

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA A UNA  
RED DE POTENCIA INFINITA EMPLEANDO SOLUCIÓN SIMULTÁNEA CON  
INTEGRACIÓN IMPLÍCITA EN JAVASCRIPT PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE  
ÁNGULO DE GRAN PERTURBACIÓN

ÓSCAR CAMACHO PARDO  
DIANA SOFÍA MENDOZA CONTRERAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA A UNA  
RED DE POTENCIA INFINITA EMPLEANDO SOLUCIÓN SIMULTÁNEA CON  
INTEGRACIÓN IMPLÍCITA EN JAVASCRIPT PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE  
ÁNGULO DE GRAN PERTURBACIÓN

*Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero(a) Electricista*

*Director*

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

*Profesor Titular Universidad Industrial De Santander*

*Doctor Ingeniero Electricista*

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2018

## *Agradecimientos*

*A mi Poder Superior que me permite estar escribiendo estas líneas.*

*A mis padres, Luz Margarita Contreras y German Andrés Mendoza, por su amor, apoyo y entrega para construir mi formación.*

*A mis hermanos, Leidy, Claudia, Andrés y a mi sobrina Analucía por su acompañamiento.*

*A mis amigos, Víctor Angarita, Sebastián Jaimes, Moisés Ruíz, Pedrito Acevedo y Julián Ferreira con quienes he construido un vínculo muy fuerte.*

*A mis compañeros de camino, que me han escuchado y ayudado en este proceso de formación.*

*A Jose Amador Lizarazo, por su ayuda y comprensión en especial en este trabajo.*

*A Julián David Cagua, participe de este sueño también.*

*Al profesor Hermann Vargas por su amistad y paciencia.*

*Al profesor Javier Solano por su ayuda, paciencia y amabilidad.*

***Diana Sofía Mendoza Contreras***

*A mis padres Cándido Camacho y Josefina Pardo, y mi hermano Diego, quienes me formaron con mucho amor y fe, y que a lo largo de mi vida me guiaron por el buen camino; a pesar de la distancia siempre confiaron en mí sin dudar y dieron lo mejor para mi crecimiento profesional.*

*A mi tía Isabel Pardo, por ser mi segunda madre. Gracias por aconsejarme, cuidarme y preocuparse por mí durante todo el tiempo que estuve lejos de mis padres.*

*A mis primos Sergio, Camilo y Matías, quienes de una u otra forma brindaron ese cariño y afecto que podría recibir de un hermano.*

*A mis amigos: María Angélica, Alejandra Rueda, Laura Vane, Daniel Camacho, Fabián León, Fabián Rueda, Julián Reyes, Fernando Sanjuan, Andrés Guerrero, Andrés Cediél, Anderson Areiza, y muchos más, gracias por brindarme su amistad y apoyo, por todas las experiencias vividas y momentos compartidos, y por siempre estar ahí en las buenas y en las malas.*

**Oscar Camacho Pardo**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN . . . . .	23
1 EL FENÓMENO DE ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA . . . . .	26
1.1 INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD ESTÁTICA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA . . . . .	27
1.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DINÁMICA DE GRAN PERTURBACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA . . . . .	30
1.3 SOLUCIÓN DEL CONJUNTO DE ECUACIONES DEL SISTEMA . . .	31
1.3.1 Solución simultánea con integración implícita mediante regla trapezoidal y método de Newton Raphson . . . . .	32
2 MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA . . . . .	35
2.1 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN SISTEMA DE POTENCIA . . . . .	35
2.2 REPRESENTACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA . . . . .	36
2.2.1 Ecuaciones de movimiento . . . . .	37
2.2.2 Ecuaciones del circuito del rotor . . . . .	38
2.2.3 Ecuaciones de tensión del estator . . . . .	39
2.2.4 Valores iniciales de variables del generador . . . . .	42
2.3 REPRESENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN . . . . .	42
2.3.1 Valores iniciales de los parámetros del sistema de excitación . . . . .	44
2.4 REPRESENTACIÓN DE LA SATURACIÓN MAGNÉTICA . . . . .	45
2.4.1 Saturación magnética . . . . .	45
2.4.2 Representación de saturación en estudios de estabilidad . . . . .	45
2.5 SOLUCIÓN DE ECUACIONES Y JACOBIANO DEL SISTEMA . . . . .	50
2.6 RED DE TRANSMISIÓN Y REPRESENTACIÓN DE LA CARGA . . .	50
2.6.1 Simulación de fallas . . . . .	52

3	IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS . . . . .	53
3.1	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL . . . . .	53
3.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CASO DE ESTUDIO . . . . .	54
3.2.1	Caso 1 . . . . .	58
3.2.2	Caso 2 . . . . .	58
3.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS NUMÉRICOS . . . . .	64
4	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS . . . . .	69
4.1	RESUMEN Y CONCLUSIONES . . . . .	69
4.2	SUGERENCIAS . . . . .	70
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	71
	ANEXOS . . . . .	73

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del generador del caso de estudio . . . . .	56
Tabla 2. Parámetros de saturación magnética en $pu$ . . . . .	56
Tabla 3. Parámetros del sistema de excitación en del caso de estudio . . . . .	57
Tabla 4. Parámetros del sistema de potencia en $pu$ . . . . .	77
Tabla 5. Parámetros de saturación magnética en $pu$ . . . . .	77
Tabla 6. Parámetros del generador . . . . .	78
Tabla 7. Parámetros del sistema de excitación . . . . .	78
Tabla 8. Parámetros de condiciones operativas de pre-falla . . . . .	79
Tabla 9. Parámetros de tiempos de falla en segundos . . . . .	79
Tabla 10. Parámetros de simulación en segundos . . . . .	79
Tabla 11. Valores típicos de los parámetros del generador . . . . .	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Máquina conectada a barra infinita . . . . .	25
Figura 2. Representación del sistema con el modelo clásico del generador . . . . .	26
Figura 3. Relación entre potencia y ángulo del rotor . . . . .	27
Figura 4. Modelado del sistema de potencia para el análisis de estabilidad tran- sitoria. . . . .	34
Figura 5. Circuito equivalente de los ejes $d$ y $q$ . . . . .	35
Figura 6. Transformación de eje de referencia y definición de ángulo del rotor. . . . .	38
Figura 7. Sistema de excitación con $AVR$ y $PSS$ . . . . .	41
Figura 8. Características de circuito abierto que presenta los efectos de saturación. . . . .	45
Figura 9. Características de saturación magnética de la máquina síncrona. . . . .	46
Figura 10. Circuito equivalente con las componentes del flujo resultante en el entrehierro. . . . .	47
Figura 11. Funcionamiento de la herramienta DINAMIC MS . . . . .	53
Figura 12. Sistema ejemplo caso de estudio . . . . .	54
Figura 13. Ángulo del rotor . . . . .	56
Figura 14. Desviación del ángulo del rotor . . . . .	57
Figura 15. Torque eléctrico . . . . .	57
Figura 16. Tensión en terminales del generador . . . . .	58
Figura 17. Tensión de excitación . . . . .	58
Figura 18. Ángulo del rotor con tiempo de despeje de 0,08 s . . . . .	59
Figura 19. Ángulo del rotor con tiempo de despeje de 0,1 s . . . . .	59
Figura 20. Torque eléctrico con tiempo de despeje de 0,08 s . . . . .	60
Figura 21. Torque eléctrico con tiempo de despeje de 0,1 s . . . . .	60

Figura 22. Tensión en terminales del generador con tiempo de despeje de 0,08 s	61
Figura 23. Tensión en terminales del generador con tiempo de despeje de 0,1 s	61
Figura 24. Ángulo del rotor, herramienta HAGP	63
Figura 25. Ángulo del rotor, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]	63
Figura 26. Potencia activa en terminales del generador, herramienta HAGP	64
Figura 27. Potencia activa en terminales del generador, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]	64
Figura 28. Tensión en terminales del generador, herramienta HAGP	65
Figura 29. Tensión en terminales del generador, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]	65
Figura 30. Tensión de excitación, herramienta HAGP	66
Figura 31. Tensión de excitación, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]	66
Figura 32. Entorno inicial de la herramienta virtual DINAMIC MS	72
Figura 33. Menú desplegable principal de DINAMIC MS	73
Figura 34. Selección de modelo de máquina síncrona	73
Figura 35. Entorno general de modelo con AVR y PSS	74
Figura 36. Ejemplo de archivo .txt para ingreso de datos numéricos	79
Figura 37. Ingreso de datos con un documento .txt	80
Figura 38. Tipo de gráfica a visualizar para modelo clásico, modelo con AVR y modelo con AVR y PSS	81
Figura 39. Tipo de gráfica a visualizar para todos los modelos	81
Figura 40. Opción de Graficar y Restaurar todos los parámetros	81
Figura 41. Opción de guardar la gráfica obtenida	82
Figura 42. Descargar gráfica en formato png	82
Figura 43. Estructura de DINAMIC MS	86

## LISTA DE ANEXOS

A. DINAMIC MS, MANUAL DEL USUARIO .....	70
B. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DINAMIC MS .....	82

## GLOSARIO

**BARRA INFINITA:** idealización de un sistema de potencia, donde la tensión y frecuencia son constantes y están impuestas por la red.

**ESTABILIDAD TRANSITORIA:** capacidad del sistema de potencia de mantenerse en sincronismo cuando es sometido a grandes perturbaciones.

**ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTENCIA:** control suplementario al sistema de excitación para amortiguar los efectos de las oscilaciones que se presentan cuando se producen perturbaciones en el sistema.

**HTML:** es el elemento de construcción usado para crear y representar visualmente una página web, este determina el contenido de la página web, mas no su funcionalidad.

**JAVASCRIPT:** lenguaje de programación robusto aplicado a un documento HTML y usado para crear interactividad dinámica en los sitios web.

**MÉTODO NUMÉRICO:** rama de las matemáticas encargada de diseñar algoritmos para, a través de números y reglas matemáticas simples, simular procesos matemáticos más complejos aplicados a procesos del mundo real.

PERTURBACIÓN: cambio en el comportamiento estable del sistema.

REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSIÓN: dispositivo que regula la tensión de salida independientemente de la carga con respecto a la entrada, es decir controla el campo magnético del rotor.

SATURACIÓN MAGNÉTICA: es la unidad más allá de la cual la densidad de flujo magnético en un área magnética no aumenta considerablemente así se incrementa la fuerza magnetomotriz.

TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO: es la respuesta instantánea de un sistema eléctrico debido a un cambio repentino de su estado inicial, causado por maniobras dentro este, por fallas o descargas atmosféricas sobre un elemento que lo conforma.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a, b, c$ (subíndice)	Denota cantidades de las fases de armadura
$d$ (subíndice)	Denota cantidades de eje directo
$e$ (subíndice)	Denota cantidades eléctricas
$fd$ (subíndice)	Denota cantidades del devanado de excitación
$kd$ (subíndice)	Denota cantidades del k-ésimo circuito amortiguador de eje directo
$kq$ (subíndice)	Denota cantidades del k-ésimo circuito amortiguador del eje en cuadratura
$m$ (subíndice)	Denota cantidades mecánicas
$nd$ (subíndice)	Denota cantidades del n-ésimo circuito amortiguador de eje directo
$nq$ (subíndice)	Denota cantidades del n-ésimo circuito amortiguador del eje en cuadratura
$o$ (subíndice)	Denota valores nominales
$pl$ (subíndice)	Denota cantidades que representan el flujo común a los circuitos del rotor de eje directo
$q$ (subíndice)	Denota cantidades del eje en cuadratura
$s$ (subíndice)	Denota cantidades del estator

$t$ (subíndice)	Denota cantidades en terminales del generador
$0$ (subíndice)	Denota valores iniciales
$k$ (subíndice)	Denota k-ésima iteración del Método de Newton
' (superíndice)	Denota cantidades del periodo transitorio
'' (superíndice)	Denota cantidades del periodo subtransitorio
$\Delta$	Incremento
$\delta$	Ángulo del rotor medido con respecto a una referencia que gira a velocidad sincrónica
$\alpha$	Ángulo del rotor medido sobre la periferia con respecto al eje directo
$\phi_f$	Flujo magnético producido por el devanado de campo
$\varphi$	Ángulo de desfasaje de onda de tensión
$\psi$	Flujo magnético ligado
$\omega$	Velocidad o frecuencia angular
$^\circ$	Grado sexagesimal
<b>f</b>	Vector de derivadas de las variables de estado del sistema
<b>i</b>	Vector de corrientes del sistema
<b>v</b>	Vector de tensiones del sistema

$\mathbf{x}$	Vector de estado del sistema
$\mathbf{y}$	Vector de estado
$\mathbf{z}$	Vector cualquiera
$\mathbf{E}$	Fasor de tensión
$\mathbf{I}$	Fasor de corriente de barra
$E$	Magnitud de fasor de tensión
$E_t$	Magnitud de fasor de tensión en terminales del generador
$E_B$	Magnitud de fasor de tensión en barras del sistema
$\mathbf{E}_I$	Componente imaginaria de fasor de tensión de barra
$\mathbf{E}_R$	Componente real de fasor de tensión de barra
$I$	Magnitud de fasor de corriente de barra
$\mathbf{I}_I$	Componente imaginaria de fasor de corriente de barra
$\mathbf{I}_R$	Componente real de fasor de corriente de barra
$J$	Momento de inercia
$K$	Ganancia
$K_D$	Coefficiente de torque amortiguado
$K_{sd}$	Factor de saturación de eje directo

$K_{sq}$	Factor de saturación de eje en cuadratura
$L$	Inductancia
$fmm$	Fuerza magnetomotriz
$P$	Potencia activa
$pu$	Por unidad
$Q$	Potencia reactiva
$R$	Resistencia
$T$	Par
$T$	Constante de tiempo
$X$	Reactancia
$X_d$	Reactancia Transitoria
$kV$	Kilovolt
MVA	Megavoltamper
MW	Megawatt
$Hz$	Hertz
$s$	Segundo
AVR	Regulador automático de tensión
PSS	Estabilizador del sistema de potencia
$e$	Tensión instantánea
$i$	Corriente instantánea

$l$	Inductancia variante en el tiempo
$p$	Derivada con respecto a el tiempo
$pf$	Número de polos magnéticos del rotor
$S$	Operador de Laplace
$t$	Tiempo
$x$	Variable cualquiera
$\mathbf{A}_D$	Partición del Jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto a variables de estado
$\mathbf{B}_D$	Partición del Jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto a tensiones
$\mathbf{C}_D$	Partición del Jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a variables de estado
$\mathbf{F}$	Vector de ecuaciones dinámicas
$\mathbf{G}$	Vector de ecuaciones de red
$\mathbf{J}$	Jacobiano
$\mathbf{Y}$	Matriz de admitancias de la red de sistema.

