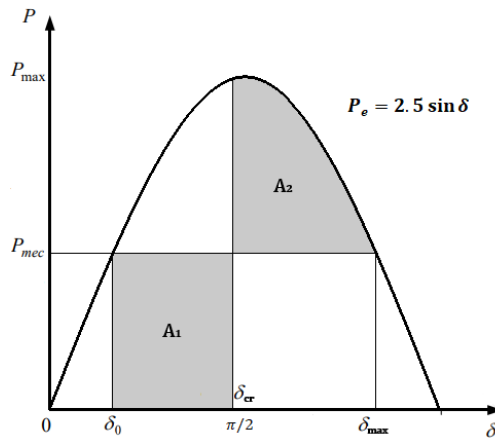
$$\begin{aligned}P_e &= P_{m\acute{a}x} \sin \delta_0 \\1,0 &= 2,5 \sin \delta_0 \\ \delta_0 &= \sin^{-1} \left( \frac{1,0}{2,5} \right) = 23,58^\circ = 0,4115 \text{ rad}\end{aligned}$$

Para este caso, dado que la potencia eléctrica vuelve a ser la misma al despejarse la falla, el  $\delta_{max}$  en donde se vuelve a igualar la potencia mecánica con la potencia eléctrica será en:

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \text{ rad}$$

Esto se entiende mejor, al analizar su curva potencia-ángulo correspondiente:

Figura 19. **Curva potencia-ángulo para el problema 1, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Por lo que, aplicando el criterio de áreas iguales y que el SEP vuela a ser estable, es posible determinar el ángulo crítico, de la siguiente manera:

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0=0.4115}^{\delta_{cr}} (P_m) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}=\pi-0.4115} (P_{m\acute{a}x} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$P_m(\delta_{cr} - 0,4115) = P_{m\acute{a}x}(\cos \delta_{cr} - \cos[\pi - 0,4115]) - P_m([\pi - 0,4115] - \delta_{cr})$$

Sin embargo, teniendo en cuenta la siguiente igualdad, justo al momento de la falla:

$$P_m = P_{m\acute{a}x} \sin \delta_0$$



Sustituyendo esta consideración en la igualdad de las áreas y despejando  $\delta_{cr}$ , se obtiene prácticamente, la ecuación 45 desarrollada en el capítulo anterior y con esto, el valor de este ángulo crítico muy cercano a  $\pi/2$ , tal como se muestra en la gráfica 19.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2 \times 0,4115) \sin(0,4115) - \cos(0,4115)]$$

$$\delta_{cr} = 1,560 \text{ rad} = 89,37^\circ$$

Ahora bien, aplicando la ecuación 47 desarrollada en el capítulo anterior y sustituyendo valores, puede determinarse el tiempo crítico de libramiento de la falla.

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

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4 \times 6,0 \times (1,560 - 0,4115)}{2\pi \times 60 \times 1,0}}$$

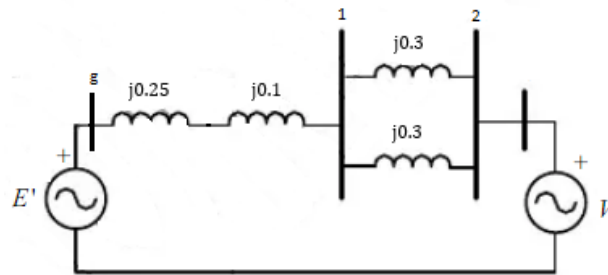
$$t_{cr} = 0,2716 \text{ s}$$

Siendo este, el tiempo máximo que debe de transcurrir desde el inicio de la falla hasta su aislamiento, para que el SEP regrese a ser transitoriamente estable.

### 3.3.2. Problema 2

Un generador síncrono con una constante de inercia  $H = 2,0$  MJ/MVA, conectado al sistema por medio de un transformador. Suministra una potencia de 1,0 pu, cuando el voltaje interno de la máquina es 1,02 pu y el de la barra es 1,01 pu. Con el siguiente diagrama de reactancias:

Figura 20. **Diagrama de reactancias problema 2, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

En el que se da una falla trifásica al inicio de una de las líneas de transmisión, la cual es liberada con su apertura. Determinar ángulo y tiempo crítico de liberación de la falla para los siguiente dos casos:

La línea permanece abierta.

La línea vuelve a cerrar.

- Resolución:

Para el primer caso

- Antes de la falla

Se determina la reactancia equivalente de todo el SEP en base a diagrama de reactancias.

$$X_{Vg-V\infty} = j0,25 + j0,1 + \frac{j0,3}{2}$$

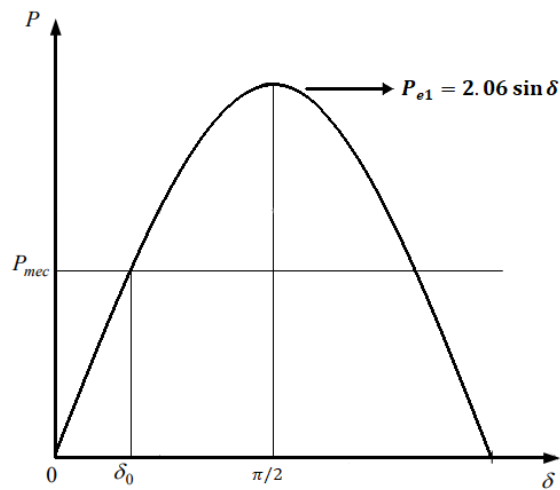
$$X_{Vg-V\infty} = j0,5 = 0,5 \angle 90^\circ pu$$

Por lo que la ecuación y curva característica de potencia-ángulo queda de la siguiente forma:

$$P_{e1} = \frac{1,01 \times 1,02}{0,5} \sin \delta$$

$$P_{e1} = 2,060 \sin \delta \text{ pu}$$

Figura 21. **Curva potencia-ángulo problema 2, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Es posible determinar el ángulo inicial  $\delta_0$ , a partir del momento justo cuando ocurre la falla en que la potencia mecánica es igual a la potencia eléctrica.

$$1,0 = 2,060 \sin \delta_0$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left( \frac{1,0}{2,060} \right)$$

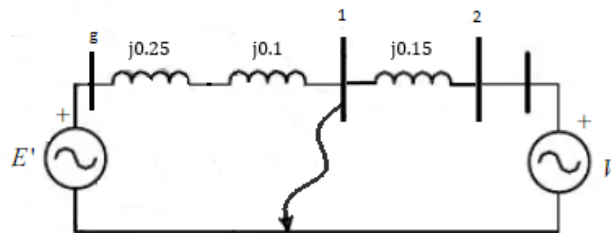
$$\delta_0 = 29,03^\circ = 0,5067 \text{ rad}$$

- Durante la falla

Al darse la falla al inicio de una de las líneas, el valor de la reactancia equivalente del SEP es muy grande, provocando con esto que la potencia

eléctrica sea cero, esto se entiende mejor analizando el siguiente diagrama de reactancias, durante este evento.

Figura 22. **Diagrama de reactancias durante la falla problema 2, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Para determinar la reactancia equivalente entre el generador y la barra, es necesario aplicar una conversión estrella-delta.

$$X_{V_g-V_\infty} = \frac{(j0,35)(0) + (j0,15)(0) + (j0,35)(j0,15)}{0} = \infty$$

Comprobando así, que dicha reactancia equivalente tendría un valor muy grande, provocando que la potencia eléctrica durante el evento sea cero.

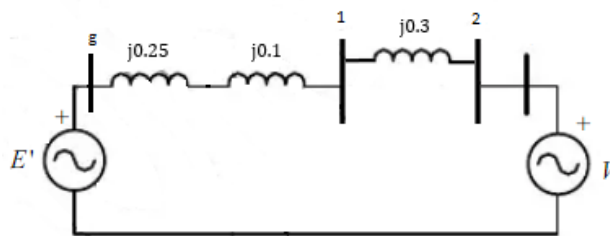
$$P_{e2} = \frac{1,01 \times 1,02}{\infty} \sin \delta = 0$$

- Después de la falla

Para este caso, al liberar la falla la línea afectada permanece abierta. Esto provoca que la reactancia equivalente entre el generador y la barra sea mayor,

teniendo esto un impacto directo en la potencia eléctrica, como ya se ha visto, reduciendo el valor máximo de dicha potencia. Esto se entiende mejor analizando el siguiente diagrama de reactancias:

Figura 23. **Diagrama de reactancias después de la falla problema 2a, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Por lo que la reactancia equivalente posterior a la falla para este caso es:

$$X_{Vg-V\infty} = j0,25 + j0,1 + j0,3$$

$$X_{Vg-V\infty} = j0,65 = 0,65 \angle 90^\circ pu$$

Por lo que la ecuación potencia-ángulo queda expresada de la siguiente manera:

$$P_{e3} = \frac{1,01 \times 1,02}{0,65} \sin \delta$$

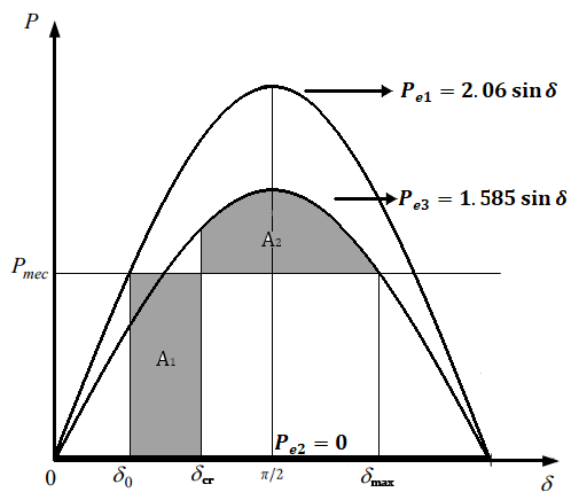
$$P_{e3} = 1,585 \sin \delta pu$$

El  $\delta_{max}$  en donde se vuelve a igualar la potencia mecánica con esta nueva potencia eléctrica es:

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_{e3} \\
 1,0 &= 1,585 \sin \delta_{max} \\
 \delta_{max} &= \pi - \sin^{-1} \left( \frac{1,0}{1,585} \right) \\
 \delta_{max} &= \pi - 0,6827 = 2,459 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

Lo anterior se entiende mejor al ver la siguiente curva potencia-ángulo para las condiciones dadas.

Figura 24. **Curva potencia-ángulo después de la falla problema 2a, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Aplicando el criterio de áreas iguales, se puede determinar el ángulo crítico  $\delta_{cr}$  para librar la falla bajo estas condiciones.

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (1,0)d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (1,585 \sin \delta - 1,0)d\delta$$

$$\delta_{cr} - \delta_0 = -1,585 \cos \delta_{max} + 1,585 \cos \delta_{cr} - \delta_{max} + \delta_{cr}$$

$$1,585 \cos \delta_{max} + \delta_{max} - \delta_0 = 1,585 \cos \delta_{cr}$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left( \frac{1,585 \cos \delta_{max} + \delta_{max} - \delta_0}{1,585} \right)$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left( \frac{1,585 \cos 2,459 + 2,459 - 0,5067}{1,585} \right)$$

$$\delta_{cr} = 1,098 \text{ rad} = 62,88^\circ$$

Aplicando la ecuación 47 desarrollada en el capítulo anterior y sustituyendo valores, puede determinarse el tiempo crítico de libramiento de la falla.

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

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4 \times 2,0 \times (1,098 - 0,5067)}{2\pi \times 60 \times 1,0}}$$

$$t_{cr} = 0,1118 \text{ s}$$

Para el segundo caso.

El análisis antes y durante falla es prácticamente el mismo que para el caso anterior.

Es decir:

$$P_{e1} = 2,060 \sin \delta \text{ pu}$$

$$\delta_0 = 29,03^\circ = 0,5067 \text{ rad}$$

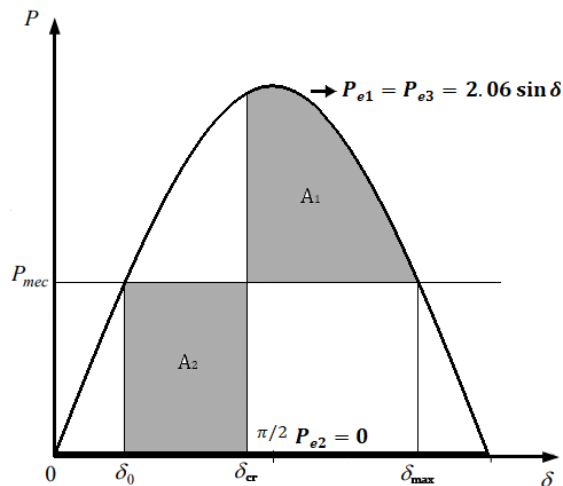
$$P_{e2} = 0$$

La diferencia que se tiene con este caso es que, al ser liberada la falla la línea afectada se vuelve a integrar al SEP. Es decir, el SEP regresa a sus condiciones iniciales; siendo el diagrama de reactancias después de la falla prácticamente el mismo que se tiene antes de la falla, provocando que la potencia eléctrica antes y después de la falla sea la misma.

$$P_{e1} = P_{e3} = 2,060 \sin \delta \text{ pu}$$

A partir de lo anterior, la curva característica potencia-ángulo para el caso en que la línea afectada vuelve a cerrar tras ser liberada la perturbación es la siguiente:

Figura 25. **Curva potencia-ángulo después de la falla problema 2b, criterio de áreas iguales**



Fuente: elaboración propia.

Al analizar la curva, se puede ver que el ángulo  $\delta_{max}$  en donde se iguala la potencia eléctrica con la potencia mecánica tras la falla es:



$$\begin{aligned}\delta_{max} &= \pi - \delta_0 \\ \delta_{max} &= \pi - 0,5067 \\ \delta_{max} &= 2,635 \text{ rad}\end{aligned}$$

Aplicando de nuevo el criterio de áreas iguales, se puede determinar el ángulo crítico  $\delta_{cr}$  para librar la falla bajo estas condiciones.

$$\begin{aligned}A_1 &= A_2 \\ \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (1,0)d\delta &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (2,060 \sin \delta - 1,0)d\delta \\ \delta_{cr} - \delta_0 &= -2,060 \cos \delta_{max} + 2,060 \cos \delta_{cr} - \delta_{max} + \delta_{cr} \\ 2,060 \cos \delta_{max} + \delta_{max} - \delta_0 &= 2,060 \cos \delta_{cr} \\ \delta_{cr} &= \cos^{-1} \left( \frac{2,060 \cos \delta_{max} + \delta_{max} - \delta_0}{2,060} \right) \\ \delta_{cr} &= \cos^{-1} \left( \frac{2,060 \cos 2,635 + 2,635 - 0,5067}{2,060} \right) \\ \delta_{cr} &= 1,411 \text{ rad} = 80,87^\circ\end{aligned}$$

Al igual que para el caso anterior, aplicando la ecuación 47 desarrollada en el capítulo anterior y sustituyendo valores, puede determinarse el tiempo crítico de libramiento de la falla para estas condiciones.

$$\begin{aligned}t_{cr} &= \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \\ t_{cr} &= \sqrt{\frac{4 \times 2,0 \times (1,411 - 0,5067)}{2\pi \times 60 \times 1,0}} \\ t_{cr} &= 0,1385 \text{ s}\end{aligned}$$

### 3.4. Ejercicios aplicando la solución por partes de la curva de oscilación

A continuación, se presentan un problema en el cual se aplicará la solución por partes de la curva de oscilación para así poder facilitar su comprensión.

#### 3.4.1. Problema 1

Un generador de 60 Hz y una constante de inercia  $H = 6$  MJ/MVA, suministra el 60 % de  $P_{m\acute{a}x}$  a una barra infinita por medio de una red reactiva, cuando ocurre una perturbación que incrementa la reactancia de la red entre el voltaje interno del generador y la barra infinita en 400 %. Al ser liberada la perturbación, la  $P_{m\acute{a}x}$  que es posible suministrar es del 80 %. Antes de la ocurrencia de la perturbación  $P_m$  tiene un valor de 1,0 pu.

Determinar el ángulo y tiempo crítico de libramiento para estas condiciones, considerando un  $\Delta t = 0,05$ .

- Resolución:

Con los datos que se dan previos a la perturbación es posible determinar el ángulo inicial de operación.

$$P_{m\acute{a}x} \sin \delta_0 = 0,6P_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} 0,6$$

$$\delta_0 = 36,87^\circ = 0,6435 \text{ rad}$$

Al darse la falla la reactancia equivalente aumenta un 400 %, es decir 4 veces más su valor original, siendo este inversamente proporcional a la potencia,

provocará que la misma se reduzca a  $\frac{1}{4}$  de su valor pre-falla, por lo que el valor del factor  $r_1$  será:

$$r_1 = 0,25$$

Posterior a la falla el problema nos indica que la potencia será de un 80% de su valor original, dando como resultado un factor  $r_2$  de:

$$r_2 = 0,8$$

Determinar el ángulo de máxima oscilación  $\delta_{m\acute{a}x}$ , es posible sabiendo que es el ángulo en el que la  $P_e$  y  $P_m$  vuelven a ser iguales tras la liberación de la falla.

$$0,6P_{m\acute{a}x} = 0,8P_{m\acute{a}x} \sin \delta_{m\acute{a}x}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \sin^{-1} \left( \frac{0,6}{0,8} \right)$$

Sin embargo, al ver la gráfica en la figura 11 en el capítulo anterior, es de notar que estas dos potencias se intersectan en dos puntos para la curva post-falla; siendo el segundo punto de intersección el de interés, por lo que:

$$\delta_{m\acute{a}x} = 180^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{0,6}{0,8} \right)$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 131,41^\circ = 2,294 \text{ rad}$$

Con los datos anteriores, aplicando la ecuación 47 y sustituyendo, se encuentra el ángulo crítico.

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left( \frac{0,6(2,294 - 0,6435) + 0,8 \cos(2,294) - 0,25 \cos(0,6435)}{0,8 - 0,25} \right)$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} 0,475$$

$$\delta_{cr} = 61,64^\circ$$

Para encontrar el tiempo crítico para este caso es necesario aplicar el método paso a paso o método por partes de la curva de oscilación; para lo cual, es necesario los datos de la  $P_e$  durante la falla, el cual se obtiene a partir de la igualdad de  $P_m$  y  $P_e$  antes de la falla.

$$1,0 = 0,6P_{m\acute{a}x}$$

$$P_{m\acute{a}x} = 1,667 pu$$

Posteriormente sabiendo que, durante la falla el valor máximo de  $P_e$  se reduce a  $\frac{1}{4}$ , debido al aumento de la reactancia equivalente.

$$P_{e\acute{m}\acute{a}x} = 0,4167 pu$$

Con los datos de la constante de inercia, frecuencia y una  $\Delta t = 0.05$ , se encuentra la constante  $k$  aplicando la ecuación 52.

$$k = \frac{180 \times 60}{6} \times (0,05)^2 = 4,5$$

A partir de lo calculado, aplicando la ecuación 54 y utilizando Excel, es posible determinar los datos posteriores para los siguientes cambios de tiempo, los cuales fueron tabulados en la siguiente tabla:

Tabla I. **Cálculo de la curva de oscilación**

t	Pe	Pa	kPa	$\Delta\delta_n$	$\delta_n$
0-	1	0	-	-	36,870
0+	0,250	0,750	-	-	36,870
0 av	-	0,375	1,688	-	36,870
-	-	-	-	1,688	-
0,05	0,260	0,740	3,331	-	38,558
-	-	-	-	5,019	-
0,10	0,287	0,713	3,207	-	43,577
-	-	-	-	8,226	-
0,15	0,327	0,673	3,026	-	51,803
-	-	-	--	11,252	-
0,20	0,371	0,629	2,828	-	63,055
-	-	-	-	14,081	-

Fuente: elaboración propia.

Donde las primeras dos filas corresponden a los datos inmediatos antes y después de la perturbación. La tercera fila, corresponde al promedio de la potencia de aceleración de los primeros dos datos, para luego multiplicarlo por la constante  $k$  calculada. Aplicando la ecuación 53 se encuentra el cambio del ángulo del rotor, tabulado en cuarta fila y quinta columna.

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

$$\Delta\delta_n = 0 + 1,688 = 1,688$$

Este cambio se suma al dato del ángulo del rotor durante la falla, obteniendo así el dato de este ángulo para un cambio de tiempo de 0,05 y con el mismo obtener los otros datos para la quinta fila tabulada, el resto se completó utilizando Excel como ya se mencionó.

Como se puede observar para un tiempo de 0,20 segundos, el ángulo obtenido es mayor al ángulo crítico, si la perturbación se librara en ese tiempo, el

generador no recuperaría el sincronismo con el SEP. Por lo tanto, el tiempo crítico  $t_c$  se encontrará entre 0,15 y 0,20 segundos. Para calcularlo se hace por medio de interpolación lineal de la siguiente manera:

$$t_c = 0,15 + 0,05 \left( \frac{61,64 - 51,81}{63,05 - 51,81} \right)$$

$$t_c = 0,194 \text{ s}$$



## **4. SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA MEDIANTE POWERWORLD**

La ingeniería al ser una disciplina amplia y tener un fuerte vínculo con la capacidad de modelar sistemas, debe de disponer un conjunto de herramientas de modelado y simulación. Ahora bien, el análisis de sistemas de potencia no es la excepción a lo anterior, existiendo una amplia oferta de software para la simulación de estos sistemas.

Estos softwares de simulación poseen cierto costo, los cuales pueden ser relativamente altos. Sin embargo, algunos brindan versiones gratuitas para ser utilizados con fines educativos, estas versiones ofrecen la mayoría de los paquetes y herramientas, con ciertas restricciones, que sus versiones comerciales brindan.

Para el presente trabajo de estudio se hará uso del software PowerWorld Simulator en su versión 21, en el que se podrá comprender el comportamiento de las variables eléctricas que se ven afectadas tras haber ocurrido una perturbación en un SEP; siendo las de mayor interés para la estabilidad transitoria, el ángulo del rotor y la potencia eléctrica generada, entre otras. Al ser una versión gratuita, cuenta con su respectivo manual y la información necesaria para aprender a usarlo de manera más detallada.

### **4.1. PowerWorld Simulator**

Este es un software desarrollado por PowerWorld Corporation, brindado gratuitamente en una versión para fines educativos. Cuenta con una interfaz



gráfica no compleja, permitiendo un uso relativamente intuitivo; esta versión permite simular sistemas de potencia de hasta 13 barras, importar, exportar, guardar, así como la edición de diagramas unifilares y bases de datos, permitiendo un uso de tiempo ilimitado, incluyendo la mayoría de sus herramientas disponibles que su versión comercial dispone.

#### **4.1.1. Descarga e instalación**

Desde el sitio web de PowerWorld Corporation ([www.powerworld.com](http://www.powerworld.com)), se puede descargar la última versión del software, seleccionando la pestaña *Download & Purchase*, en donde se desplegará la versión disponible, en donde al seleccionarla, este pide completar un formulario de Google con ciertos datos como el nombre, apellido y dirección de correo. Una vez completado y enviado el formulario, se enviará al correo ingresado al formulario, un enlace en el cual se podrá descargar el instalador del software. Terminada la descarga y al ser ejecutado el archivo, comenzará la instalación; en donde siguiendo unas simples instrucciones, el programa se instalará automáticamente.

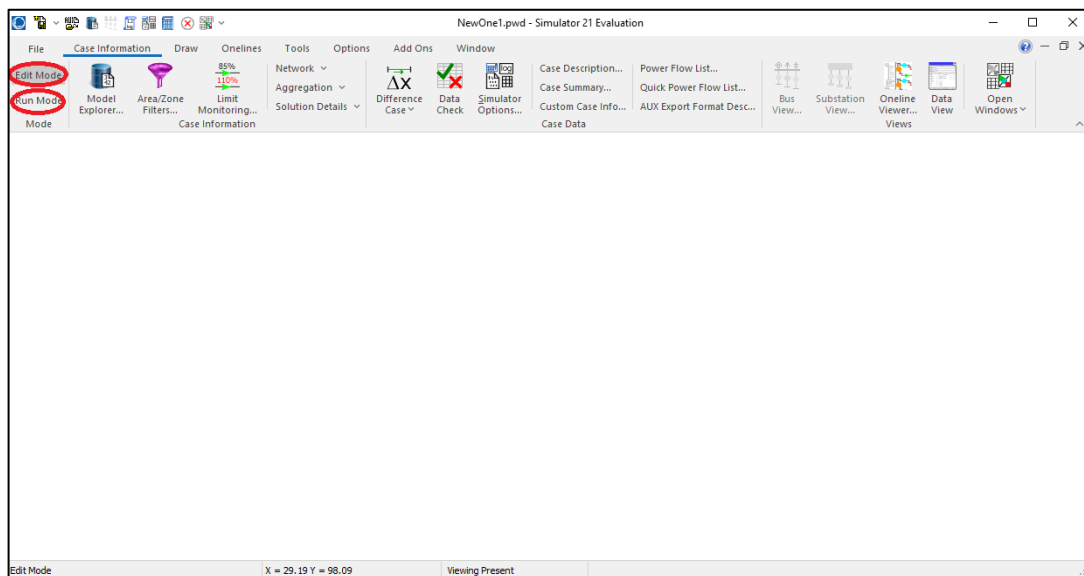
#### **4.1.2. Manual de usuario**

La capacidad de cada usuario al utilizar el software, como en cualquier ámbito, depende del interés que se tenga en el tema; para esto, el manual de usuario ayuda en el aprendizaje y uso del simulador. Existen dos versiones disponibles de este manual, uno de manera local en el computador tras haber instalado el software y la otra, en su versión web publicada en el sitio de PowerWorld Corporation (<https://www.powerworld.com/WebHelp/>).