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA A UNA RED DE POTENCIA INFINITA EMPLEANDO SOLUCIÓN SIMULTÁNEA CON INTEGRACIÓN IMPLÍCITA EN JAVASCRIPT PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE ÁNGULO DE GRAN PERTURBACIÓN<sup>1</sup>.

**AUTORES:** OSCAR CAMACHO PARDO,  
DIANA SOFÍA MENDOZA CONTRERAS<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** MÁQUINA SÍNCRONA, ESTABILIDAD DE ÁNGULO, GRAN PERTURBACIÓN, MÉTODO INTEGRACIÓN IMPLÍCITA, JAVASCRIPT.

### DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de grado, se desarrolló una herramienta software en JavaScript titulada DINAMIC MS. Ésta fue diseñada para modelar y simular una máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita, con el propósito de realizar estudios de estabilidad de ángulo ante una gran perturbación, permitiendo analizar en qué tiempo y bajo qué variables eléctricas del sistema (ángulo del rotor, desviación de velocidades rotóricas, torque eléctrico, tensión en barras del sistema y tensión de excitación del generador) una determinada máquina puede salir de sincronismo.

Se implementaron 3 modelos de máquina con su respectivo control de excitación: control manual, control con regulador automático de tensión (AVR) y control con AVR y estabilizador del sistema de potencia (PSS). En cada caso, se plantearon las correspondientes expresiones algebraicas y diferenciales del sistema, las cuales fueron solucionadas a través del método de integración implícita.

La herramienta tiene como propósito realizar estudios de estabilidad a través de un medio de fácil acceso como lo es una página web, implementando algoritmos en JavaScript. Esto permite al usuario el fácil ingreso y/o modificación tanto de los parámetros del sistema como de las diversas gráficas de las variables eléctricas ya mencionadas.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Hermann Raúl Vargas Torres.

## ABSTRACT

**TITLE:** SYNCHRONOUS MACHINE'S MODELING AND SIMULATION CONNECTED TO AN INFINITE BUS USING SIMULTANEOUS SOLUTION WITH IMPLICIT INTEGRATION IN JAVASCRIPT TO STABILITY STUDIES IN ANGLE OF LARGE DISTURBANCE<sup>1</sup>.

**AUTHORS:** OSCAR CAMACHO PARDO,  
DIANA SOFÍA MENDOZA CONTRERAS<sup>2</sup>.

**KEYWORDS:** SYNCHRONOUS MACHINE, ANGLE STABILITY, GREAT PERTURBATION, IMPLICIT INTEGRATION METHOD, JAVASCRIPT.

### DESCRIPTION:

In this work, a software tool was developed in JavaScript entitled DINAMIC MS. This tool was designed to model and simulate a synchronous machine connected to an infinite bus, with the purpose of performing angle stability studies before a large disturbance, allowing to analyze in what moment and under what electrical system variables (rotor angle, deviation of rotor speeds, electrical torque, system bar voltage and generator excitation voltage) a certain machine can go out of synchronism.

Three machine models were implemented with their respective excitation control: manual control, control with automatic voltage regulator (AVR) and control with AVR and power system stabilizer (PSS). In each case, the corresponding algebraic and differential expressions of the system were proposed, which were solved through the implicit integration method.

The purpose of the tool is to carry out such studies through an easily accessible medium such as a web page, implementing algorithms in JavaScript. This allows the user to easily enter and / or modify both the system parameters and the various graphs of the electrical variables already mentioned.

---

<sup>1</sup> Research work

<sup>2</sup> Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications engineering. Advisor: Hermann Raúl Vargas Torres.

## INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se plantea el problema, los objetivos del trabajo y una breve descripción de la forma como se encuentra organizado el documento.

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estabilidad transitoria es la capacidad del sistema de potencia de mantenerse en sincronismo cuando se somete a grandes perturbaciones. Dependiendo del tipo de perturbación, el sistema responde de diferentes maneras, involucrando variaciones en el ángulo del rotor, el flujo de potencia y la modulación de las diferentes tensiones en barras. Para el análisis de la estabilidad transitoria de un sistema de potencia, se emplean cálculos computacionales con el fin de observar la respuesta dinámica del sistema ante grandes perturbaciones.

Dentro de estos estudios se analiza la estabilidad de ángulo, la cual hace referencia a la capacidad de las máquinas síncronas de mantener el sincronismo luego de experimentar una gran perturbación. Dependiendo del tipo de perturbación, se puede hacer el estudio de la estabilidad de ángulo en dos categorías: estabilidad de pequeña perturbación y estabilidad de gran perturbación. Al igual que el análisis de la estabilidad transitoria de un sistema de potencia, también se hace necesario el uso de herramientas de cálculo tales como el método de integración implícita, ya que es una forma de representar simultáneamente dinámicas rápidas y lentas.

Anteriormente se han realizado herramientas computacionales sencillas y eficientes que permiten desarrollar el estudio de estabilidad antes mencionado. En torno a esta necesidad, el Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) de la Univer-

sidad Industrial de Santander (UIS) ha venido desarrollando algoritmos en MATLAB con el fin de dar solución a dicha problemática.

Bajo esta condición, el GISEL quiere aprovechar la experiencia de estos estudios para implementar una página web, con algoritmos desarrollados en JavaScript que permitan realizar los análisis de la respuesta dinámica de la máquina síncrona (ángulo del rotor, desviación de velocidades rotóricas, torque eléctrico, tensión en terminales del generador y tensión de excitación del generador) ante una gran perturbación.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo consiste en modelar y simular la máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita empleando solución simultánea con integración implícita en JavaScript para estudios de estabilidad de ángulo de gran perturbación. Para el pleno desarrollo del objetivo general, es necesario el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. Conocer los modelos de la máquina síncrona.
2. Implementar los modelos de la maquina síncrona usando JavaScript.
3. Aplicar la herramienta elaborada en JavaScript para comparar los resultados numéricos obtenidos con los que arroja la Herramienta para Análisis de Gran Perturbación (HAGP)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>RODRÍGUEZ SIERRA, Carlos. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: Diseño y elaboración.*, Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2003.

## ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento está organizado en 3 capítulos y 2 apéndices. En el capítulo 1 se presenta información detallada del fenómeno de la estabilidad en los sistemas de potencia. El capítulo 2 describe el modelado de un sistema eléctrico de potencia, también incluye la representación de la máquina síncrona, los diferentes sistemas de excitación y el efecto de saturación magnética.

En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos a través del uso de la herramienta desarrollada en JavaScript titulada DINAMIC MS. Además, se comparan resultados obtenidos con la herramienta HAGP desarrollada por el GISEL y con los resultados expuestos en capítulo 13 del libro *Power System Stability and control* de Prabha Kundur<sup>2</sup>.

El apéndice A presenta el manual de usuario de la herramienta DINAMIC MS. En él se describen los requisitos de instalación, ejecución, métodos para el ingreso de datos, descripción de parámetros de entrada y los diferentes tipos de gráficas a visualizar. Por último, en el apéndice B se describe el proceso y los recursos empleados para el desarrollo de la herramienta software DINAMIC MS a través de JavaScript.

---

<sup>2</sup>KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958

## 1. EL FENÓMENO DE ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Los sistemas de potencia tienen como fin satisfacer la demanda de energía eléctrica a una gran cantidad de usuarios distribuidos en una zona extensa. Tales sistemas cuentan con elementos que producen energía eléctrica, la transportan y distribuyen, elementos que garantizan el buen funcionamiento del sistema, y aparatos de uso doméstico, comercial e industrial. Debido a las características de los elementos mencionados, los sistemas eléctricos de potencia son sistemas dinámicos de alta complejidad y no linealidad.

La estabilidad de un sistema de potencia se puede definir en términos generales como aquella propiedad que tiene el sistema, cuando se encuentra en un estado de equilibrio determinado, de regresar al estado original o alcanzar un nuevo estado de equilibrio aceptable, luego de experimentar una perturbación. La estabilidad depende del estado inicial del sistema y de la perturbación a la que sea sometido.

La necesidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica bajo estándares de calidad, exige que los sistemas eléctricos de potencia tengan un desempeño adecuado cuando experimentan perturbaciones. Concretamente se requiere que el sistema mantenga la estabilidad ante determinado tipo de contingencias específicas, tales como fallas en los elementos del sistema de origen interno o externo y cambios en la demanda. El análisis de estabilidad es el eje central de la teoría de sistemas dinámicos. La estabilidad de un sistema dinámico puede determinarse mediante la solución numérica de las ecuaciones que describen su comportamiento o mediante la aplicación de un método analítico directo.

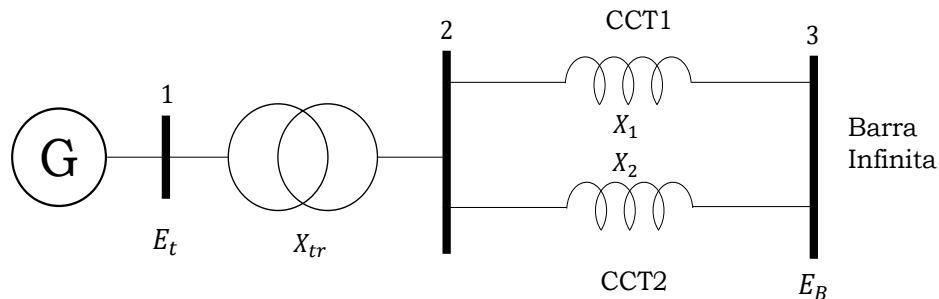
## 1.1 INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD ESTÁTICA EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

La estabilidad transitoria es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando es sometido a grandes perturbaciones.

Para estudiar la estabilidad transitoria en este trabajo de grado, se considerará el sistema mostrado en la figura 1 constituido por un generador que entrega potencia a un gran sistema eléctrico representado en una barra infinita a través de dos líneas de transmisión. La barra infinita consiste en una fuente de tensión de magnitud y frecuencia constante.