### 4.1.3. Interfaz gráfica

Las herramientas disponibles en la interfaz gráfica de este simulador son demasiadas, esto dependiendo del caso a estudiar en un SEP. Principalmente los modos de trabajo a utilizar en este software serán dos; el *Edit Mode*, siendo este como su nombre lo indica, un modo en el que se pueden editar datos y elementos que componen un SEP, y el *Run Mode*, en donde se correrá la simulación del caso deseado ya con los datos correspondientes del sistema.

Figura 26. Interfaz gráfica PowerWorld Simulator



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

## 4.2. Consideraciones técnicas en los estudios de estabilidad transitoria

Para los estudios de estabilidad transitoria, existen ciertas consideraciones, criterios y demás factores a tener presentes durante la realización de estos. La razón de lo anterior es debido, a que se emplean modelos dinámicos,



El resto de los modelos como el del gobernador y estabilizador de las unidades generadoras, los especifica por lo general el fabricante. Modelos dinámicos de otros elementos y equivalentes de red que también se utilizan, dependerán en su gran mayoría de los requerimientos de los estudios a realizar. En la realidad son extensas las consideraciones a tomar en cuenta para cada elemento que compone un sistema eléctrico de potencia. Siendo este trabajo de estudio realizado con fines académicos, para el resto de elemento como las líneas y transformadores solamente se tomará en cuenta el valor de la reactancia, y el nivel de voltaje para las barras.

Es importante aclarar que, las barras infinitas no existen y salvo para casos académicos, no debe de considerarse así. La labor de una barra infinita es mantener fija su frecuencia, siendo un marco de referencia conveniente para los ángulos de las otras máquinas; sin esta barra, la frecuencia del sistema se desvía de su valor nominal en todas las barras que componen sistema eléctrico de potencia.

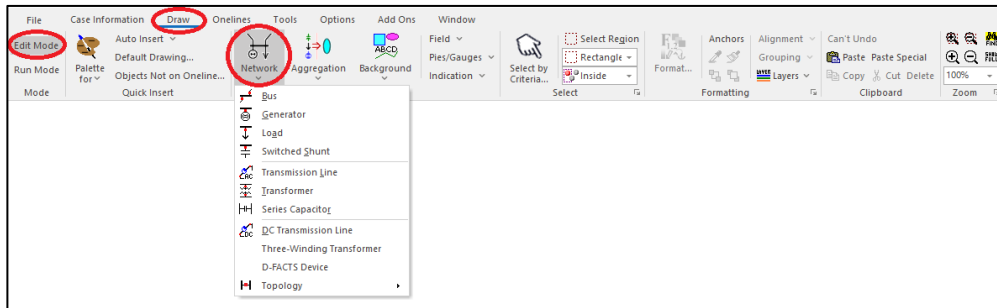
#### **4.3. Diseño del ejercicio de aplicación**

El manual de usuario en su versión web, mencionado en el numeral 4.1.2. del presente trabajo de estudio, existe una unidad llamada *Creating, Loading, and Saving Simulator Cases*, la cual contiene toda la información necesaria sobre cómo crear, cargar y guardar distintos escenarios a simular. De igual forma, existe una unidad llamada *Building and Editing Online Diagrams*, esta contiene información acerca de las herramientas de creación y edición de diagramas unifilares y los distintos elementos que lo componen.

Una vez dentro del software y seleccionado el *Edit Mode*, se puede acceder a las herramientas de dibujo seleccionando la pestaña *Draw* y posteriormente

*Network*, que desplegará los distintos elementos con los cuales se creará el sistema de eléctrico de potencia.

Figura 28. **Herramientas de creación y edición**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Se empezará insertando el primer bus, el cual al seleccionar se desplegará una ventana emergente, en donde se ingresará el nivel de voltaje y en la pestaña *Display*, en esta puede cambiarse la orientación, forma y tamaño.

Se crean 4 barras con los siguientes niveles de voltaje:

Tabla II. **Datos de las barras**

NO. DE BARRA	NIVEL DE VOLTAJE (KV)
1	13,8
2	69,0
3	69,0
4	69,0

Fuente: elaboración propia.

De la misma forma se insertan los generadores, en donde al seleccionarlo se despliega su ventana correspondiente, de igual forma que con los buses se

puede modificar tamaño, forma, y orientación; así como, modificar datos de potencia base, nominal y reactancias.

Para este caso simplemente se tomarán en cuenta los siguientes datos para el generador:

Tabla III. **Datos del generador**

POTENCIA	VALOR
Nominal (MW)	42,5
Base (MVA)	50,0

Fuente: elaboración propia.

Entre la barra 1 y 2 se inserta un transformador, el procedimiento es el mismo realizado a los anteriores, *Network > Transformer* y seleccionando ambas barras a los que estará conectado. El procedimiento se repite para insertar las líneas de transmisión, *Network > Transmission Line* y para este caso se conectarán 3 líneas de transmisión. Para los casos reales, deben verificarse los parámetros de todos los equipos. Los datos para este caso, tanto para el transformador como para las líneas serán solamente el valor de sus reactancias, que podrían estar fuera de los rangos de los equipos y que en este caso son solo para mostrar el proceso de la simulación, tabulados a continuación:

Tabla IV. **Valores de reactancias**

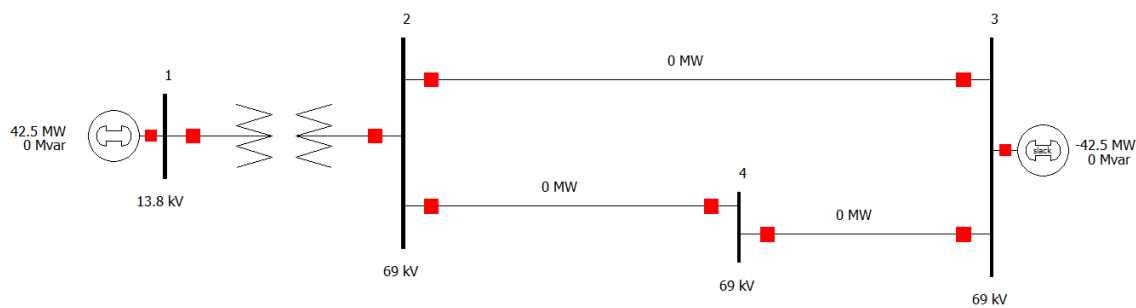
EQUIPO	REACTANCIA (pu)
Transformador	0,5
Línea entre Barras 2-3	0,7
Línea entre Barras 2-4	0,5
Línea entre Barras 3-4	0,2

Fuente: Elaboración propia.

En la barra 3, se inserta un nuevo generador, el cual representara una barra infinita, esto se hace marcando la opción *System Slack Bus* en la pestaña *Bus Information* de la ventana emergente de la respectiva barra, para después modificar sus propiedades en la simulación de la estabilidad transitoria, que se mostrara más adelante en presente documento.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia construido para simular el caso de estabilidad transitoria:

Figura 29. **Sistema eléctrico de potencia de 4 barras**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Como configuración adicional, cada etiqueta para cada elemento se puede configurar para identificar los datos correspondientes a cada valor de la simulación, teniendo el mismo efecto en la simulación para fines prácticos.

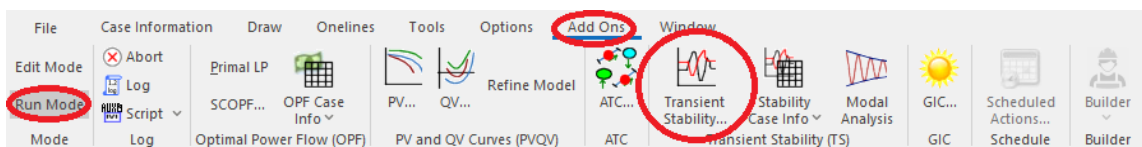
El siguiente paso es determinar el tipo de evento a simular, primero se le agregaran los modelos dinámicos y de control de excitación mencionados en el apartado anterior, esto seleccionando y desplegando la ventana emergente en el primer generador y seleccionando la pestaña *Stability*, dentro de la misma seleccionar *Machine Models > Insert > GENROU* y *Exciters > Insert > IEEE1*. Para fines del presente trabajo de estudio, se realizará y se analizará la simulación de estabilidad transitoria para los siguientes tres casos:

- Despeje de falla después del tiempo crítico
- Despeje de falla aislando la línea afectada
- Despeje de falla aislando la línea afectada, eliminando el corto circuito y reintegrando la línea al SEP

Para cada uno de los casos, se analizará el ángulo del rotor y la potencia eléctrica entregada por el generador con respecto al tiempo, al darse una falla trifásica a la mitad de la línea entre la barra 2 y la barra 4, que ocurrirá en un tiempo de 2,9 s, con un tiempo crítico para liberar la falla de 212 ms posterior a la misma, el cual fue determinado empleando el método de prueba y error con fines de mayor precisión en la simulación.

Se definirán las variables eléctricas mencionadas que se graficarán terminada la simulación y que posteriormente serán analizadas. En *Run Mode* seleccionar *Add Ons > Transient Stability* en la parte superior de la interfaz principal.

Figura 30. Selección de eventos



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

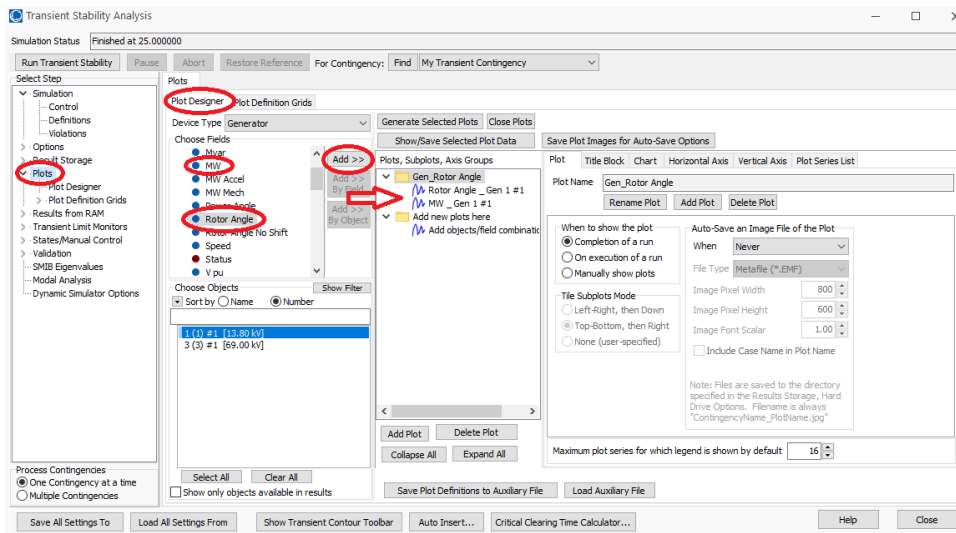
Al seleccionar *Transient Stability*, se abrirá la ventana correspondiente a este tipo análisis, en la que se selecciona *Plots* y en la pestaña *Plot Designer* agregar las variables correspondientes al generador mencionadas. En esta misma ventana seleccionar *Options* y en la pestaña *Power System Model* seleccionar el modelo de barra infinita marcando la opción *Model the power flow*



*slack buses as infinite buses*, en esta misma ventana de opciones se puede cambiar la frecuencia nominal del sistema si así se desea, para fines de estas simulaciones se trabaja con una frecuencia de 60 Hz.

Una vez armado el sistema eléctrico de potencia con los datos especificados, con los modelos del generador agregados, definidas las variables a graficar y seleccionado el modelo de la barra infinita para las simulaciones, se procede a definir los eventos transitorios en función de lo que se desea simular y analizar.

Figura 31. **Ventana Transient Stability Analysis**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

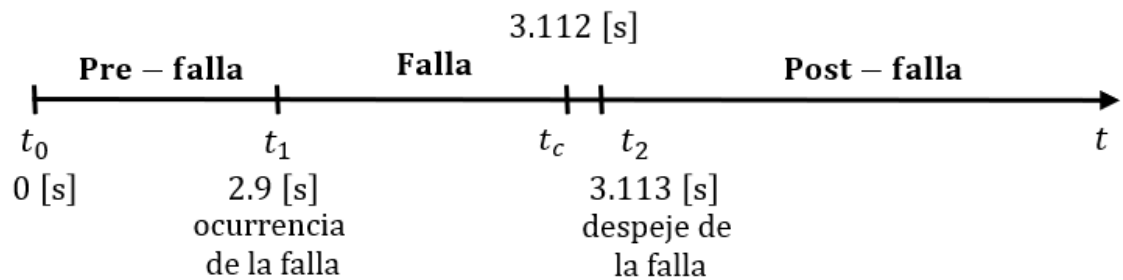
#### 4.3.1. **Simulación despeje de falla, posterior al tiempo crítico**

Para este caso se simula una trifásica a la mitad de la línea entre la barra 2 y la barra 4 a los 2,9 segundos, para después despejarla asilando la línea mediante la apertura de los disyuntores. Sin embargo, el tiempo para aislar la

línea será de 213 milisegundos posterior a la falla, 1 milisegundo mayor al tiempo crítico para librar la falla.

Se entiende mejor lo descrito al observar el siguiente diagrama de tiempos de operación:

Figura 32. Diagrama de tiempos de operación – Caso 1

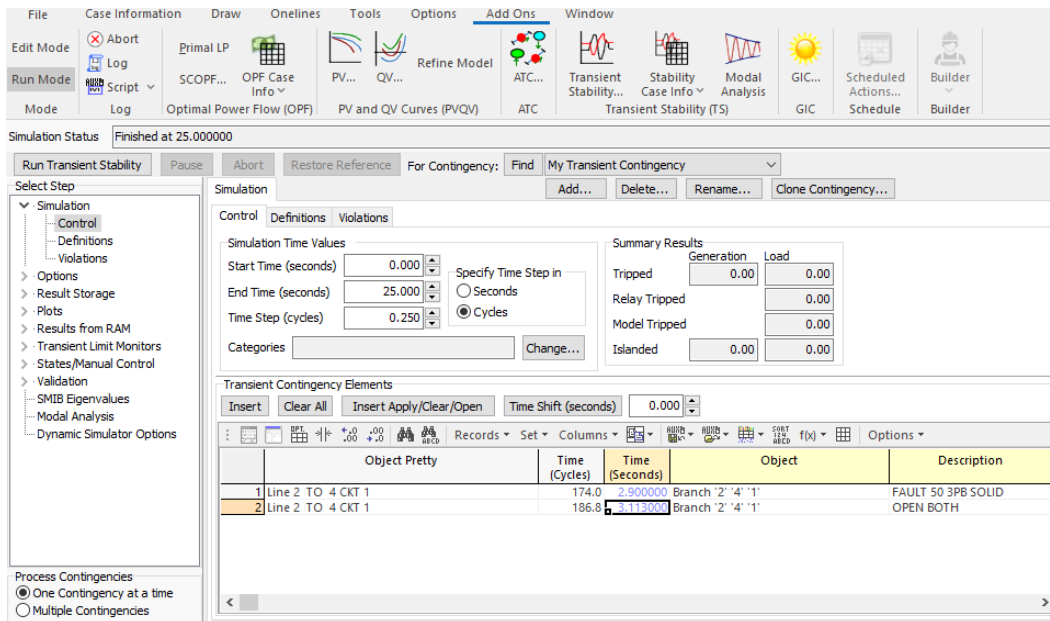


Fuente: elaboración propia.

En la ventana *Transient Stability Analysis* y seleccionando *Simulation*, se establece el rango de tiempo de análisis y el avance paso a paso de la falla, así como los eventos de acuerdo con el diagrama de tiempos.

Habiendo definido los eventos y los tiempos para este caso en particular, se procede a iniciar la simulación seleccionando en *Run Transient Stability*, lo que desplegará las gráficas con el comportamiento del ángulo del rotor y la potencia eléctrica entregada por el generador.

Figura 33. Datos de los eventos ingresados en la ventana *Transient Stability Analysis – Caso 1*

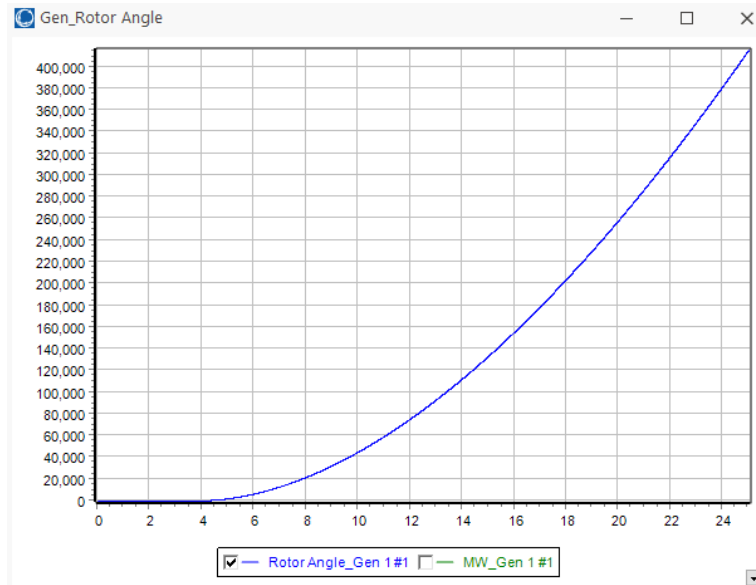


Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Para la gráfica en la figura 34 puede observarse el ángulo del rotor al darse la perturbación y como este sale de paso, debido a que la perturbación se libró en un tiempo mayor al  $t_c$ , provocando con esto un caso inestable para este sistema eléctrico de potencia.

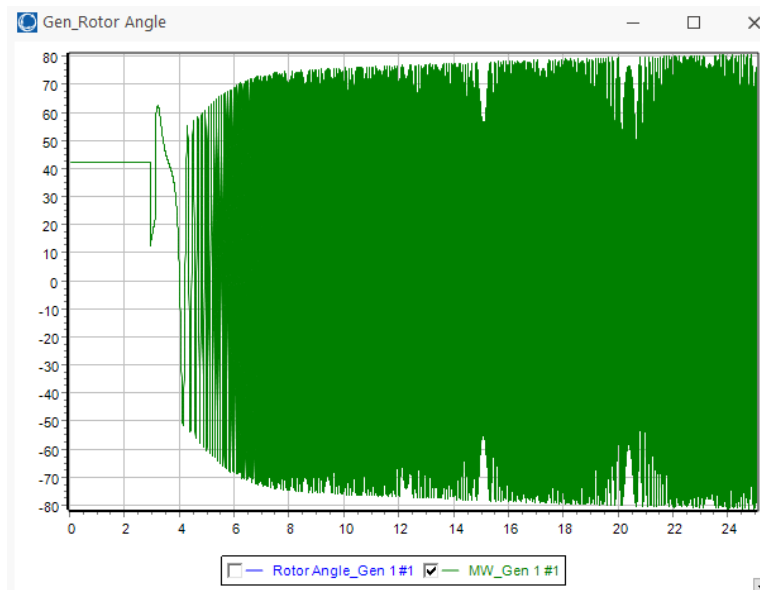
Analizando el comportamiento de la potencia eléctrica entregada por el generador ante la falla trifásica en la figura 35, se puede observar el comportamiento inestable de esta potencia, donde la misma no vuelve a igualarse a la potencia mecánica aun después de librada la falla, provocando así la existencia de una potencia acelerante y desacelerante en todo momento, haciendo que el generador no alcance un punto de equilibrio nuevamente.

Figura 34. **Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 1**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Figura 35. **Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 1**

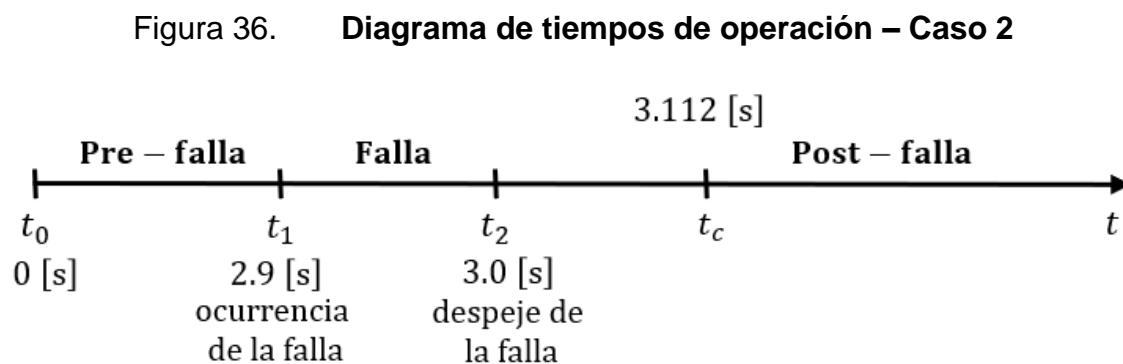


Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

#### 4.3.2. Simulación despeje de falla, aislando la línea afectada

Este caso similar al anterior simula una falla trifásica en 2,9 segundos, para posteriormente despejarla aislando la línea. Sin embargo, el tiempo para aislar la línea será a los 100 milisegundos posterior a la falla (3,00 s). Siendo este, un tiempo menor al tiempo crítico.

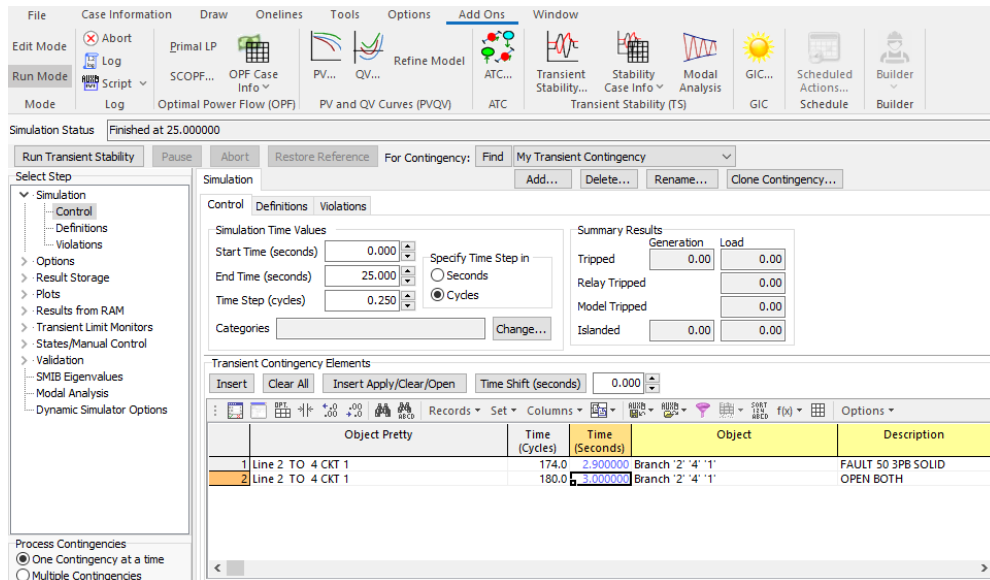
Se entiende mejor lo descrito al observar el siguiente diagrama de tiempos de operación:



Fuente: elaboración propia.

Se procede a cambiar el tiempo de apertura de los disyuntores en la ventana *Transient Stability Analysis*. Realizado lo anterior se procede a iniciar de nuevo la simulación con el mismo procedimiento realizado para el caso anterior.

Figura 37. Datos de los eventos ingresados en la ventana **Transient Stability Analysis – Caso 2**

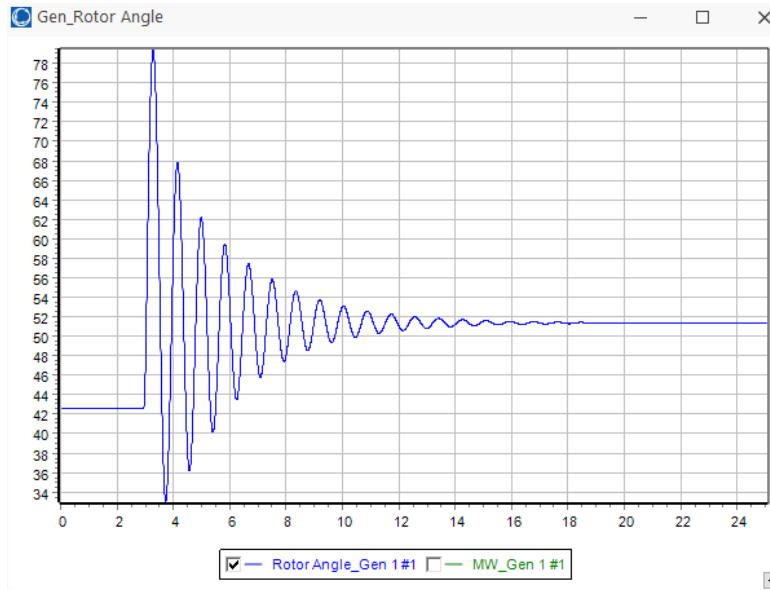


Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

En la figura 38, se muestra el comportamiento dinámico del ángulo del rotor con respecto al tiempo ante la falla trifásica para este nuevo caso en particular. En el cual se observa como dicho ángulo empieza a oscilar ante la ocurrencia de esta falla, siendo liberada antes del  $t_c$  alcanzado de manera amortiguada un valor distinto al que tenía en sus condiciones iniciales, esto porque al aislar la línea afectada, cambia la reactancia equivalente entre el generador y la barra infinita, ajustándose a las nuevas condiciones.