El efecto de las resistencias en el sistema se considera despreciable, al igual que el efecto de la velocidad del gobernador. Además, se representa al generador mediante el modelo clásico de la máquina síncrona. La tensión inducida y la reactancia transitoria

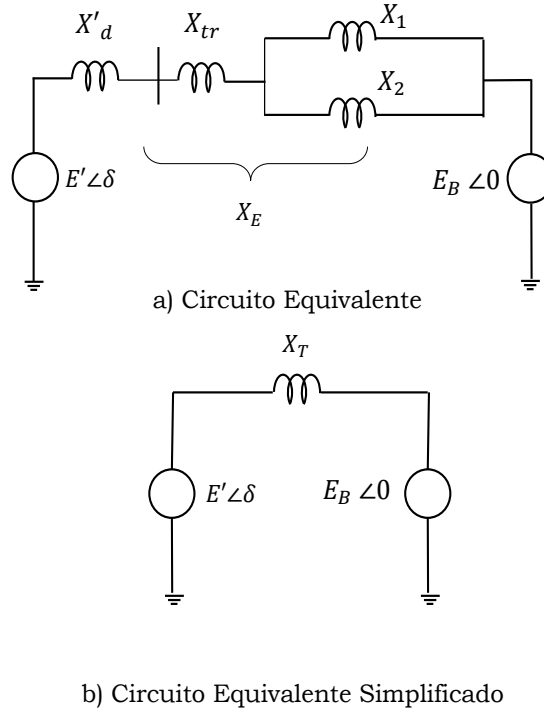
**Figura 1.** Máquina conectada a barra infinita



se denotan por  $E'$  y  $X_d$  respectivamente. El ángulo  $\delta$  representa el ángulo por el que  $E'$  adelanta a la tensión en la barra infinita  $E_B$ . Cuando ocurre una falla, la magnitud de  $E'$  permanece constante en su valor de pre-falla y la magnitud del ángulo  $\delta$  varía de acuerdo con la desviación de la velocidad del rotor con respecto a la de sincronismo  $\omega_0$ .<sup>1</sup> El circuito equivalente simplificado del sistema se puede observar en la figura 2 y se representa a través de diversas ecuaciones matemáticas. La potencia eléctrica de

<sup>1</sup>KUNDUR, Op. Cit., P. 828

**Figura 2.** Representación del sistema con el modelo clásico del generador



salida del generador es:

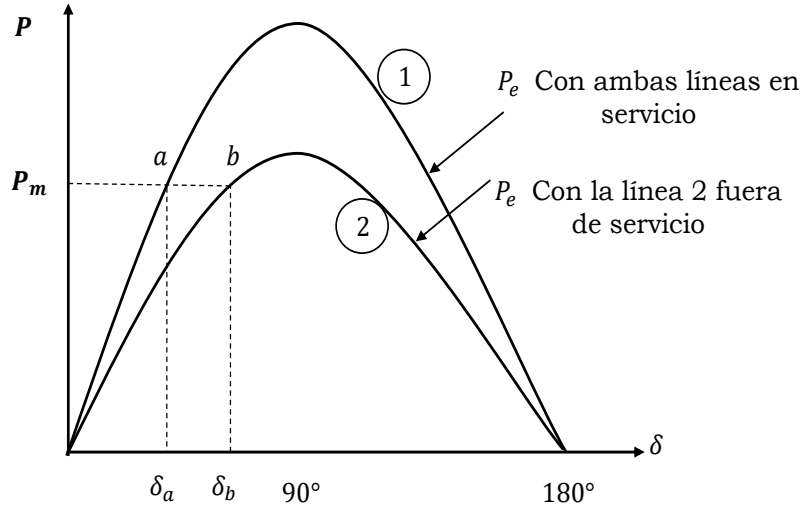
$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \text{Sen} \delta = P_{max} \text{Sen} \delta \quad (1.1)$$

Donde

$$P_{max} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (1.2)$$

Debido a que la resistencia del estator se desprecia,  $P_e$  representa tanto la potencia en el entrehierro como la potencia en terminales. La relación entre la potencia y el ángulo del rotor del circuito de potencia con ambas líneas en servicio se muestra en la figura 3 a través de la curva 1. Además, con la potencia mecánica de entrada igual a  $P_m$  en condiciones de estado estable, la potencia eléctrica de salida  $P_e$  es igual a  $P_m$  y el punto de operación se representa en el punto  $a$  de la curva, con un ángulo del rotor correspondiente a  $\delta_a$ . Si una de estas líneas está fuera de servicio, la reactancia

**Figura 3.** Relación entre potencia y ángulo del rotor



efectiva  $X_T$  es mayor. La potencia máxima tiene un menor valor. La relación entre potencia  $P$  y el ángulo  $\delta$  con la línea 2 fuera de servicio se muestra en la figura 3 a través de la curva 2. Con una potencia mecánica de entrada igual a  $P_m$ , el ángulo del rotor correspondiente es  $\delta_b$  asociado con el punto de operación  $b$  en la curva 2. Al tener una reactancia más grande, el ángulo del rotor debe ser mayor para lograr transmitir la misma potencia que en condiciones de estado estable.

Durante la perturbación, la oscilación de  $\delta$  se impone sobre la velocidad de sincronismo  $\omega_0$ , pero la desviación de la velocidad  $\Delta\omega = d\delta/dt$  es mucho más pequeña que  $\omega_0$ . Por esta razón, la velocidad del generador  $\omega_r$  es aproximadamente igual a  $\omega_0$  y el valor del par del entrehierro en por unidad puede ser considerado igual a la potencia del entrehierro en por unidad, reflejando lo dicho en la ecuación de movimiento o ecuación de oscilación, la cual está determinada por:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \text{Sen}\delta \quad (1.3)$$

Donde,

$P_m$ : Potencia mecánica de entrada en pu.

$P_{max}$ : Máxima potencia eléctrica de salida en pu.

$H$ : Constante de inercia  $MW_s/MVA$ .

$\delta$ : Ángulo del rotor en radianes eléctricos.

$t$ : tiempo en segundos ( $s$ ).

## 1.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DINÁMICA DE GRAN PERTURBACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia es un sistema dinámico no lineal, por esto su respuesta ante la ocurrencia de una perturbación grande no se puede determinar mediante la linealización de las ecuaciones que describen su comportamiento. Dichas ecuaciones se resuelven a partir de condiciones iniciales, mediante la implementación de métodos numéricos que permitan determinar con exactitud la respuesta del sistema. Aplicando este tipo de procedimiento, se determina la evolución en el tiempo de los ángulos de los rotores de las máquinas, las desviaciones de velocidades rotóricas, el torque eléctrico, la tensión en terminales del generador y tensión de excitación de la máquina, entre otras variables, con el fin de observar si el sistema se mantiene en sincronismo.

El comportamiento de los elementos dinámicos, como en el caso de un generador se puede modelar en el espacio de estados por medio de ecuaciones diferenciales.

$$\dot{\mathbf{Y}} = f(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (1.4)$$

En la ecuación (1.4)  $\mathbf{y}$  es el vector de estado y el vector  $\mathbf{z}$  incluye otras variables del sistema (generalmente, la tensión en los terminales). Sin embargo, la interconexión de la máquina a la barra a través de la red se modela por medio de ecuaciones algebraicas no lineales de la forma:

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (1.5)$$

Los dos conjuntos de ecuaciones, diferenciales y algebraicas forman el sistema algebraico diferencial de primer orden. Este se resuelve a partir de condiciones iniciales que permiten obtener la respuesta en el tiempo del sistema. El análisis de gran perturbación es complejo desde el punto de vista computacional, debido a los grandes sistemas de ecuaciones que deben resolverse, utilizando pasos de tiempo pequeños para evitar errores y problemas de estabilidad numérica.

### 1.3 SOLUCIÓN DEL CONJUNTO DE ECUACIONES DEL SISTEMA

Las ecuaciones de cada generador se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d) \quad (1.6)$$

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{g}_d(\mathbf{x}_d, V_d) \quad (1.7)$$

Donde,

$\dot{\mathbf{x}}_d$ : Vector de estado de la máquina.

$\mathbf{I}_d$ : Componentes reales e imaginarias de la corriente de inyección a la red.

$\mathbf{V}_d$ : Componentes imaginarias de tensión en la barra.

Las ecuaciones generales del sistema, incluyendo las ecuaciones diferenciales (1.6) para todos los dispositivos y las ecuaciones algebraicas combinadas de los mismos (1.7) se expresan de la siguiente forma general que comprende un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden <sup>2</sup>.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \quad (1.8)$$

---

<sup>2</sup>KUNDUR, Op. Cit., P. 861 872

Y un conjunto de ecuaciones algebraicas

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V} \quad (1.9)$$

Con un conjunto de valores iniciales conocidos donde:

$\mathbf{Y}_N$ : Matriz de admitancias que representa las ecuaciones de la red.

$\mathbf{x}$ : vector de estado del sistema.

$\mathbf{I}$ : Componentes  $R - I$  de inyección de corriente al sistema.

$\mathbf{V}$ : Componentes  $R - I$  de tensiones en las barras.

### 1.3.1 Solución simultánea con integración implícita mediante regla trapezoidal y método de Newton Raphson

El estado de las variables y las variables del sistema se resuelven simultáneamente. A continuación, se realiza una ilustración empleando la regla trapezoidal. Con  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_n$  y  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_n$  en  $t = t_n$ , la solución de  $\mathbf{x}$  en  $t = t_{n+1} = t_n + \Delta t$  se da mediante la aplicación de la regla trapezoidal.

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \quad (1.10)$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1} \quad (1.11)$$

Igualando las anteriores expresiones a cero y definiéndolas como los vectores  $\mathbf{F}$  y  $\mathbf{G}$  se obtiene:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)] \quad (1.12)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) \quad (1.13)$$

Los valores desconocidos de  $\mathbf{x}_{n+1}$  y  $\mathbf{V}_{n+1}$  deben satisfacer las siguientes condiciones:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0 \quad (1.14)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0 \quad (1.15)$$

Para resolver las ecuaciones se emplea el método de Newton, el cual puede ser escrito para la iteración  $(k + 1)$  como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \mathbf{V}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{V}_{n+1}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Para obtener los valores de  $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$  y  $\Delta \mathbf{V}_{n+1}^k$  se resuelve la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{x}_{n+1}^k) \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{x}_{n+1}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

De acuerdo con la ecuación anterior, el Jacobiano se calcula en  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{n+1}$  y  $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{n+1}$ .

El Jacobiano tiene la siguiente estructura:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_D & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D) \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Donde las matrices  $\mathbf{A}_D$ ,  $\mathbf{B}_D$ ,  $\mathbf{C}_D$ ,  $\mathbf{Y}_D$  están asociadas con los modelos dinámicos de los dispositivos y cargas estáticas no lineales. Para un sistema con  $m$  dispositivos la estructura matricial es la siguiente:

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} A_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & A_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} B_{d1} \\ B_{d2} \\ \vdots \\ B_{dm} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} C_{d1} & C_{d2} & \cdots & C_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_D = \begin{bmatrix} Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Y_{dm} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

La solución de las ecuaciones (1.14) y (1.15) se puede expresar en términos matriciales como:

$$\mathbf{A}_D \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k = -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{V}_{n+1}^k) \quad (1.21)$$

$$\mathbf{C}_D \Delta x_{n+1}^k + (\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D) \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k = -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{V}_{n+1}^k) \quad (1.22)$$

A partir de estas ecuaciones, es posible hallar  $\mathbf{x}_{n+1}^k$  y  $\mathbf{V}_{n+1}^k$  teniendo en cuenta:

$$\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k = -\mathbf{A}_D^{-1} [\mathbf{F}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k] \quad (1.23)$$

$$(\mathbf{Y}_N + \mathbf{Y}_D - \mathbf{Y}_N \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{B}_D) \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k = -\mathbf{G}_{n+1}^k + \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{F}_{n+1}^k \quad (1.24)$$

Finalmente, teniendo estos valores se hallan  $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$  y  $\Delta \mathbf{V}_{n+1}^{k+1}$  a partir de la ecuación (1.16). Se debe tener en cuenta que el procedimiento anterior es válido cuando las funciones  $\mathbf{F}$  y  $\mathbf{G}$  son diferenciables. Cuando ocurre una discontinuidad tal como una falla u operación de interruptores, solamente se resuelven las ecuaciones de la red para corregir los valores del vector  $\mathbf{V}$  en el instante que ocurre la perturbación. En el vector de estado  $\mathbf{x}$  no se realizan modificaciones, continúa con el proceso de integración implícita.

## 2. MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

En este capítulo se describen los constituyentes mínimos de un sistema eléctrico de potencia básico, tales como el generador, el sistema de transmisión y la carga. Dada su importancia se hará énfasis en el modelado del generador.

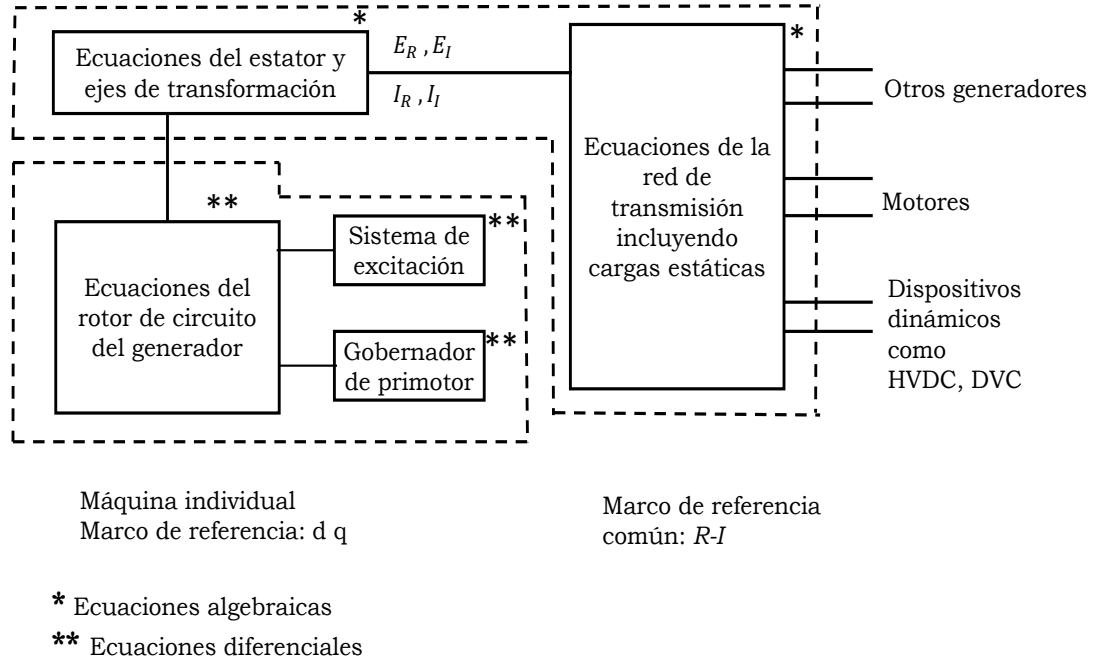
### 2.1 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN SISTEMA DE POTENCIA

El análisis de la estabilidad transitoria en un sistema de potencia requiere calcular su dinámica no lineal como respuesta a grandes perturbaciones, usualmente una falla en el sistema de transmisión, seguida del aislamiento en el elemento fallado actuado por el relé de protección. En la figura 4 se muestra la estructura general del modelado del sistema de potencia aplicable al análisis de estabilidad transitoria. Cabe destacar que la representación del sistema de potencia como un conjunto, incluye modelos para cada uno de sus componentes de manera individual:

- Generadores síncronos asociados al sistema de excitación y al primotor.
- Sistema de transmisión e interconexión, incluyendo cargas estáticas.
- Cargas de motores síncronos y de inducción.
- Otros dispositivos como convertidores y compensadores.