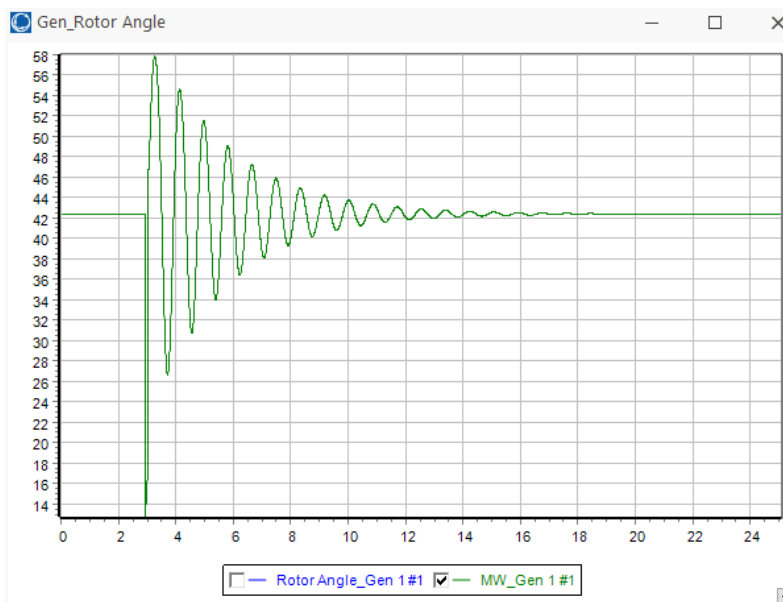
Para la figura 39, se puede observar el mismo comportamiento amortiguado en la gráfica que describe la potencia eléctrica entregada por el generador. En esta a diferencia de la gráfica del caso anterior, si se puede apreciar como alcanza estabilidad, oscilando de manera amortiguada debido a la inercia de la máquina, hasta igualar el valor de la potencia mecánica, provocando que no exista una potencia de aceleración.

Figura 38. **Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 2**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Figura 39. **Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 2**



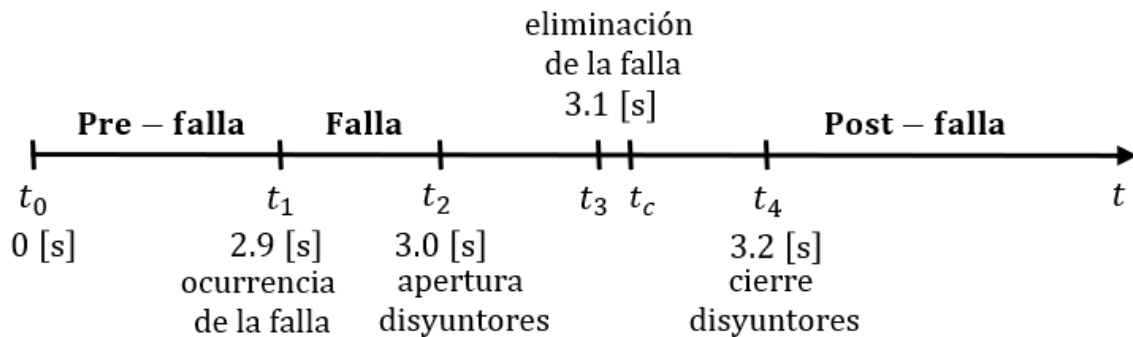
Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

### 4.3.3. Simulación despeje de falla, eliminando el corto circuito

Para este último caso, se simulará la misma falla trifásica en 2,9 segundos, para posteriormente aislar la línea afectada. Sin embargo, inmediatamente después de aislar la línea, se eliminará la falla para finalmente integrar nuevamente la línea al SEP, esto se hará mediante la apertura y cierre de los disyuntores.

Esto se entiende mejor al observar el siguiente diagrama de tiempos de operación:

Figura 40. Diagrama de tiempos de operación – Caso 3

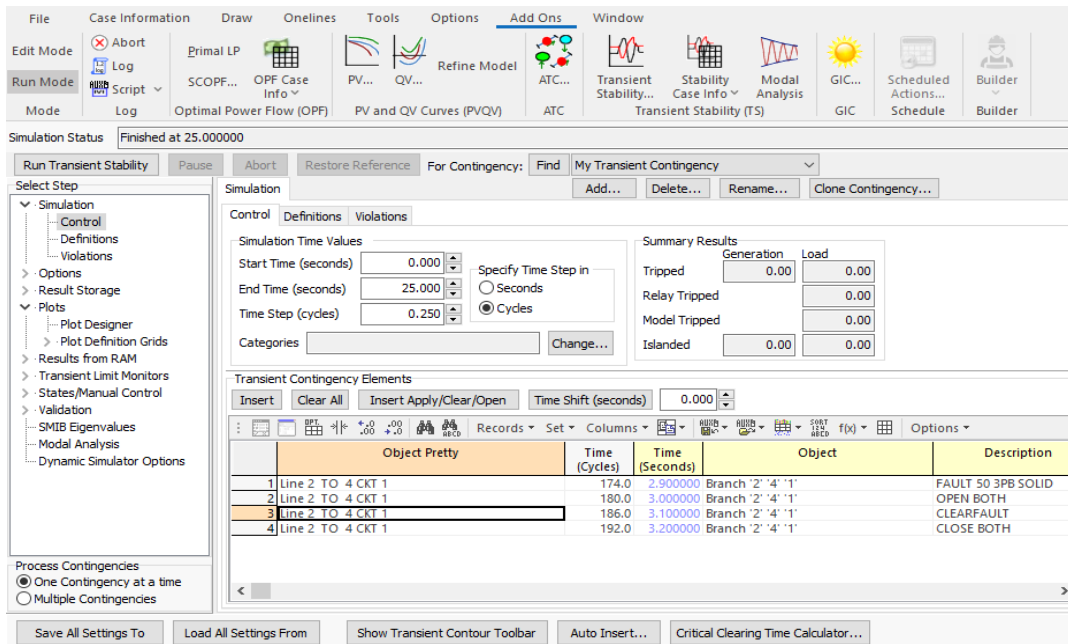


Fuente: elaboración propia.

Al igual que para los dos casos anteriores, se cambia el tiempo de los eventos en la ventana *Transient Stability Analysis*. Realizado lo anterior se procede a iniciar de nuevo la simulación con los nuevos cambios.



Figura 41. Datos de los eventos ingresados en la ventana *Transient Stability Analysis – Caso 3*

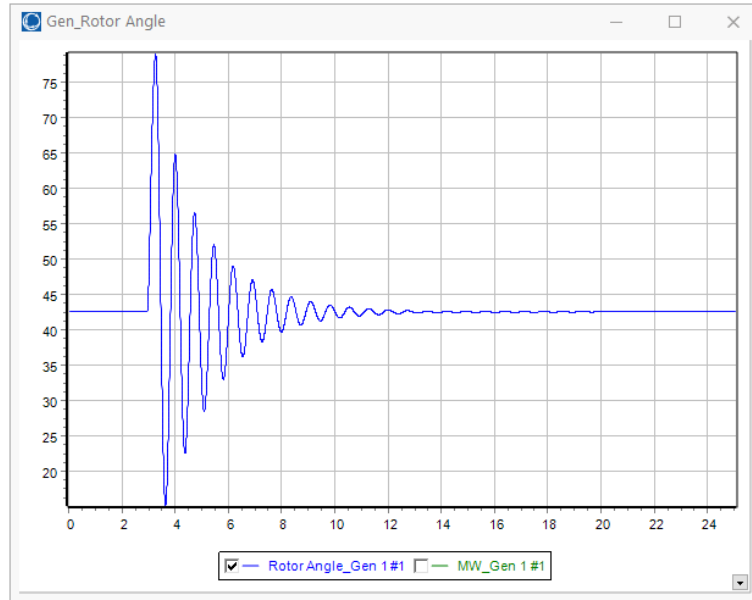


Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Es importante mencionar que en este caso el tiempo crítico para librar la falla es 261 ms, el cual es mayor que el de los dos casos anteriores, esto porque el SEP prácticamente regresa a su condición inicial, tal como estaba antes de darse la falla. Es decir, al reintegrar la línea de nuevo al SEP, la reactancia equivalente regresa a su valor inicial; en consecuencia, la potencia eléctrica máxima vuelve a ser la misma, provocando que el área acelerante y desacelerante de la máquina sea mayor y en consecuencia el tiempo crítico aumenta, se explicará a detalle al final del análisis.

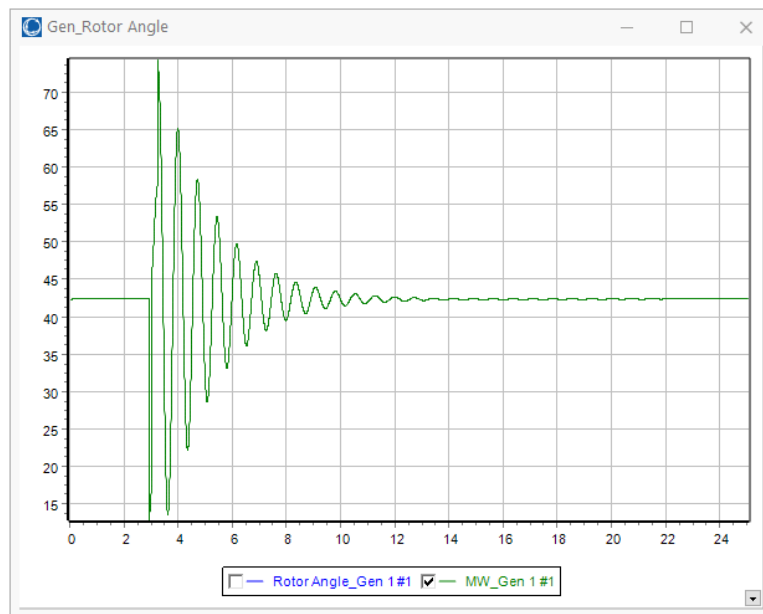
Para la gráfica de la figura 42, muy similar al caso 2 se puede observar que el ángulo del rotor oscila de forma amortiguada hasta alcanzar el sincronismo. Sin embargo, en este caso el ángulo del rotor regresa casi por completo al valor que tenía antes de darse la perturbación.

Figura 42. **Comportamiento del ángulo del rotor del generador – Caso 3**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

Figura 43. **Comportamiento de la potencia eléctrica entregado por el generador – Caso 3**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator 21.

El comportamiento de la potencia eléctrica en la figura 43 del mismo modo tiene un comportamiento similar al caso 2, esta disminuye abruptamente al darse la falla y al ser liberada aumenta nuevamente sobrepasando la potencia mecánica debido a la inercia de la máquina, esta oscilará hasta que no exista potencia de aceleración, regresando a sus condiciones iniciales y recuperando estabilidad el SEP.

Comparando las gráficas del comportamiento de la potencia eléctrica del caso 2 y 3, respectivamente las figura 39 y figura 43, se puede apreciar que la  $P_{m\acute{a}x}$  para el caso 3 es mayor; esto porque la reactancia equivalente para este caso es menor, debido al reintegro de la línea al SEP.

Al ser la reactancia equivalente inversamente proporcional al valor máximo de la potencia eléctrica, provoca que esta aumente. En consecuencia, la curva potencia-ángulo característica es mayor que en el caso 2, por lo que, sí se aplicara el método de áreas iguales para determinar  $t_c$ , este sería mayor al del caso 2 debido a que las áreas acelerantes y desacelerantes son más grandes.

## **5. EVALUACIÓN CONCEPTUAL Y DE APLICACIÓN**

A manera de evaluar el grado de comprensión del estudiante, con respecto a los temas desarrollados en este trabajo de estudio, el método constructivista finaliza con una evaluación conceptual. Del mismo modo, se evalúa la capacidad de análisis del estudiante en relación con estos temas. Al dar por terminado este proceso de aprendizaje, se espera que el estudiante sea capaz de darle solución a las pruebas tanto conceptuales como de aplicación, y con esto demostrar una asimilación plena de dichos conceptos.

### **5.1. Estabilidad transitoria**

A continuación, se presenta la evaluación correspondiente al tema de estabilidad transitoria en los sistemas eléctricos de potencia.

#### **5.1.1. Evaluación conceptual**

Objetivo general: determinar el grado de comprensión del estudiante, con respecto al concepto de estabilidad transitoria en los sistemas eléctricos de potencia.

Instrucciones: marcar la respuesta correcta para la siguiente pregunta.

- Se entiende como estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de potencia a:
  - La aptitud que posee un sistema eléctrico de potencia interconectado para lograr mantener los voltajes a un nivel de estado estable en cada

- una de las barras de generación y carga del sistema, posterior a la ocurrencia de una perturbación desde una condición inicial específica
- La capacidad de las máquinas síncronas de un sistema eléctrico de potencia interconectado de mantener o recuperar el equilibrio entre la potencia eléctrica y la potencia mecánica, posterior a la ocurrencia de una perturbación.
  - La capacidad de un sistema eléctrico de potencia interconectado, de restablecer la frecuencia posterior a la ocurrencia de una perturbación en el balance entre generación y carga.
  - La capacidad de las máquinas síncronas, en donde sus velocidades angulares sean iguales a las del sistema eléctrico de potencia y que la diferencia relativa entre los ángulos de los rotores permanezca constante al presentarse una perturbación.
  - Opción 2 y 4 son correctas.
  - Opción 1 y 3 son correctas.