El modelo usado para cada componente debe ser apropiado para el análisis de la estabilidad transitoria, y el sistema de ecuaciones se debe organizar en una forma adecuada para aplicar métodos numéricos.

**Figura 4.** Modelado del sistema de potencia para el análisis de estabilidad transitoria.



FUENTE: KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw Hill, ISBN 0 07 035958. Traducida por los autores.

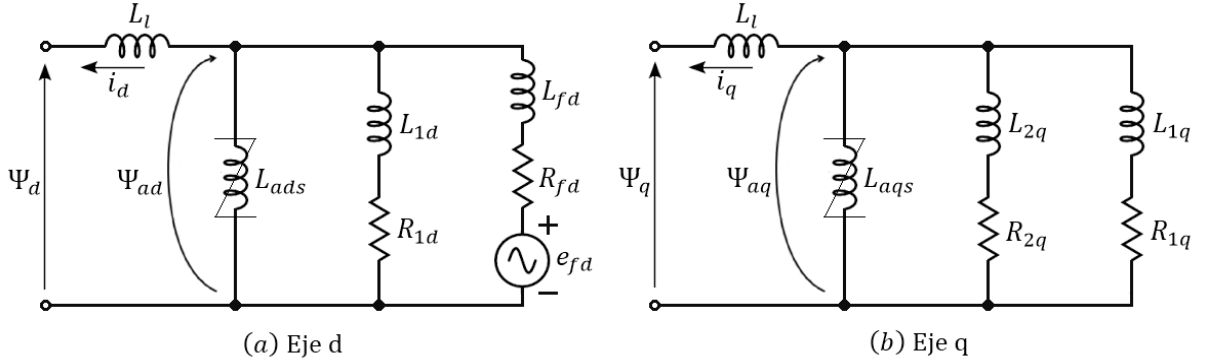
Como se verá a continuación, el modelo completo del sistema consiste en un gran conjunto de ecuaciones diferenciales y un conjunto de ecuaciones algebraicas. La estabilidad transitoria es entonces un problema algebraico-diferencial de valor inicial.

## 2.2 REPRESENTACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

Para ilustrar la implementación del modelo del generador en el análisis de estabilidad transitoria, se asume que el generador se representa por un modelo con un devanado de eje directo (eje  $d$ ) y dos devanados amortiguadores (eje  $q$ ) como se muestra en la figura 5.

Sin embargo, las ecuaciones presentadas se pueden modificar fácilmente, teniendo en

**Figura 5.** Circuito equivalente de los ejes  $d$  y  $q$



cuenta un número arbitrario de devanados amortiguadores. El siguiente es un resumen de las ecuaciones de la máquina síncrona como un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, con el tiempo en segundos y el ángulo  $\delta$  en radianes eléctricos y las otras cantidades en por unidad.

**2.2.1 Ecuaciones de movimiento** Ecuaciones que describen la dinámica oscilatoria de la máquina

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r) \quad (2.1)$$

$$\rho\delta = \omega_o\Delta\omega_r \quad (2.2)$$

Donde

$\omega_o$  :  $2\pi f_0$  radianes eléctricos /s

$\Delta\omega_r$ : variación de la velocidad del rotor en pu

$p$ : operador derivada  $d/dt$

$T_e$ : torque eléctrico en pu

$T_m$ : torque mecánico en pu

$K_D$ : factor de amortiguamiento en pu

**2.2.2 Ecuaciones del circuito del rotor** Con la corriente del rotor expresada en términos del flujo ligado mutuo, las ecuaciones dinámicas del rotor son:

$$p\psi_{fd} = \omega_0 \left[ e_{fd} + \frac{(\psi_{ad} - \psi_{fd}) R_{fd}}{L_{fd}} \right] \quad (2.3)$$

$$p\psi_{1d} = \omega_0 \left[ \frac{\psi_{ad} - \psi_{1d}}{L_{1d}} \right] R_{1d} \quad (2.4)$$

$$p\psi_{1q} = \omega_0 \left[ \frac{\psi_{ad} - \psi_{1q}}{L_{1q}} \right] R_{1q} \quad (2.5)$$

$$p\psi_{2q} = \omega_0 \left[ \frac{\psi_{ad} - \psi_{2q}}{L_{2q}} \right] R_{2q} \quad (2.6)$$

Los flujos ligados mutuos entre el estator y el rotor y los ejes  $d$  y  $q$  están dados por:

$$\psi_{ad} = -L_{ads}i_d + L_{ads}i_{fd} + L_{ads}i_{1d} = L''_{ads} \left( -i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \quad (2.7)$$

$$\psi_{aq} = L''_{aqs} \left( -i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \quad (2.8)$$

Donde las inductancias se obtienen a partir de las expresiones (2.9) y (2.10). Aquí  $L_{ads}$  y  $L_{aqs}$  son los valores saturados de los parámetros de inductancia mutua de los ejes directo y de cuadratura dadas por las ecuaciones (2.11) y (2.12), donde  $K_{sd}$  y  $K_{sq}$  son los factores de saturación, determinados como una función del flujo ligado  $\psi_{at}$ .

$$L''_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \quad (2.9)$$

$$L''_{aqs} = \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}} \quad (2.10)$$

$$L_{ads} = K_{sd}L_{adu} \quad (2.11)$$

$$L_{aqs} = K_{sq}L_{aqu} \quad (2.12)$$

**2.2.3 Ecuaciones de tensión del estator** En estas ecuaciones se desprecian los transitorios en el estator de la máquina ( $p\psi_d, p\psi_q$ ). Los transitorios de la red no se pueden despreciar a menos que se desprecien los transitorios en el estator de la máquina. Cuando se incluyen los transitorios de la red se incrementa el orden del modelo del sistema considerablemente y por lo tanto limita el tamaño del sistema que se puede simular.

También se desprecia el efecto de las variaciones de velocidad en las tensiones del estator. Los cambios de velocidad son pequeños y no tienen efecto significativo en la tensión del estator. El valor en por unidad de  $\omega_r$  es igual a 1,0 en las ecuaciones de tensión del estator. Las ecuaciones de tensión del estator vienen dadas por:

$$e_d = -R_a i_d + (\bar{\omega} L_d'') i_q + E_d'' \quad (2.13)$$

$$e_q = -R_a i_q - (\bar{\omega} L_d'') i_d + E_q'' \quad (2.14)$$

Donde,

$$E_d'' = -\bar{\omega} L_{aqs}'' \left( \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \quad (2.15)$$

$$E_q'' = \bar{\omega} L_{ads}'' \left( \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \quad (2.16)$$

$$L_d'' = L_l + L_{ads}'' \quad (2.17)$$

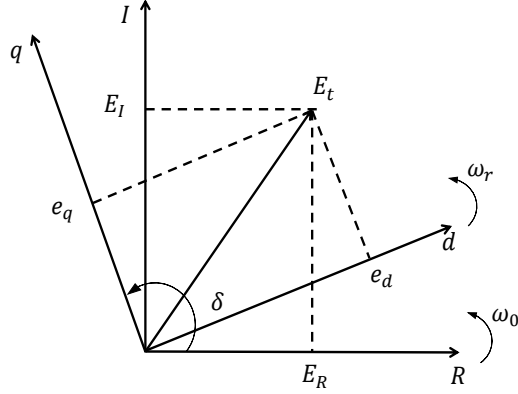
$$L_q'' = L_l + L_{aqs}'' \quad (2.18)$$

Desde que se despreció el efecto de las variaciones de velocidad en la tensión del estator  $\bar{\omega} = \omega/\omega_o = 1$  en las ecuaciones anteriores. Consecuentemente,  $\bar{\omega} L_d'' = X_d''$  y  $\bar{\omega} L_q'' = X_q''$ .

Estas ecuaciones se emplean para realizar la transformación del eje directo y eje en cuadratura de la máquina síncrona en ejes de referencia común  $R-I$ . En la figura 6, se muestran las relaciones empleadas para transformar variables de un marco de referencia

a otro. El eje real  $R$  de referencia común se emplea también para referir medida del ángulo del rotor  $\delta$  para cada máquina.

**Figura 6.** Transformación de eje de referencia y definición de ángulo del rotor.



Las ecuaciones de transformación de la tensión del estator empleadas son:

$$e_d = E_R \sin \delta - E_I \cos \delta \quad (2.19)$$

$$e_q = E_I \sin \delta + E_R \cos \delta \quad (2.20)$$

$$E_R = e_d \sin \delta + e_q \cos \delta \quad (2.21)$$

$$E_I = e_q \sin \delta - e_d \cos \delta \quad (2.22)$$

Por conveniencia en la organización del conjunto completo de ecuaciones algebraicas, las ecuaciones de tensión del estator se expresan respecto al eje de referencia común  $R - I$  de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{RR} & X_{RI} \\ -X_{IR} & R_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E''_R \\ E''_I \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Los elementos de la matriz de impedancia están dados por:

$$R_{RR} = (X_d'' - X_q'') \sin \delta \cos \delta + R_a \quad (2.24)$$

$$R_{II} = (X_q'' - X_d'') \sin \delta \cos \delta + R_a \quad (2.25)$$

$$X_{RI} = X_d'' \cos^2 \delta + X_q'' \sin^2 \delta \quad (2.26)$$

$$X_{IR} = X_d'' \sin^2 \delta + X_q'' \cos^2 \delta \quad (2.27)$$

Los componentes de la tensión interna vienen dados por:

$$E_R'' = E_d'' \sin \delta + E_q'' \cos \delta \quad (2.28)$$

$$E_I'' = E_q'' \sin \delta - E_d'' \cos \delta \quad (2.29)$$

Bajo condiciones balanceadas, la potencia activa y reactiva en terminales del generador vienen dadas por:

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q \quad (2.30)$$

$$Q_t = e_q i_q - e_d i_d \quad (2.31)$$

El par en el entrehierro requerido para la solución de la ecuación de movimiento es:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \quad (2.32)$$

Desde que se asumió que  $\bar{\omega} = \omega/\omega_o = 1$  pu las ecuaciones de tensión en el estator, el par en entrehierro en por unidad es igual a la potencia activa en el entrehierro.

$$T_e = P_e = P_t + R_a I_t^2 \quad (2.33)$$

Por su parte, la corriente de campo en por unidad del sistema viene dada por:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}} \quad (2.34)$$

La corriente de excitación de salida corresponde a la siguiente expresión:

$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd} \quad (2.35)$$

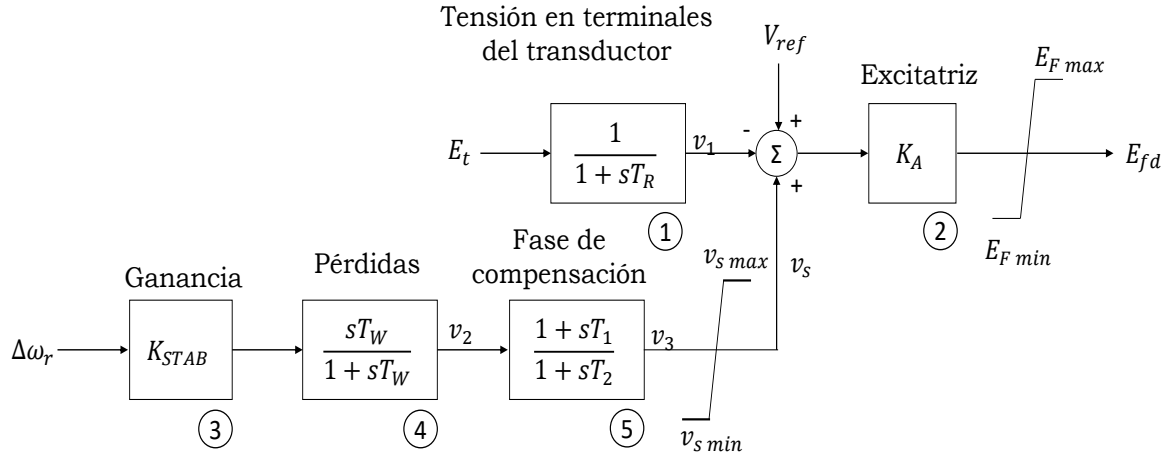
**2.2.4 Valores iniciales de variables del generador** Como se mencionó anteriormente, la estabilidad transitoria envuelve la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas con valores iniciales conocidos. El flujo de potencia en pre-falla da como resultado los valores iniciales de las variables, incluyendo la potencia activa y reactiva de salida, además de la tensión en los terminales del generador.

### 2.3 REPRESENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

La principal función del sistema de excitación de una máquina síncrona es suministrar corriente directa al devanado de campo, con el fin de crear el campo magnético necesario para la conversión de energía. Además, los sistemas de excitación cumplen una serie de funciones de control y protección.

Se considera un sistema de excitación retroalimentado por tiristor (también conocido como ‘de fuente de tensión y rectificador controlado’) clasificado como STA1, junto a un regulador automático de tensión (AVR) y un estabilizador del sistema potencia (PSS). El modelo de este sistema de excitación se muestra en la figura 7 y cuenta con límites en el excitador y en la salida del PSS. Este sistema, cuenta con una alta ganancia de excitación ( $K_A$ ) sin reducir la ganancia transitoria. Para una excitatriz de tiristor con fuente de tensión, la tensión varía con el terminal del generador ( $E_t$ ) y la corriente

**Figura 7.** Sistema de excitación con *AVR* y *PSS*.



FUENTE: KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw Hill, ISBN 0 07 035958. Traducida por los autores.

de excitación de salida ( $I_{fd}$ ):

$$E_{Fmax} = V_{Rmax}E_t - K_c I_{fd} \quad (2.36)$$

$$E_{Fmin} = V_{Rmin}E_t \quad (2.37)$$

Del bloque 1 de la figura 7 se puede escribir:

$$pv_1 = \frac{1}{T_R} (E_t - v_1) \quad (2.38)$$

De los bloques 3 y 4:

$$pv_2 = K_{STAB} p\Delta\omega_r - \frac{1}{T_w} v_2 \quad (2.39)$$

Con  $p\Delta\omega_r$  dado por la ecuación (2.1) del bloque 5.

$$pv_3 = \frac{1}{T_2} [T_1 pv_2 + v_2 - v_3] \quad (2.40)$$

Con  $\rho v_2$  dado por la ecuación (2.39), la salida del estabilizador  $v_s$  es:

$$v_s = v_3 \quad (2.41)$$

Con

$$v_{smax} \geq v_s \geq v_{smin} \quad (2.42)$$

Del bloque 2, la tensión de salida del excitador viene dada por:

$$E_{fd} = K_A [V_{ref} - v_1 + v_s] \quad (2.43)$$

Con

$$E_{Fmax} \geq E_{fd} \geq E_{Fmin} \quad (2.44)$$

La tensión de campo  $e_{fd}$  en el sistema en por unidad se relaciona con la tensión de excitador de salida  $E_{fd}$  tal como se muestra a continuación.

$$e_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} \quad (2.45)$$

**2.3.1 Valores iniciales de los parámetros del sistema de excitación** Para el estado estable del generador, la tensión de campo ( $e_{fd}$ ) se determina por las ecuaciones del generador. Los valores del sistema de excitación se determinan de la siguiente manera.

$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} e_{fd} \quad (2.46)$$

$$v_1 = E_t \quad v_2 = 0 \quad v_s = 0 \quad (2.47)$$

La referencia del regulador automático de tensión AVR es:

$$v_{ref} = \frac{E_{fd}}{K_A} + v_1 \quad (2.48)$$

Entonces  $V_{ref}$  toma un valor apropiado para la condición de carga antes de que el sistema sea sometido a la perturbación.

## 2.4 REPRESENTACIÓN DE LA SATURACIÓN MAGNÉTICA

**2.4.1 Saturación magnética** El análisis de la máquina síncrona considerando detalladamente los efectos de saturación del circuito magnético resulta complicado y, por esta razón, se han desarrollado métodos basados en aproximaciones justificadas y razonamientos empíricos para lograr que los modelos mantengan un grado adecuado de simplicidad y exactitud.

En la representación de la saturación magnética para estudios de estabilidad, el método más aceptado consiste en variar las inductancias  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  en función del flujo resultante del entrehierro. Las inductancias se calculan en función de factores de saturación.

### 2.4.2 Representación de saturación en estudios de estabilidad

En la representación de saturación magnética para estudios de estabilidad usualmente se hacen las siguientes suposiciones.

- a) Las trayectorias de los flujos ligados se encuentran principalmente en el aire, por lo tanto no se ven considerablemente afectadas por la saturación en el hierro. Por esta razón las inductancias mutuas  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  son los únicos elementos que se ven afectados.
- b) Los flujos ligados no contribuyen con la saturación del hierro. Estos flujos son generalmente bajos y sus trayectorias tienen direcciones distintas a las del flujo

principal. Asumiendo esto, la saturación se determina por el flujo ligado del entrehierro.

- c) La relación de la saturación entre el flujo resultante en el entrehierro y la fuerza magnetomotriz (fmm) bajo carga es la misma que sin carga. Debido a esto, la curva de saturación de circuito abierto, que generalmente es la única curva disponible, se puede utilizar para representar la característica de saturación.
- d) Como resultado de las no linealidades introducidas por la saturación, no existe acoplamiento magnético entre el eje directo  $d$  y los ejes de cuadratura  $q$ . Dicho de otra manera, las corrientes en los devanados de uno de los ejes no producen flujo ligado con los devanados en otros ejes.

Teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, los efectos de saturación se pueden representar como:

$$L_{ad} = K_{sd}L_{adu} \quad (2.49)$$

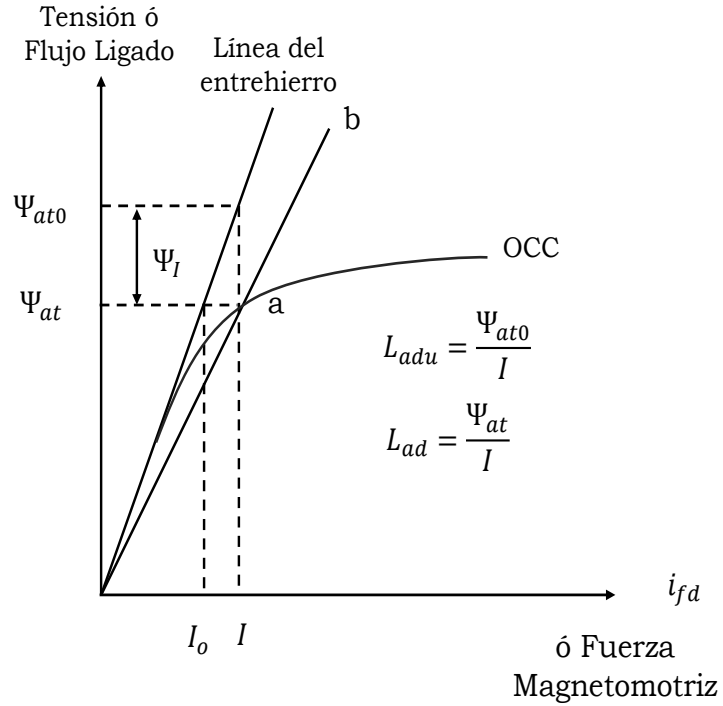
$$L_{aq} = K_{sq}L_{aqu} \quad (2.50)$$

Donde  $L_{adu}$  y  $L_{aqu}$  son los valores insaturados de  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  respectivamente. Los factores de saturación  $K_{sd}$  y  $K_{sq}$  identifican el grado de saturación en los ejes  $d$  y  $q$  respectivamente. De acuerdo con la suposición  $c$ , el grado de saturación del eje  $d$  es determinado de las características de circuito abierto (ver figura 8).

El factor de saturación  $K_{sd}$  se calcula mediante:

$$K_{sd} = \frac{\psi_{at}}{\psi_{at0}} \quad (2.51)$$

**Figura 8.** Características de circuito abierto que presenta los efectos de saturación.



Definiendo

$$\psi_I = \psi_{at0} - \psi_{at} \quad (2.52)$$

La expresión para el factor de saturación viene dada por la ecuación (2.53).

$$K_{sd} = \frac{\psi_{at}}{\psi_{at} + \psi_I} \quad (2.53)$$

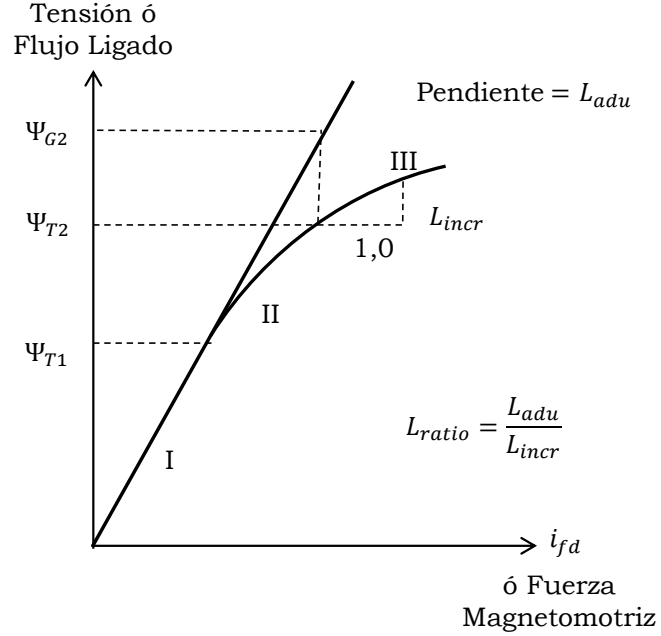
Donde:  $\psi_I$  se define de acuerdo con la región de la curva donde trabaje la máquina.

La curva de saturación se divide en 3 segmentos: el lineal segmento I, no lineal segmento II, y completamente saturado segmento III. Los términos  $\psi_{T1}$  y  $\psi_{T2}$  definen los límites de los 3 segmentos como se muestra en la figura 9.

Para el segmento I definido por  $\Psi_{at} \leq \Psi_{T1}$ .

$$\Psi_I = 0 \quad (2.54)$$

**Figura 9.** Características de saturación magnética de la máquina síncrona.



Para el segmento II definido por  $\Psi_{T1} \leq \Psi_{at} \leq \Psi_{T2}$ ,  $\Psi_I$  se puede expresar mediante la siguiente ecuación exponencial:

$$\psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at} - \psi_{T1})} \quad (2.55)$$

Donde  $A_{sat}$  y  $B_{sat}$  son constantes que dependen de la característica de saturación en el segmento II.

Cuando  $\Psi_{at} = \Psi_{T1}$  de la ecuación (2.55),  $\Psi_I = A_{sat}$ . Por lo tanto, esta representación resulta en una pequeña discontinuidad en la intersección de los segmentos I y II. Normalmente  $A_{sat}$  es muy pequeña y la discontinuidad no tiene gran importancia.

El segmento III definido por las siguientes relaciones:

$$\Psi_{at} > \Psi_{T2} \quad (2.56)$$

$$\psi_I = \psi_{G2} + L_{ratio}(\psi_{at} - \psi_{T2}) - \psi_{at} \quad (2.57)$$

Donde  $L_{ratio}$  es la relación de la pendiente de la línea del entrehierro o la pendiente incremental del segmento III en la característica del circuito abierto, OCC.

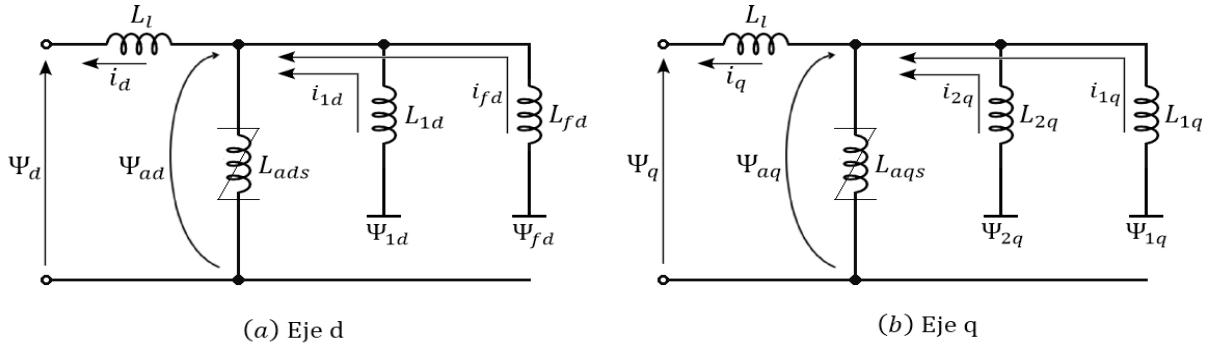
Con los métodos de representación anteriores, la característica de saturación para cualquier tipo de máquina se especifica completamente por  $\Psi_{T1}$ ,  $\Psi_{T2}$ ,  $\Psi_{G2}$ ,  $A_{sat}$ ,  $B_{sat}$  y  $L_{ratio}$ .

El valor de  $K_{sd}$  para cualquier momento de operación dado se calcula como función del flujo ligado en el entrehierro dado por la ecuación (2.58):

$$\psi_{at} = \sqrt{\psi_{ad}^2 + \psi_{aq}^2} \quad (2.58)$$

Donde  $\Psi_{ad}$  y  $\Psi_{aq}$  son los componentes del flujo mutuo ligado del entrehierro en los ejes  $d$  y  $q$  respectivamente, los cuales se identifican en la figura 10. Los flujos ligados del eje

**Figura 10.** Circuito equivalente con las componentes del flujo resultante en el entrehierro.



$d$  y  $q$  están dados por:

$$\psi_{ad} = \psi_d + L_l i_d = (e_q + R_a i_q) + L_l i_d \quad (2.59)$$

$$\psi_{aq} = \psi_q + L_l i_q = (-e_d - R_a i_d) + L_l i_q \quad (2.60)$$

Por lo tanto  $\Psi_{at}$  en por unidad es igual a la tensión inducida.