## **5.2. Ecuación de oscilación**

A continuación, se presenta la evaluación correspondiente al tema de la ecuación de oscilación aplicada a los sistemas eléctricos de potencia.

### **5.2.1. Evaluación de aplicación**

Objetivo general: determinar el grado de comprensión del estudiante, con respecto al concepto de la ecuación de oscilación aplicada a los sistemas eléctricos de potencia.

Instrucciones: resolver el siguiente problema.

- Para un turbogenerador trifásico de 60 Hz, 4 polos, con unos valores nominales de 500 MVA y 11,8 KV, y una constante de inercia  $H = 6,0$  MJ/MVA. Determinar:
  - La velocidad angular síncrona de la máquina.
  - La energía cinética almacenada en el rotor a velocidad síncrona.
  - La aceleración angular eléctrica y la aceleración angular mecánica, si la unidad trabaja a velocidad síncrona con una potencia de aceleración de 500 MW.

### **5.3. Ecuación potencia-ángulo**

A continuación, se presenta la evaluación correspondiente al tema de la ecuación potencia-ángulo aplicada a los sistemas eléctricos de potencia.

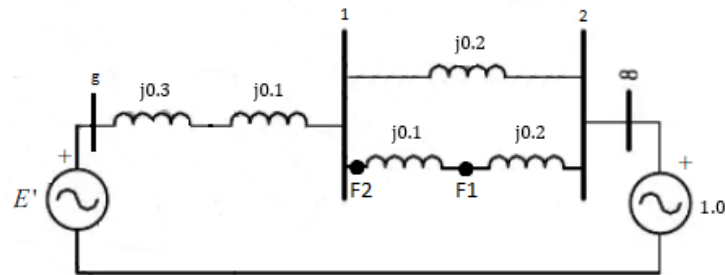
#### **5.3.1. Evaluación de aplicación**

Objetivo general: determinar el grado de comprensión del estudiante, con respecto al concepto de la ecuación potencia-ángulo aplicada a los sistemas eléctricos de potencia.

Instrucciones: resolver el siguiente problema.

- Para el diagrama de reactancias que se muestra, un generador síncrono trifásico de 60 Hz, conectado a través de un transformador y líneas de transmisión paralelas a una barra infinita. Todas las reactancias se dan en valores por unidad. Si la barra infinita recibe una potencia de 1,0 pu con un factor de potencia en retraso de 0,95.

Figura 44. Diagrama de reactancias



Fuente: elaboración propia.

- Determinar:
  - El voltaje interno del generador.
  - La ecuación potencia-ángulo para el generador.

#### 5.4. Criterio de áreas iguales

A continuación, se presenta la evaluación correspondiente al tema del criterio de áreas iguales aplicado a los sistemas eléctricos de potencia.

##### 5.4.1. Evaluación de aplicación

Objetivo general: determinar el grado de comprensión del estudiante, con respecto al concepto del criterio de áreas iguales aplicado a los sistemas eléctricos de potencia.

Instrucciones: resolver el siguiente problema.

- Para el sistema eléctrico de potencia del problema anterior, con el generador operando en estado estable, con un constante de inercia  $H =$

3 MJ/MVA, se produce una falla trifásica a tierra; la falla es liberada mediante la apertura de los disyuntores en los extremos de la línea afectada. Suponiendo una potencia mecánica constante durante la perturbación de 1,0 pu, determinar el ángulo y tiempo crítico de despeje de falla para los siguientes dos casos:

- La falla se da en el punto F1 y los disyuntores de la línea afectada permanecen abiertos.
- La falla se da en el punto F2 y los disyuntores de la línea afectada vuelven a cerrar.

## **5.5. Práctica en PowerWorld Simulator**

A continuación, se presenta la evaluación correspondiente al uso del software de simulación PowerWorld para estudios de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia.

### **5.5.1. Evaluación de aplicación**

Objetivo general: analizar el comportamiento del siguiente sistema eléctrico de potencia ante la ocurrencia de una falla trifásica a la mitad de una línea, utilizando PowerWorld Simulator.

Instrucciones: Construir, simular y analizar el siguiente escenario.

- Un generador de una planta hidroeléctrica, conectado a una barra infinita, por medio de un campo de transformación elevador y una línea de transmisión doble. En la barra infinita se encuentra conectado una carga de



30 MW y el resto de los datos para los elementos que componen este sistema son los siguientes:

Tabla V. **Datos del generador**

POTENCIA	VALOR
Nominal (MW)	60
Base (MVA)	100

Fuente: elaboración propia.

Utilizar el modelo de la máquina de GENSAL, dado que este simula muy bien este tipo de generadores. Para el control de excitación utilizar el modelo IEEE1.

Tabla VI. **Datos de las barras**

NO. DE BARRA	NIVEL DE VOLTAJE (KV)
1	11
2	138
3	138

Fuente: elaboración propia.

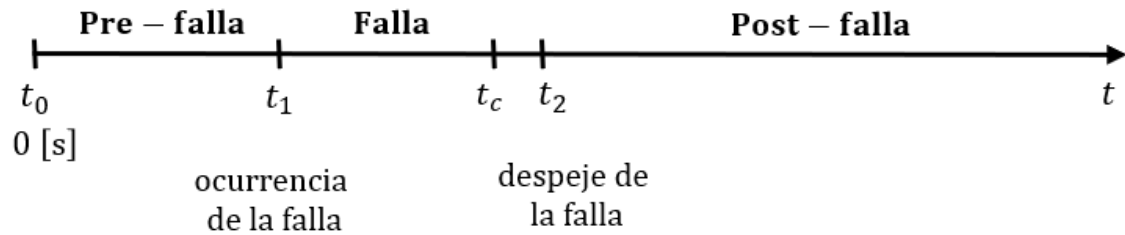
Tabla VII. **Valores de reactancias**

EQUIPO	REACTANCIA (pu)
Transformador	0,5
Línea entre Barras 2-3 (1)	0,7
Línea entre Barras 2-3 (2)	0,7

Fuente: elaboración propia.

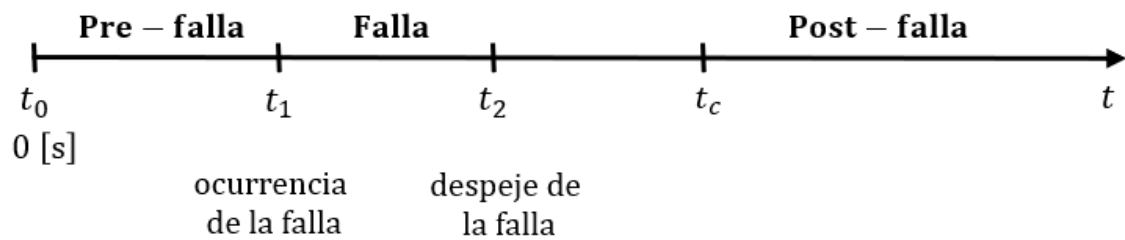
Una vez construido el sistema eléctrico de potencia, realizar la simulación de estabilidad transitoria para los siguientes 3 casos:

Figura 45. **Diagrama de tiempos de operación – Caso 1**



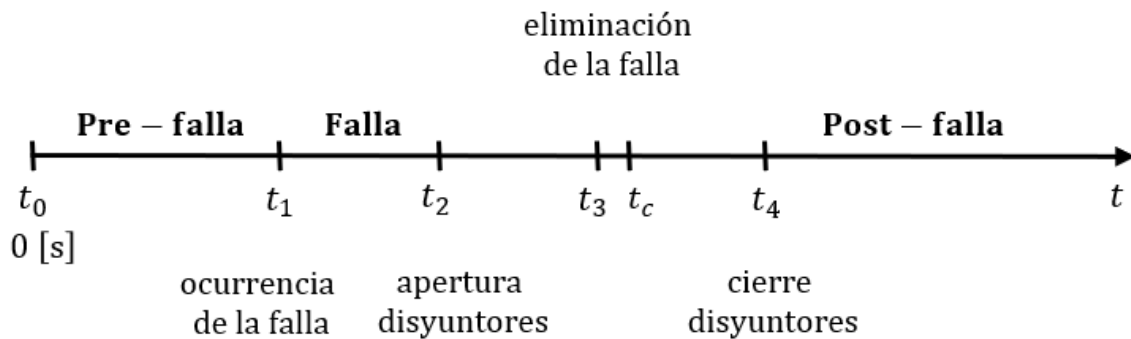
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Diagrama de tiempos de operación – Caso 2**



Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Diagrama de tiempos de operación – Caso 3**



Fuente: elaboración propia.

Los tiempos de cada uno de los escenarios se dejan al criterio del estudiante, indicando el tiempo crítico posterior a la falla para cada escenario, método prueba y error.

Obtener las gráficas que describen el comportamiento del ángulo del rotor y la potencia eléctrica que entrega el generador para cada uno de los escenarios. Realizar un análisis de resultados en base al comportamiento de las gráficas obtenidas.

Debe presentarse, en medio físico y digital, el informe técnico del estudio realizado, conteniendo los archivos de la simulación.

## CONCLUSIONES

1. El modelo de enseñanza a través del tiempo debe de adaptarse a las tecnologías actuales, para lograr facilitar el aprendizaje y con esto obtener una eficiente retroalimentación de la información entre el alumno y el catedrático.
2. Se desarrolló una nueva modalidad de enseñanza, en base al método constructivista de manera audiovisual para el estudiante, desarrollando los temas involucrados en la estabilidad transitoria; siendo estos, temas fundamentales para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.
3. El grado de efectividad del material desarrollado, dependerá directamente de las diferentes estrategias que el catedrático pueda utilizar como herramienta de aprendizaje; siendo un hecho la reducción del tiempo en clase, desarrollando estos temas y así enfocarse en resolver las dudas de los estudiantes.
4. Los ejercicios aplicativos, son una manera de emplear el conocimiento adquirido de forma real, dado que estos presentan hasta cierto punto, situaciones desarrolladas en el ámbito laboral.
5. Las evaluaciones tanto conceptuales como aplicativos, son una herramienta empleada con el fin de medir el grado de aprendizaje y nivel de análisis del estudiante, con relación a los temas desarrollados en este método constructivista.



## RECOMENDACIONES

1. Utilizar el material desarrollado en este trabajo de estudio, como un complemento del curso y para facilitar la comprensión de los temas desarrollados.
2. Mediante se desarrolle el curso a lo largo del semestre, es importante realizar una lectura previa de los temas; surgiendo de esta forma posibles dudas, la cuales podrán ser resueltas por el catedrático durante los periodos de clase.
3. Tomar diversas fuentes de investigación con respecto a estos temas desarrollados, esto dado que es imposible cubrir por completo todos los temas y casos de estudio; o bien, puede que sea comprensible el mismo tema para el estudiante en otras fuentes.
4. El acompañar los temas desarrollados con ejercicios aplicativos, es una forma en que los estudiantes pueden asimilar de mejor manera el conocimiento dado por el catedrático y que ambas partes puedan intercambiar sus criterios.
5. Al realizar la evaluación de los temas abordados, más que una manera de determinar la efectividad del material realizado y la labor del catedrático; puede tomarse como un indicador de los temas en que se debe de reforzar el estudiante.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CUZCO SILVA, Javier Rolando. *Análisis de Estabilidad Transitoria de las Centrales Hidroeléctricas de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, 2014. 293 p.
2. MACHUCA MORENO, Alejandra. *Análisis de estabilidad transitoria basado en teoría de redes complejas y el fenómeno de percolación*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2017. 93 p.
3. NÚÑEZ LÓPEZ, José Carlos. *Comparación técnica entre los programas de simulación de Sistemas de Potencia DIgSILENT PowerFactory y PSS/E*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, 2015. 187 p.
4. AGUIRRE CÁRDENAS, Christian Wladimir. *Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software PowerFactory 13.1 de DIgSILENT*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, 2008. 344 p.