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{E}_t + (R_a + jX_l) \mathbf{I}_t \quad (2.61)$$

El factor de saturación  $K_{sd}$  se puede calcular utilizando los valores de tensión y de corriente en los terminales. Para máquinas de polos salientes (debido a que la trayectoria del flujo es en gran medida por aire)  $L_{aq}$  no varía de manera significativa con la saturación del hierro presente en la trayectoria del flujo. Por lo tanto  $K_{sq}$  se asume igual a 1 en por unidad para todas las condiciones de carga. En el caso de las máquinas de rotor cilíndrico hay saturación magnética en ambos ejes. El factor de saturación  $K_{sq}$  se puede determinar de la característica de saturación sin carga en el eje  $q$ . La información acerca de la saturación en el eje  $q$  usualmente no está disponible. Así que  $K_{sq}$  se asume igual a  $K_{sd}$ . Esto es equivalente a suponer que la reluctancia de la trayectoria magnética es homogénea en la periferia del rotor.

## 2.5 SOLUCIÓN DE ECUACIONES Y JACOBIANO DEL SISTEMA

Las ecuaciones que componen la dinámica de la máquina síncrona y el método implementado para su solución son las consideradas en el trabajo de grado *Herramienta Software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones*<sup>1</sup> del autor Carlos Rodríguez Sierra. Estas expresiones dan solución a: ecuaciones del rotor, ecuaciones del estator, ecuaciones de la máquina mediante el método de integración implícita y la obtención del Jacobiano del sistema.

## 2.6 RED DE TRANSMISIÓN Y REPRESENTACIÓN DE LA CARGA

Se asume que los transitorios asociados con la red de transmisión decaen muy rápidamente. Por lo tanto, es usual adaptar la red, durante las condiciones de transitorio elec-

---

<sup>1</sup>Rodríguez, C. (2003). *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: Diseño y elaboración.*, Apéndices A y B Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

tromecánico, como si pasara de un estado estable a otro. Las variaciones de frecuencia fundamental se pueden considerar como microprocesos y únicamente las variaciones sobre la forma de onda de la tensión y corriente se consideran para análisis de estabilidad.

Para análisis de condiciones balanceadas, se emplea la representación monofásica. La representación de las cargas estáticas hace parte de las ecuaciones de la red. Las cargas con características de impedancia constante son las más sencillas de manipular y se incluyen en la matriz de admitancias. Las cargas no lineales se modelan como funciones polinómicas o exponenciales dependientes tensiones y frecuencias. El efecto neto resultante es que una carga estática no lineal se trata como una inyección de corriente en el nodo apropiado de la ecuación de red. El valor de corriente de nodo, ingresando a la red desde tierra es:

$$\mathbf{I}_L = -\frac{P_L - jQ_L}{\mathbf{V}_L^*} \quad (2.62)$$

Donde  $\mathbf{V}_L^*$  es el conjugado de la tensión de la barra y  $P_L$  y  $Q_L$  son la potencia activa y reactiva de la carga, la cual varía como una función no lineal de  $V_L$  y el cambio de la frecuencia. Para una carga inductiva  $Q_L$  es positiva. En general, la representación de la red y la carga comprende una gran matriz dispersa de admitancias, con una estructura similar a la de un problema de flujos de cargas.

La ecuación de red escrita como notación matricial es:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_N \mathbf{V} \quad (2.63)$$

La matriz de admitancias de nodo  $Y_N$  es simétrica, excepto por la asimetría introducida por los transformadores desfasadores. En el lapso de tiempo de simulación de la estabilidad transitoria, los taps del transformador y los ángulos de cambios de fase no varían, por lo tanto, los elementos de la matriz  $Y_N$  se consideran constantes, excepto

para cambios introducidos por conmutaciones de la red.

**2.6.1 Simulación de fallas** Para una falla trifásica, la impedancia de falla es cero y la barra afectada tiene el mismo potencial que la tierra. Esto implica ubicar una admitancia infinita en paralelo con la barra afectada para que la tensión en la misma sea cero. La falla se elimina restaurando la admitancia en paralelo a un valor apropiado dependiendo de la configuración del sistema de post-falla.

### 3. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al emplear la herramienta DYNAMIC MS. El caso de estudio es el ejemplo 13.2 tomado de libro *Power System Stability and control de Prabha Kundur*, el cual consiste en una máquina síncrona conectada a una barra infinita. Aquí se presentan los resultados obtenidos por la herramienta desarrollada y se comparan con los obtenidos por la herramienta HAGP y el ejemplo 13.2 de [Kundur, 1994].

#### 3.1 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

En este trabajo de grado se desarrollaron algoritmos en JavaScript, los cuales realizan un análisis de estabilidad de ángulo de gran perturbación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita. El programa contiene modelos de la máquina con sus respectivos controles de excitación. El contenido y las principales características se muestran a continuación:

- Simulación de tres diferentes modelos de máquina síncrona de acuerdo con su control de excitación como podrían ser: control manual, AVR, AVR y PSS.
- De acuerdo con cada modelo seleccionado se puede visualizar el comportamiento de las siguientes variables:
  - Ángulo del rotor
  - Desviación del ángulo del rotor
  - Torque eléctrico
  - Tensión en los terminales del generador

– Tensión de excitación del generador

- Los datos de entrada corresponden a datos de la red y a parámetros del generador. Adicionalmente, el tiempo de simulación, el tiempo falla, el tiempo de despeje de falla y el paso de integración se puede ajustar de acuerdo con la necesidad del usuario.
- Sólo se permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema en condiciones balanceadas, es decir, se considera una falla trifásica sólida.
- Utiliza la regla trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales y algebraicas del sistema.

Un esquema que representa las características anteriores de DINAMIC MS es el que se muestra en la figura 11.

El manual de usuario establece el método de ingreso de datos a la herramienta software y hace una descripción acerca de las opciones que se tienen con dicha herramienta.

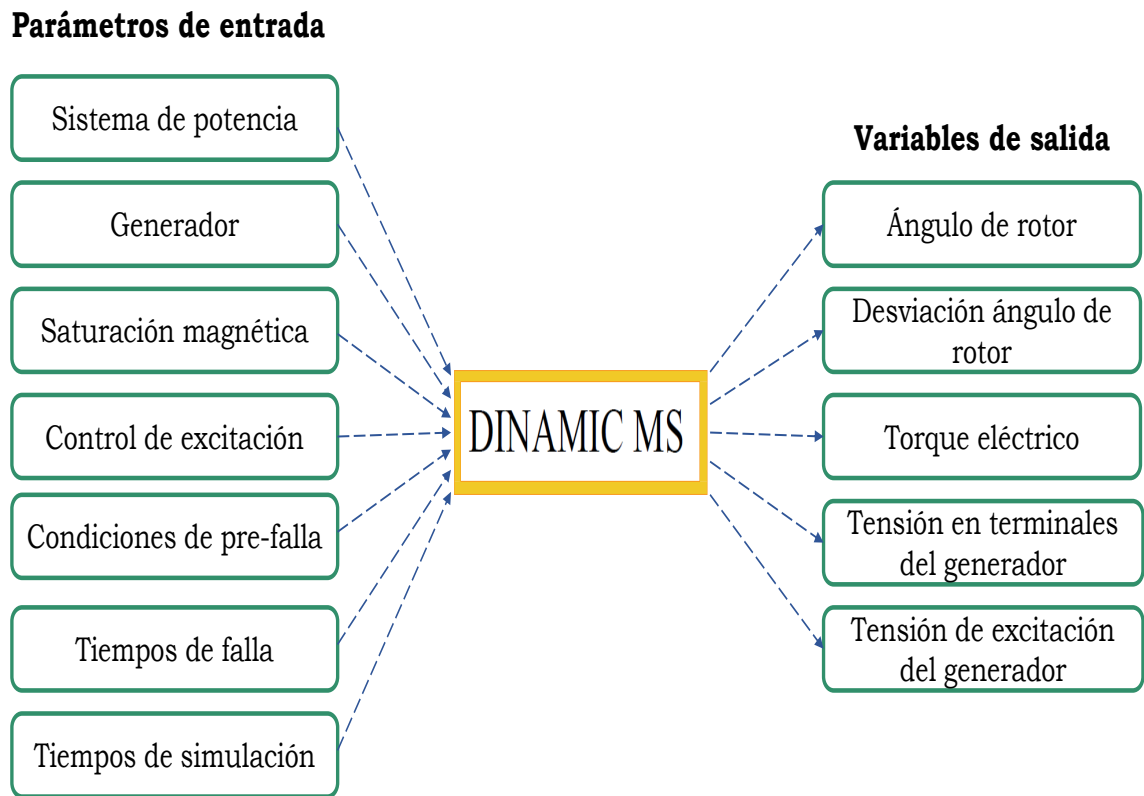
### **3.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CASO DE ESTUDIO**

El caso de estudio consiste en una planta de generación la cual se conecta por medio de dos circuitos, a un sistema de barra infinita (ver figura 12). Este sistema corresponde al ejemplo 13.2 del libro de [Kundur, 1994]. Las impedancias de la red tienen valores en por unidad sobre las bases de 2220 MVA y 230 kV.

La planta se modela a partir de un generador equivalente y sus parámetros se encuentran en la tabla 1, los cuales están en por unidad con bases 2220 MVA y 24 kV. El efecto de saturación magnética se representa suponiendo que los ejes  $d$  y  $q$  tienen características de saturación similares y sus valores se encuentran en la tabla 2.

El generador emplea un control de sistema de excitación con AVR y PSS, cuyos parámetros se encuentran en la tabla 3. La condición operativa de pre-falla del sistema, tomando

Figura 11. Funcionamiento de la herramienta DINAMIC MS

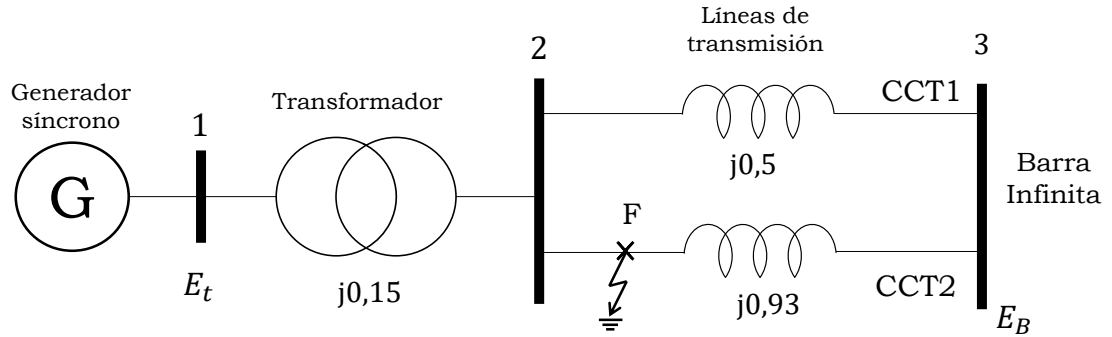


como base 2220 MVA, 24 kV y 60 Hz es la siguiente:

$$P = 0,9 \text{ pu}, Q = 0,436 \text{ pu}, \tilde{E}_t = 1,0 \angle 28,34^\circ \text{ pu}, \tilde{E}_B = 0,90081 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

Para los casos de estudio se evalúa la respuesta dinámica del sistema de acuerdo con el control de excitación empleado, el cual puede ser: control manual, *AVR*, *AVR* y *PSS*. El tiempo de simulación empleado es de 5,0 s y el paso de integración es de 0,01 s.

**Figura 12.** Sistema ejemplo caso de estudio



**Tabla 1.**

*Parámetros del generador en pu del caso de estudio*

Parámetro	Valor	Unidad
$X_d$	1,81	pu
$X_q$	1,76	pu
$X'_d$	0,3	pu
$X'_q$	0,65	pu
$X''_d$	0,23	pu
$X''_q$	0,25	pu
$X_l$	0,15	pu
$R_a$	0,003	pu
$T'_{d0}$	8,0	s
$T'_{q0}$	1,0	s
$T''_{d0}$	0,03	s
$T''_{q0}$	0,07	s
H	3,5	s
$K_D$	0	pu

**Tabla 2.**

*Parámetros de saturación magnética en pu*

Parámetro	Valor
$A_{sat}$	0,031
$B_{sat}$	6,93
$\Psi_{T1}$	0,8
$\Psi_{T2}$	$\infty$

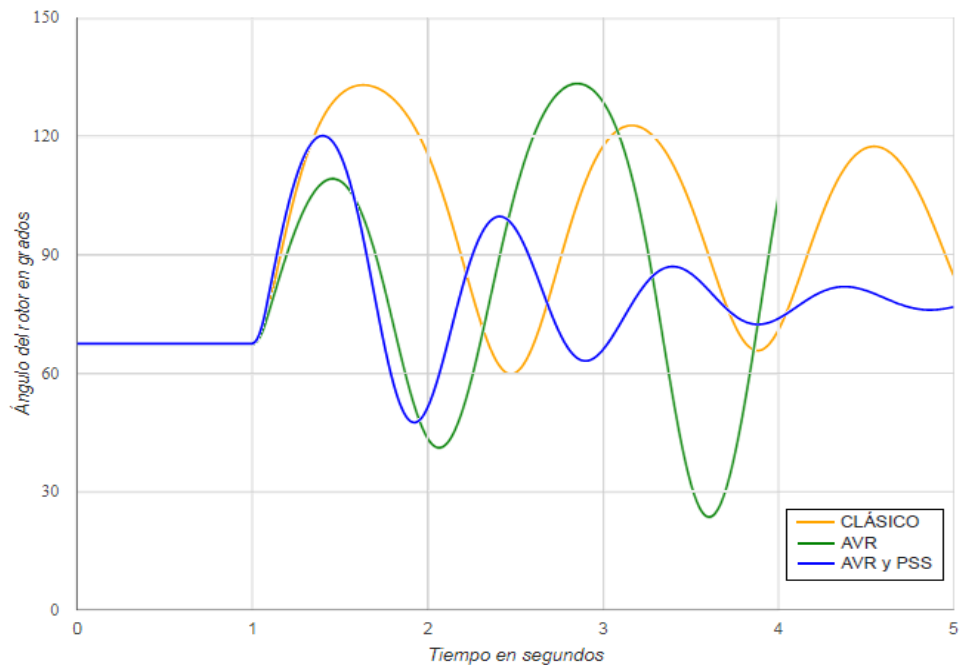
**Tabla 3.***Parámetros del sistema de excitación en del caso de estudio*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$K_A$	200	pu
$T_R$	0,015	s
$E_F \max$	7,0	pu
$E_F \min$	-6,4	pu
$K_{STAB}$	9,5	pu
$T_W$	1,41	s
$T_1$	0,154	s
$T_2$	0,033	s
$V_s \max$	0,2	pu
$V_s \min$	-0,2	pu

**3.2.1 Caso 1** Se considera una falla trifásica sólida en el extremo del circuito 2 entre las barras 2 y 3, la cual ocurre en un tiempo de 1,0 s. La falla se despeja abriendo ambos extremos de la línea en 0,07 s después de ocurrida la falla.

Los resultados obtenidos en las simulaciones para el estudio de la respuesta dinámica del sistema empleando modelo clásico, modelo con AVR y modelo con AVR y PSS se pueden apreciar en las figuras 13 a la 17

**Figura 13.** Ángulo del rotor



**3.2.2 Caso 2** En este caso, se varía el tiempo de despeje de falla del caso 1 en 0,08 s y 0,1 s. Los resultados obtenidos por DINAMIC MS se presentan en las figuras 18 a la 23.