5. GONZALEZ-LONGATT, Francisco M. *Estabilidad Transitoria*. [en línea]. <[https://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP\\_II/Capitulo2-3.pdf](https://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/Capitulo2-3.pdf)>. [Consulta: 02 de agosto de 2020].
6. DÍAZ, Frida. *Constructivismo y aprendizaje significativo*. [en línea]. <[http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/virtuami/file/Diaz\\_Barriga1.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/virtuami/file/Diaz_Barriga1.pdf)>. [Consulta: 13 de marzo de 2020].
7. AGUIL BELLOCH ORTÍ, Consuelo. *Las tecnologías de la información y comunicación (T.I.C.)*. [en línea]. <<https://www.uv.es/~belloch/pdf/pwtic1.pdf>>. [Consulta: 11 de marzo de 2019].
8. AGUILAR QUINTANILLA, Cristian Antonio. *Análisis y simulación de estabilidad transitoria en sistemas multimáquina*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2019. 189 p.
9. GRAINGER, John J. *Análisis de Sistemas de Potencia*. 1a ed. México: McGraw-Hill, 2001. 731 p.
10. GÓMEZ CH, Ana M. *Herramienta computacional para el análisis de estabilidad transitoria en sistemas multimáquina*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, 2008. 107 p.
11. ARCOS GUERRÓN, Lenin Javier. *Análisis de estabilidad transitorio del sistema nacional interconectado del Ecuador*. Trabajo de

graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, 2007. 271 p.

12. SANCHEZ TELLO, Fernando. *Análisis y control de oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos de potencia*. Trabajo de graduación de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1997. 316 p.
13. STEVENSON, William D. Jr. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1979. 384 p.
14. TORREALBA HERRERA, Nick. *Análisis de estabilidad de voltaje de sistemas eléctricos de potencia usando curvas Q-V*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad Carabobo, 2015. 224 p.
15. SILVA RÍOS, Manuel Alberto. *Análisis de estabilidad de una Microrred conectada a un sistema de potencia convencional*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, 2019. 64 p.
16. RAMÍREZ CASTELLANOS, Jonnathan Sttev. *Diseño del manual de laboratorio del curso de análisis de sistemas de potencia 1*. Trabajo de graduación de Ing. Electricista. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019. 182 p.

17. OVERBYE, Thomas J. *Quick Start for Using PowerWorld Simulator with Transient Stability*, [en línea]. <<http://https://es.slideshare.net/JoeloRoss/powerworld-15-transient-stability-quickstart>>. [Consulta: 1 de marzo de 2021].

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Material Audiovisual

El material audiovisual realizado puede consultarse en los siguientes enlaces:

1. Estabilidad en SEP:

[https://drive.google.com/file/d/16AAfRKGA5Vbe\\_RfR\\_cxjHclx07j-Kvso/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/16AAfRKGA5Vbe_RfR_cxjHclx07j-Kvso/view?usp=sharing)

2. Clasificación de Estabilidad en SEP:

[https://drive.google.com/file/d/1aieMScYK8wmr\\_70t-eLSZ7g28jcgj0kZ/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1aieMScYK8wmr_70t-eLSZ7g28jcgj0kZ/view?usp=sharing)

3. Técnicas de análisis:

<https://drive.google.com/file/d/1L2fEiCsF3esPhvOBOMBsGsTiHgdrT0p-/view?usp=sharing>

4. Propagación de perturbaciones en redes:

<https://drive.google.com/file/d/13yZsu5viiyGKhIE9Nuv57EspcDf4-2S0/view?usp=sharing>

5. Propagación de perturbaciones en SEP:

<https://drive.google.com/file/d/1ydIlgKG2lezYSgFMtG1B6Zweqx8rKd1cW/view?usp=sharing>

6. Ecuación de oscilación Pt.1:

<https://drive.google.com/file/d/1R3tVLbkt4-PavP8bVb4i7xo6GVqBFNsf/view?usp=sharing>

7. Ecuación de oscilación Pt.2:

<https://drive.google.com/file/d/12fQ82S8OGCrpYrpa2jfcgHPqLkkuHQxg/view?usp=sharing>

continuación apéndice 1.

8. Ecuación potencia-ángulo Pt.1:

[https://drive.google.com/file/d/1p0Ax\\_MwHR5-luorbLZL4GhugH6z2eZFe/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1p0Ax_MwHR5-luorbLZL4GhugH6z2eZFe/view?usp=sharing)

9. Ecuación potencia-ángulo Pt.2:

[https://drive.google.com/file/d/12\\_WykALbhKDNlpz\\_9GFpbjH\\_ddEJ6XLy/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/12_WykALbhKDNlpz_9GFpbjH_ddEJ6XLy/view?usp=sharing)

10. Ecuación potencia-ángulo Pt.3:

[https://drive.google.com/file/d/1II0VXZTySu6EfZQ\\_pyXE3i7ppi4EmqB8/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1II0VXZTySu6EfZQ_pyXE3i7ppi4EmqB8/view?usp=sharing)

11. Igualdad de áreas Pt.1:

<https://drive.google.com/file/d/1IQxXDemybG6BXBlwTgmfAU-AoMWA5As/view?usp=sharing>

12. Igualdad de áreas Pt.2:

<https://drive.google.com/file/d/1O8Le2VJG6WrvX-1HCHpsM-C2HHylptmb/view?usp=sharing>

13. Igualdad de áreas Pt.3:

[https://drive.google.com/file/d/1QfmRxgeFC8Q-bwaP3DHB5MqRKMq\\_70B-/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1QfmRxgeFC8Q-bwaP3DHB5MqRKMq_70B-/view?usp=sharing)

14. Igualdad de áreas Pt.4:

<https://drive.google.com/file/d/1v1fTqclM26Xbq1KUikUkfa70YUZb1DPQ/view?usp=sharing>

15. Igualdad de áreas Pt.5:

<https://drive.google.com/file/d/1sYMYGYxIhzzZG3YK0vot0PULdT-zmdcA/view?usp=sharing>

16. Igualdad de áreas Pt.6:

<https://drive.google.com/file/d/119w3Cnvl1HzEVm0xO0IKzKhyaKlbDWZK/view?usp=sharing>

continuación apéndice 1.

17. Métodos numéricos Pt.1:

[https://drive.google.com/file/d/1KNWZSUiPi0Kmwzu5EP\\_J6zbxhuvF4Rh9/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1KNWZSUiPi0Kmwzu5EP_J6zbxhuvF4Rh9/view?usp=sharing)

18. Métodos numéricos Pt.2:

<https://drive.google.com/file/d/1DMTZoznJNX4TKf6XAjtLjjowij8QegO2/view?usp=sharing>

19. Métodos numéricos Pt.3:

[https://drive.google.com/file/d/1ZCLYVyl2WF9nlxqyCcw7yfkJTBRc\\_wi/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1ZCLYVyl2WF9nlxqyCcw7yfkJTBRc_wi/view?usp=sharing)

20. Métodos numéricos Pt.4:

[https://drive.google.com/file/d/1vi6GgyPghr\\_XCYKsRKB6GmcEmchilpmB/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1vi6GgyPghr_XCYKsRKB6GmcEmchilpmB/view?usp=sharing)

21. Métodos numéricos Pt.5:

<https://drive.google.com/file/d/1LyE5-q5AOtZi8vWqzmz5H3EB27b66jH4I/view?usp=sharing>

22. Factores y métodos implicados en la estabilidad transitoria Pt.1:

<https://drive.google.com/file/d/11Gjq7U3e9cdLkBIXR02x-yDE9NkMfN2V/view?usp=sharing>

23. Factores y métodos implicados en la estabilidad transitoria Pt.2:

<https://drive.google.com/file/d/1qkCFPzNZ1Ki0CZngGtI7SfpoGLt0m3jM/view?usp=sharing>

24. PowerWorld Simulator Pt.1:

<https://drive.google.com/file/d/1I6boHYcug4X87HckyivT8ALu6wJTc4KG/view?usp=sharing>

25. PowerWorld Simulator Pt.2:

[https://drive.google.com/file/d/1o\\_v20zy5QiLS7fGKXQ0agezJyqV0D7Bv/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1o_v20zy5QiLS7fGKXQ0agezJyqV0D7Bv/view?usp=sharing)

continuación apéndice 1.

26. Evaluación:

<https://drive.google.com/file/d/1-PoXD7ItZxykjmTw1DGlu5652U2C2ZiD/view?usp=sharing>

27. Resolución Pt.1:

<https://drive.google.com/file/d/1DzGHYubnJtjDqMjDMD4DozUUuUeXSR8e/view?usp=sharing>

28. Resolución Pt.2:

<https://drive.google.com/file/d/1LOLJETIrdDHWFaKbqDwkWZKC1TNqujQj/view?usp=sharing>

29. Resolución Pt.3:

[https://drive.google.com/file/d/19L-dbJA6zdCRb\\_ZaVXUivKrVR4jGD8vN/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/19L-dbJA6zdCRb_ZaVXUivKrVR4jGD8vN/view?usp=sharing)

30. Resolución Pt.4:

<https://drive.google.com/file/d/1e3am8c3LTpcPTETUiQLuhrEXhK4eGd3v/view?usp=sharing>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Solucionario correspondiente a la evaluación**

**RESOLUCIÓN A LA EVALUACIÓN DE APLICACIÓN CORRESPONDIENTE  
A LA ECUACIÓN DE OSCILACIÓN PLANTEADA PARA EL CAPÍTULO 4**

Es posible determinar la energía cinética almacenada en el rotor, de la siguiente manera:

$$E_k = \left(6,0 \frac{MJ}{MVA}\right) \cdot (500 MVA) = 3000 MJ$$

continuación apéndice 2.

Para este problema hay ciertas consideraciones a tomar en cuenta, si bien el problema brinda todos los datos necesarios para poder calcular la aceleración angular, el mismo indica que el turbogenerador es de 4 polos, por lo que la velocidad angular para este caso se calcula en base el par de polos de la siguiente manera:

$$\omega_s = \frac{\omega_0}{P} = \frac{2\pi f}{2} = \pi f$$

Dando como resultado, para este caso una velocidad angular de:

$$\omega_s = 60\pi \text{ rad/s}$$

El mismo problema, proporciona el dato de la potencia de aceleración; sin embargo, el dato está dado en MVA, teniendo que convertir las dimensionales a un valor base por unidad, esto en base al dato del valor nominal, también dado por el mismo problema. Obteniendo así una potencia de aceleración en valores por unidad de:



continuación apéndice 2.

$$P_a = \frac{500 \text{ MVA}}{500 \text{ MVA}} = 1,0 \text{ pu}$$

Con los datos de la constante de inercia y el dato de la potencia de aceleración ya en valores por unidad, es posible sustituir valores en la ecuación de oscilación de la siguiente manera:

$$\frac{2 \left( 6,0 \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} \right) d^2 \delta}{(60\pi \text{ rad/s}) dt^2} = 1,0 \text{ pu}$$

continuación apéndice 2.

Y despejando, se obtiene una aceleración angular para este caso en particular de:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 5\pi \text{ rad/s}^2$$

Siendo esta la aceleración angular propia de la máquina síncrona, es decir la aceleración angular mecánica. Esta difiere de la aceleración angular eléctrica debido a la cantidad de pares de polos de la máquina.

Por lo que, al no considerar el número de pares de polos en el dato de la velocidad angular y sustituyendo de nuevo los datos en la ecuación de oscilación

Es decir:

$$\frac{2 \left( 6,0 \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} \right) d^2 \delta}{(120\pi \text{ rad/s}) dt^2} = 1,0 \text{ pu}$$

continuación apéndice 2.

Y despejando, se obtiene el valor de la aceleración angular eléctrica de este problema:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 10\pi \text{ rad/s}^2$$

**RESOLUCIÓN A LA EVALUACIÓN DE APLICACIÓN  
CORRESPONDIENTE A LA ECUACIÓN POTENCIA-ÁNGULO PLANTEADA  
PARA EL CAPÍTULO 4**

Al analizar el diagrama de reactancias dado por el mismo problema, se puede determinar la reactancia equivalente entre el voltaje interno de la máquina y el de la barra infinita de la siguiente manera:

continuación apéndice 2.

$$X_{eq} = j0,30 + j0,10 + j0,20 || (j0,10 + j0,20)$$
$$X_{eq} = j0,520 \text{ pu}$$

Para determinar el valor de corriente que entrega el generador a la barra infinita, se utiliza la siguiente ecuación:

$$I = \frac{S}{V_{\infty}} \angle -\phi$$

En donde, es necesario determinar la potencia aparente y el ángulo de desfase de corriente con respecto al voltaje en terminales. Los cuales, se pueden determinar con la potencia activa y el factor de potencia, dados por el

continuación apéndice 2.

problema. Quedando la ecuación para determinar la corriente, de la siguiente manera y sustituyendo:

$$I = \frac{P}{V_{\infty} * \cos \phi} \angle -\cos^{-1}(F.P.)$$
$$I = \frac{(1,0)}{(1,0)(0,95)} \angle -\cos^{-1}(0,95)$$

Se obtiene una corriente en la barra infinita, expresada en valores por unidad de:

$$I = 1,05263 \angle -18,195^{\circ} pu$$

Por lo que, el voltaje interno de la máquina se puede calcular multiplicando la corriente por la reactancia equivalente y sumando la caída de voltaje en sus terminales, y así sustituir valores, se obtiene la magnitud y ángulo para el voltaje interno del generador dado en valores por unidad:

$$E' = E' \angle \delta = V_{\infty} + jX_{eq}I$$
$$E' = 1,0 \angle 0^{\circ} + (j0,520)(1,05263 \angle -18,195^{\circ})$$
$$E' = 1,2812 \angle 23,946^{\circ} pu$$

Con todo lo anterior calculado, es decir, la magnitud del voltaje interno del generador, la magnitud del voltaje en terminales, reactancia equivalente y sustituyendo en la ecuación potencia-ángulo, se obtiene:

$$P_e = \frac{(1,2812)(1,0)}{0,520} \sin \delta = 2,4638 \sin \delta pu$$

continuación apéndice 2.

**RESOLUCIÓN A LA EVALUACIÓN DE APLICACIÓN  
CORRESPONDIENTE AL CRITERIO DE IGUALDAD DE ÁREAS  
PLANTEADA PARA EL CAPÍTULO 4**

**Se empezará analizando el SEP antes de la falla en el punto F1, en el caso en que se aísla del sistema la línea afectada.**

Siendo la ecuación potencia-ángulo ya determinada en el problema anterior, la potencia eléctrica antes de darse la falla. Es posible determinar el ángulo inicial  $\delta_0$ , a partir del momento justo cuando ocurre la falla, donde la potencia mecánica es igual a la potencia eléctrica, expresado como:

$$1,0 = 2,4638 \sin \delta_0$$

Obteniendo un ángulo de rotor inicial de:

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left( \frac{1,0}{2,4638} \right)$$
$$\delta_0 = 23,95^\circ = 0,4179 \text{ rad}$$

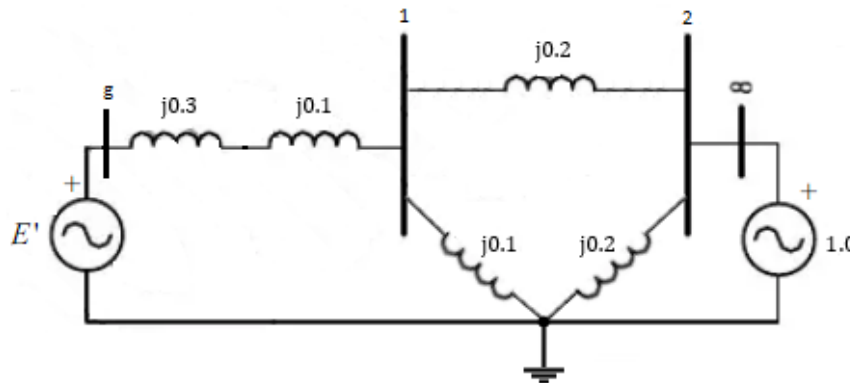
**Analizando ahora las condiciones del SEP durante la falla.**

Teniendo que la falla se da entre las dos reactancias que componen la línea afectada. Lo cual, cambia el valor de la reactancia equivalente calculada anteriormente.

continuación apéndice 2.

Lo anterior se entiende mejor al analizar el siguiente diagrama de reactancias durante la falla:

Figura 1. Diagrama de reactancias durante la falla



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la reactancia equivalente entre el generador y la barra y el nuevo valor de voltaje en la barra infinita, es necesario aplicar el teorema de Thévenin, en donde al cortocircuitar las fuentes de voltaje, prácticamente queda excluida la reactancia de valor 0.2 de la línea afectada. Pudiendo determinar una reactancia equivalente de Thévenin durante la falla, de la siguiente manera:

$$X_{Th} = 0,40 + 0,20 || 0,10 = 0,4666 pu$$

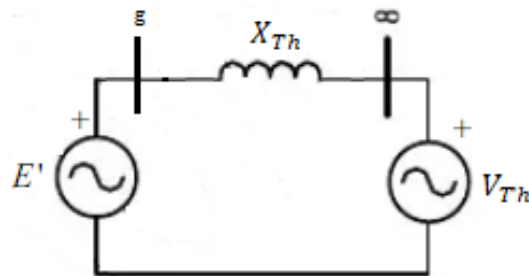
Comprendiendo el concepto del teorema de Thévenin, el voltaje equivalente de Thévenin será el voltaje en la reactancia de valor 0.1 para las condiciones de falla, expresado de la siguiente forma:

$$V_{Th} = 1,0 \angle 0^\circ \left[ \frac{0,1}{0,1 + 0,2} \right] = 0,3333 \angle 0^\circ pu$$

continuación apéndice 2.

Quedando el circuito equivalente de Thévenin durante la falla, de la siguiente manera:

Figura 2. **Equivalente de Thévenin**



Fuente: Elaboración propia

Calculados el voltaje y reactancia equivalente de Thévenin, se puede determinar la ecuación de la potencia eléctrica durante la falla, de la siguiente manera:

$$P_{e2} = \frac{(1,2812)(0,3333)}{0,4666} \sin \delta$$
$$P_{e2} = 0,9152 \sin \delta$$

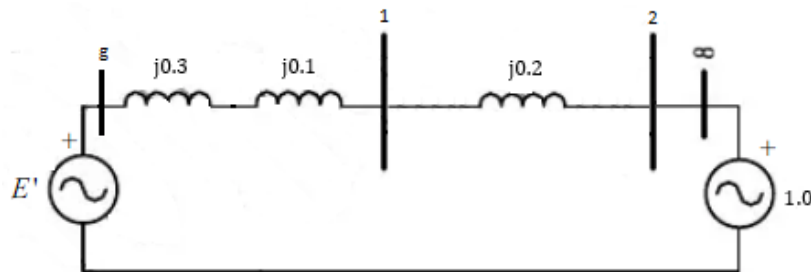
**Por último, se analizará el SEP después de la falla.**

Al ser liberada la falla, la línea afectada permanece abierta, provocando que la reactancia equivalente entre el generador y la barra sea mayor. Lo anterior tiene un impacto directo en la potencia eléctrica, dado que ambas variables son inversamente proporcionales en la ecuación potencia-ángulo, reduciendo así el valor máximo de dicha potencia.

continuación apéndice 2.

Lo anterior se entiende mejor analizando el siguiente diagrama de reactancias:

Figura 3. **Diagrama de reactancias aislando la línea afectada**



Fuente: Elaboración propia

Por lo que la reactancia equivalente posterior a la falla, para este caso será:

$$X_{eq3} = j0,3 + j0,1 + j0,2$$

$$X_{eq3} = j0,60 \text{ pu}$$

Quedando la ecuación potencia-ángulo expresada de la siguiente manera:

$$P_{e3} = \frac{(1,2812)(1,0)}{0,60} \sin \delta$$

$$P_{e3} = 2,1353 \sin \delta \text{ pu}$$

El ángulo máximo  $\delta_{max}$ , en donde se vuelve a igualar la potencia mecánica con esta nueva potencia eléctrica es:

$$P_m = P_{e3}$$

$$1,0 = 2,1353 \sin \delta_{max}$$

continuación apéndice 2.

Sin embargo, al despejarlo se debe tomar en cuenta que este ángulo no se toma con referencia al origen, si no con referencia a  $\pi$ , es decir:

$$\delta_{max} = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{1,0}{2,1353}\right)$$
$$\delta_{max} = \pi - 0,4874 = 2,6542 \text{ rad}$$

Aplicando el criterio de las áreas iguales, se puede determinar el ángulo crítico  $\delta_{cr}$  de liberación de falla bajo estas condiciones y desarrollando la integral:

$$\int_{0,4179}^{\delta_{cr}} (1,0 - 0,9152 \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{2,6542} (2,1353 \sin \delta - 1,0) d\delta$$
$$\delta_{cr} - 0,4179 + 0,9152(\cos \delta_{cr} - \cos 0,4179)$$
$$= 2,1353(\cos \delta_{cr} - \cos 2,6542) - (2,6542 - \delta_{cr})$$
$$-1,2201 \cos \delta_{cr} = 0,4868$$

Despejando la variable del ángulo crítico, se obtiene:

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}\left(\frac{0,4868}{-1,2201}\right)$$
$$\delta_{cr} = 1,9812 \text{ rad} = 111,5^\circ$$

Ahora bien, aplicando la ecuación para determinar el tiempo crítico y sustituyendo valores:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4 \times 3,0 \times (1,9812 - 0,4179)}{2\pi \times 60 \times 1,0}}$$



continuación apéndice 2.

$$t_{cr} = 0,2231 \text{ s}$$

Obteniendo así el ángulo y tiempo crítico de liberación de la falla, para este primer caso.

Ahora bien, tal como se hizo en el caso anterior, este segundo caso se analizará en diferentes etapas por las que atraviesa el SEP:

**Se iniciará analizando el SEP, antes de la falla en el punto F2, en el caso en que se reincorpora al sistema la línea afectada.**

Cabe resaltar que el análisis antes de la falla es prácticamente el mismo que para el caso anterior. Por lo que se tiene la misma ecuación potencia-ángulo antes de darse la falla:

$$P_{e1} = 2,4638 \sin \delta \text{ pu}$$

Con el mismo ángulo inicial del rotor, justo donde el SEP pierde estabilidad.

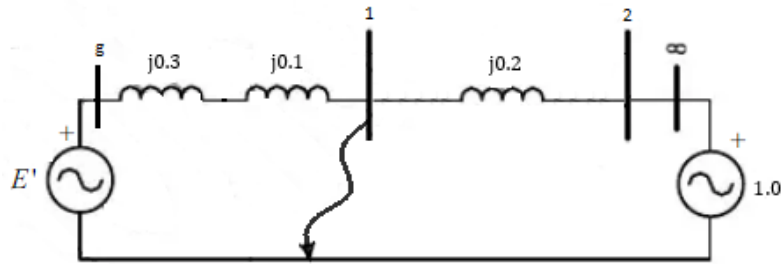
$$\delta_0 = 23,95^\circ = 0,4179 \text{ rad}$$

**Analizando las condiciones del SEP durante la falla:**

Se tiene que la falla se da al inicio de una de las líneas. El valor de la reactancia equivalente del SEP es muy grande, provocando con esto que la potencia eléctrica sea cero, esto se entiende mejor analizando el siguiente diagrama reactancias, durante este evento.

continuación apéndice 2.

Figura 4. **Diagrama de reactancias durante la falla**



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la reactancia equivalente entre el generador y la barra, es necesario aplicar una conversión estrella-delta, de la siguiente manera:

$$X_{eq2} = \frac{(j0,40)(0) + (j0,20)(0) + (j0,40)(j0,20)}{0} = \infty$$

Comprobando así, que dicha reactancia equivalente tendría un valor muy grande, provocando que la potencia eléctrica durante el evento sea cero.

$$P_{e2} = \frac{(1,2812)(1,0)}{\infty} \sin \delta = 0$$

**Por último, se analizará el SEP después de la falla:**

Las diferencias que se tienen con este segundo caso; aparte de la localización de la falla, es que una vez ya liberada la falla, la línea afectada se vuelve a incorporar al sistema. Es decir, el SEP regresa a sus condiciones iniciales; siendo el diagrama de reactancias después de la falla prácticamente el

continuación apéndice 2.

mismo que se tiene antes de la falla, provocando que la ecuación para la potencia eléctrica antes y después de la falla sea la misma.

$$P_{e1} = P_{e3} = 2,4638 \sin \delta \text{ pu}$$

Para determinar el ángulo máximo del rotor,  $\delta_{max}$ , en donde se iguala la potencia eléctrica con la potencia mecánica tras ser liberada la falla, recordar que esta es igual al ángulo de rotor inicial, pero tomando como referencia a  $\pi$ .

$$\begin{aligned}\delta_{max} &= \pi - 0,4179 \\ \delta_{max} &= 2,7236 \text{ rad} = 156,05^\circ\end{aligned}$$

Aplicando de nuevo el criterio de las áreas iguales, se puede determinar el ángulo crítico  $\delta_{cr}$  para liberar la falla bajo estas condiciones y desarrollando la integral:

$$\begin{aligned}\int_{0,4179}^{\delta_{cr}} (1,0)d\delta &= \int_{\delta_{cr}}^{2,7236} (2,4638 \sin \delta - 1,0)d\delta \\ \delta_{cr} - 0,4179 &= 2,4638[\cos \delta_{cr} - \cos(2,7236)] - (2,7236 - \delta_{cr}) \\ 2,4638 \cos \delta_{cr} &= 0,05402\end{aligned}$$

Posteriormente despejando el ángulo crítico, se tiene:

$$\begin{aligned}\delta_{cr} &= \cos^{-1}\left(\frac{0,05402}{2,4638}\right) \\ \delta_{cr} &= 1,5489 \text{ rad} = 88,74^\circ\end{aligned}$$

continuación apéndice 2.

Al igual que para el primer caso, aplicando la ecuación para determinar el tiempo crítico y sustituyendo valores, se obteniendo el ángulo y tiempo crítico para este segundo caso.

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4 \times 3,0 \times (1,5489 - 0,4179)}{2\pi \times 60 \times 1,0}}$$
$$t_{cr} = 0,1897 \text{ s}$$

Fuente: elaboración propia.