Figura 14. Desviación del ángulo del rotor

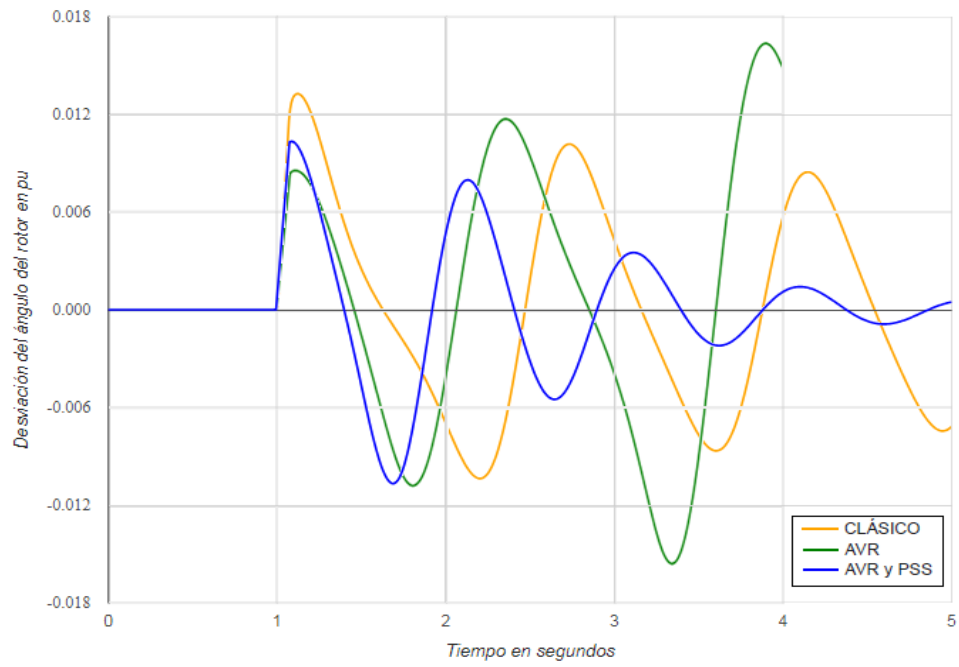


Figura 15. Torque eléctrico

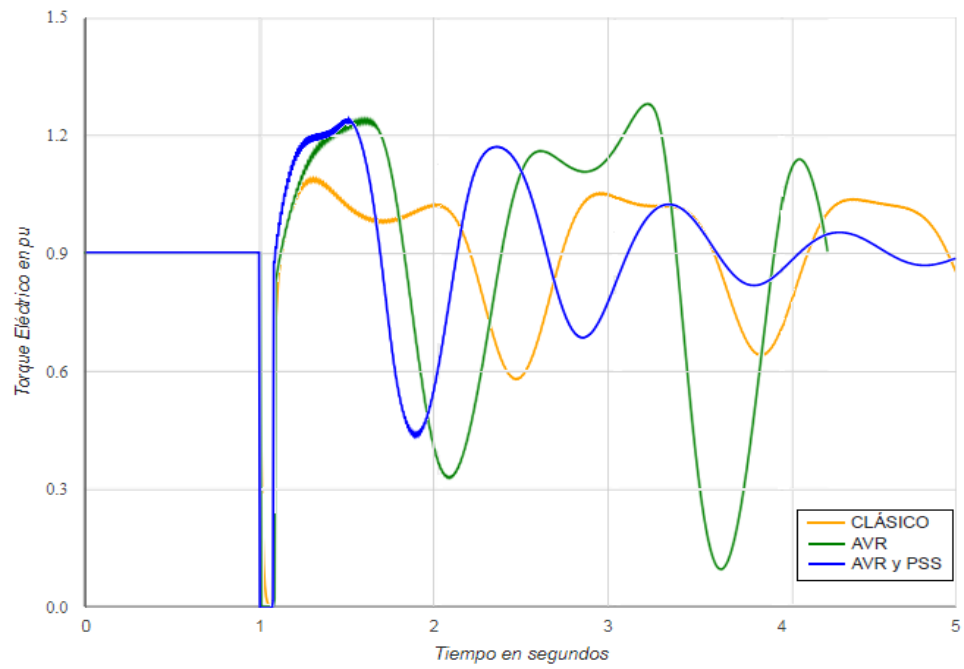


Figura 16. Tensión en terminales del generador

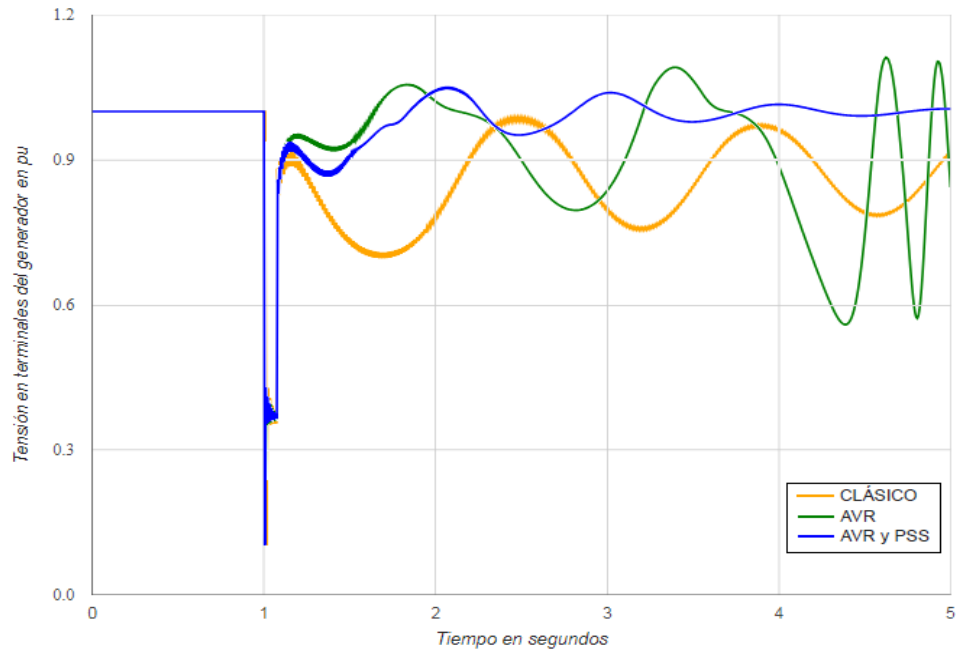


Figura 17. Tensión de excitación

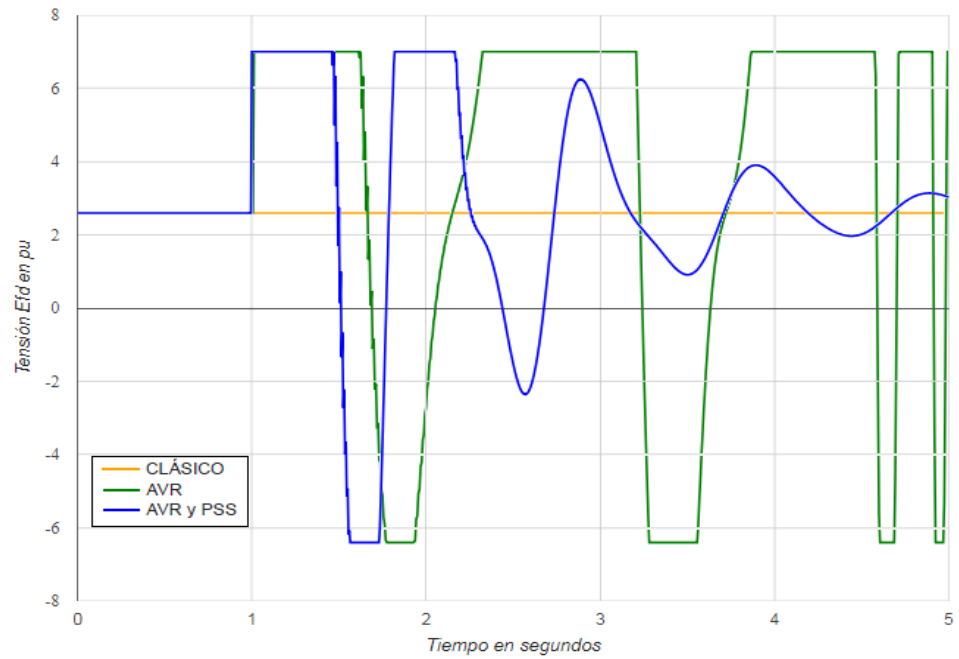


Figura 18. Ángulo del rotor con tiempo de despeje de 0,08 s

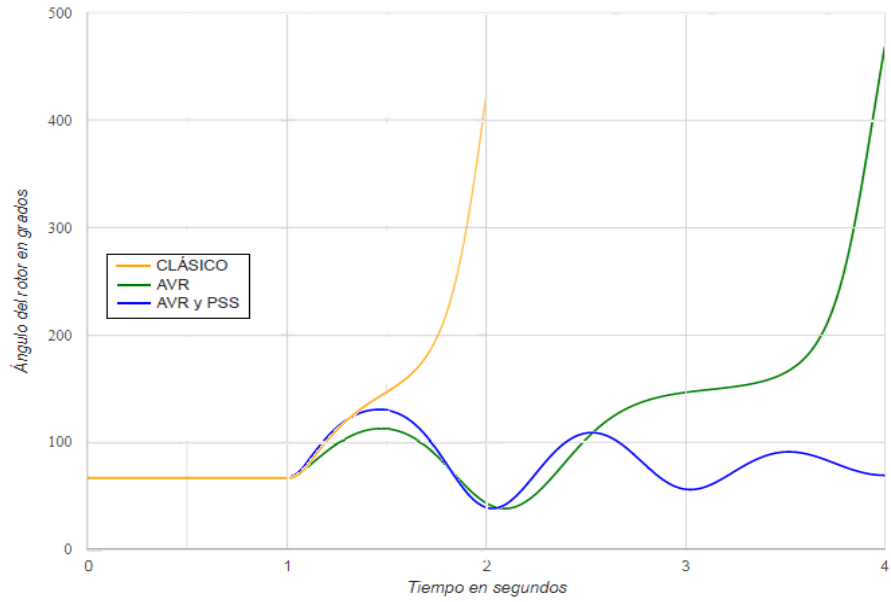
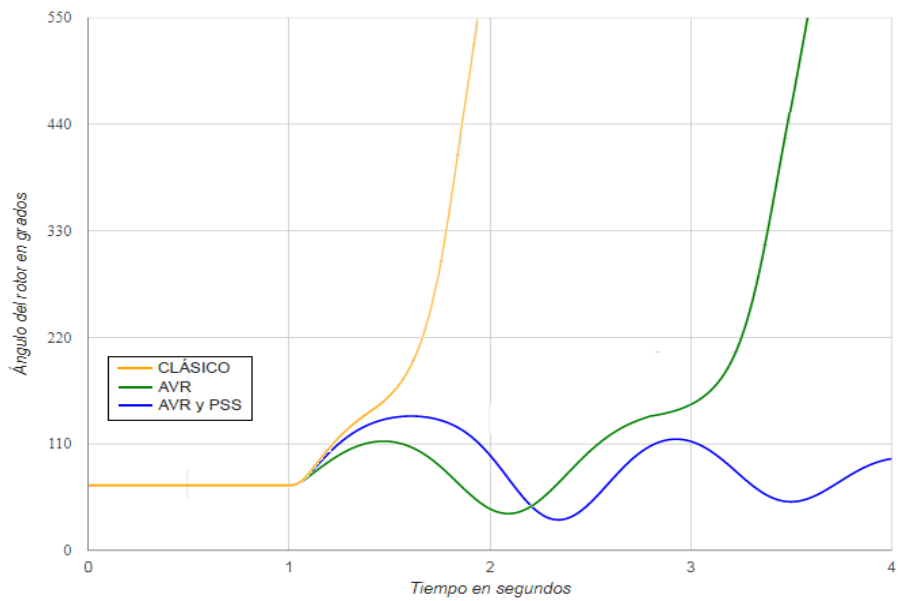
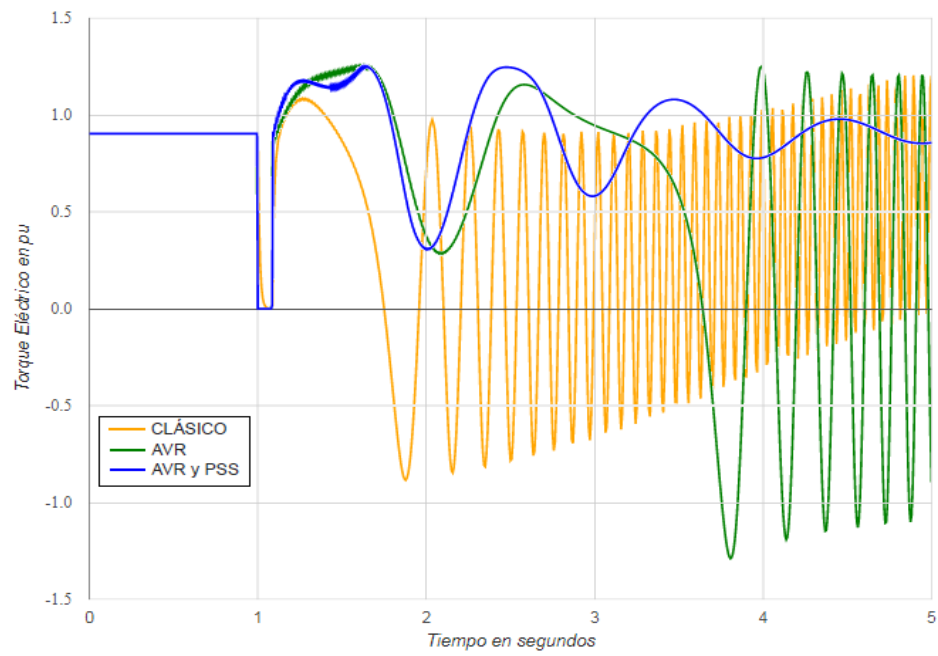


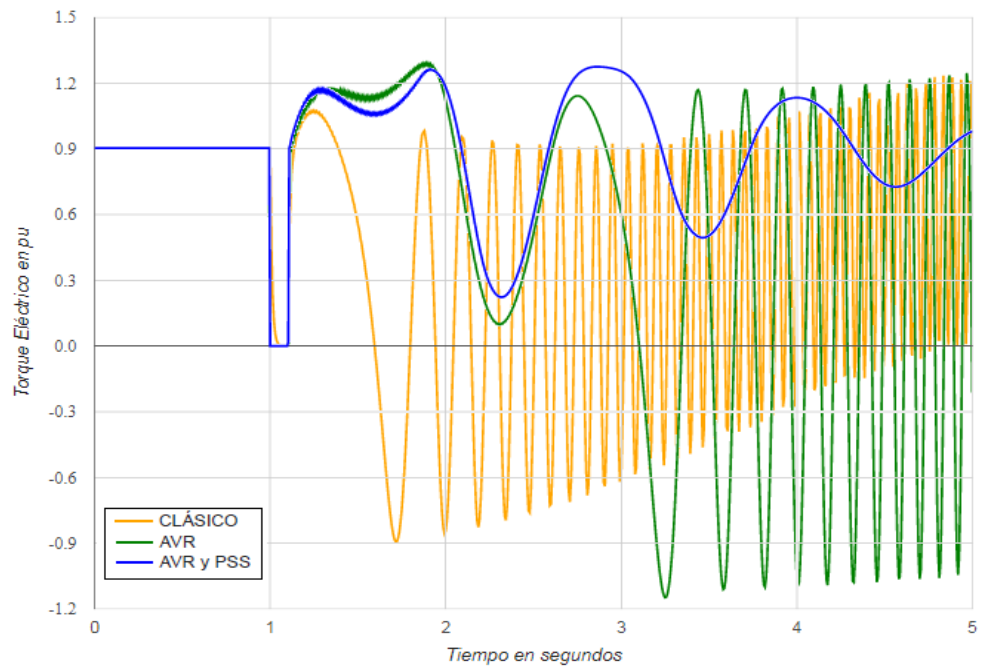
Figura 19. Ángulo del rotor con tiempo de despeje de 0,1 s



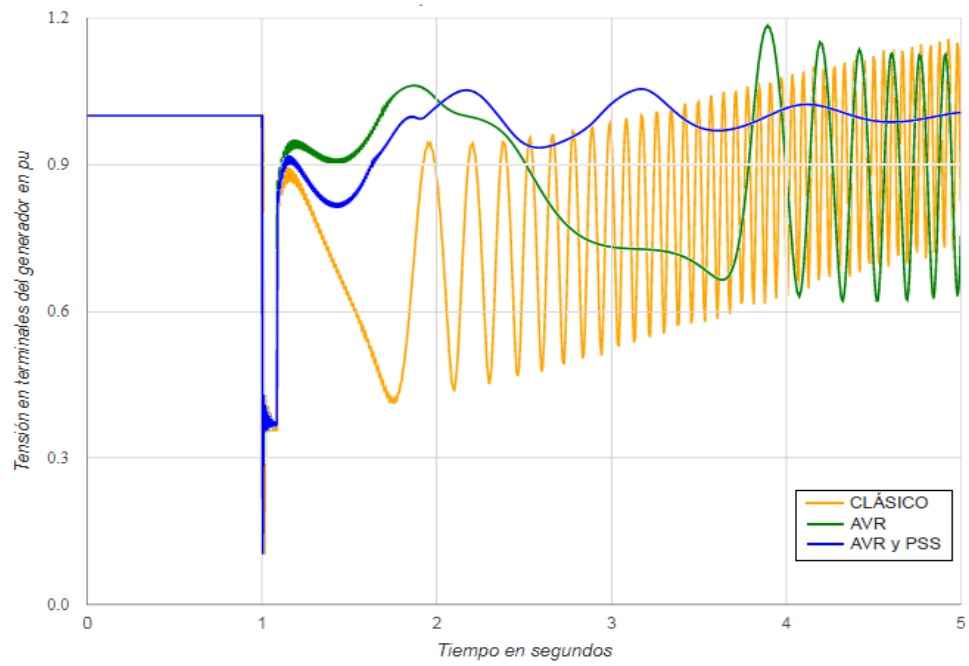
**Figura 20.** Torque eléctrico con tiempo de despeje de 0,08 s



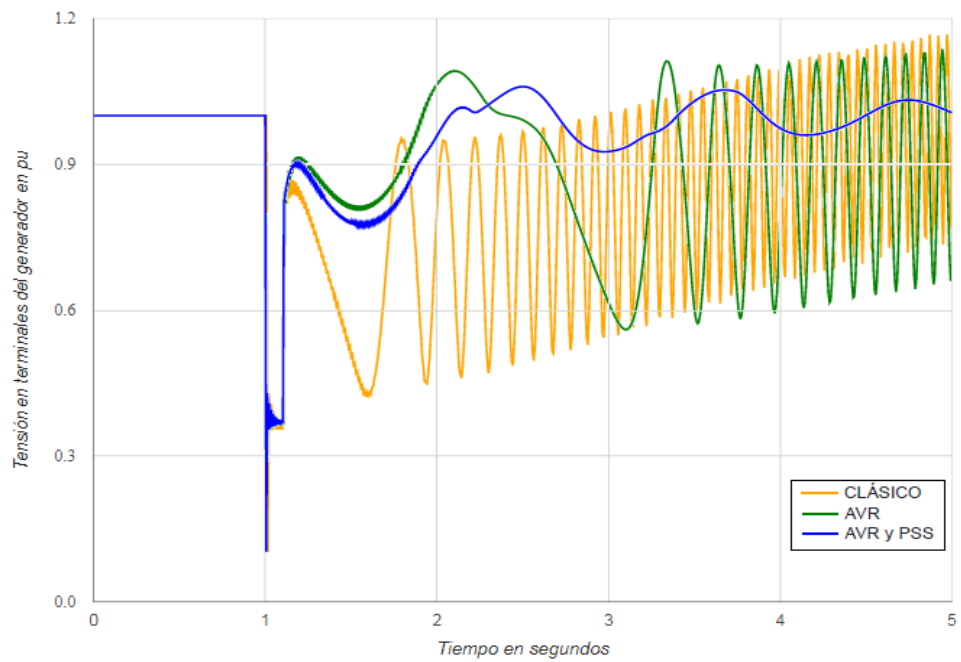
**Figura 21.** Torque eléctrico con tiempo de despeje de 0,1 s



**Figura 22.** Tensión en terminales del generador con tiempo de despeje de 0,08 s



**Figura 23.** Tensión en terminales del generador con tiempo de despeje de 0,1 s



### 3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS NUMÉRICOS

Para el caso 1, se presentan los datos obtenidos por la herramienta HAGP y los resultados que se muestran en el ejemplo 13.2 del libro *Power System Stability and control de Prabha Kundur* con el fin de validar los resultados obtenidos por la herramienta DINAMIC MS (ver figuras 24 a la 31).

Las gráficas de desviación de ángulo de rotor del caso 1, se presentan únicamente las obtenidas con la herramienta DINAMIC MS. La validez de los resultados se puede comprobar haciendo la comparación con los resultados obtenidos con la herramienta MAQ MS desarrollada en el trabajo de grado *Modelado y simulación de la máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada*<sup>1</sup>.

La gráfica de torque eléctrico obtenida por DINAMIC MS se presenta con valores en por unidad tomando como base 2220 MVA, 24 kV. Sin embargo, las gráficas que se obtienen con la herramienta HAGP (ver figura 26) y las resultantes del ejemplo 13.2 del libro de *Kundur* (ver figura 27) se presentan con valores reales con unidades de potencia activa en MW. Esto se debe a la aproximación empleada en la sección 2.2.3, ecuación (2.33), donde se asume  $\bar{\omega} = \omega/\omega_0 = 1 pu$ .

Se puede observar que los resultados obtenidos tienen un comportamiento similar a los establecidos por la herramienta HAGP. Sin embargo, estos resultados se asemejan de una mejor forma a los presentados en el ejemplo 13.2 del libro *Power System Stability and control de Prabha Kundur*.

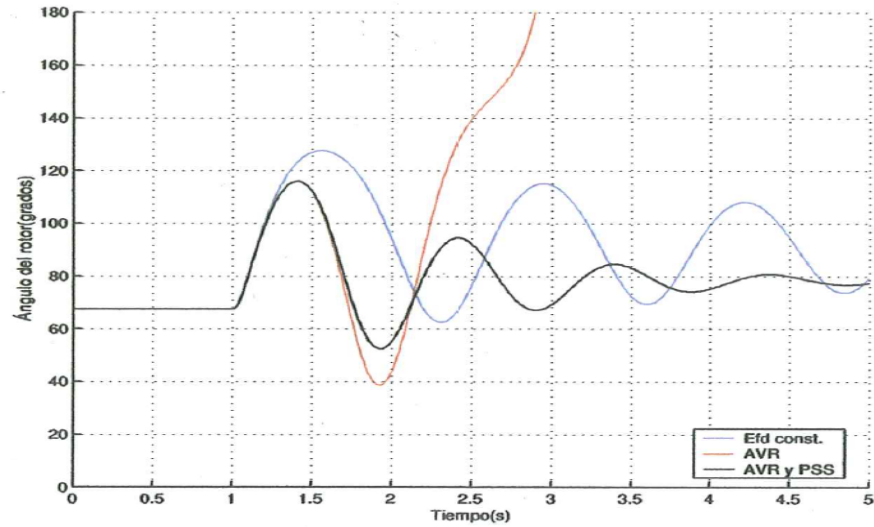
Según los resultados obtenidos en el caso 2 se observó que al aumentar el tiempo de despeje de falla, los sistemas de control de excitación manual y control AVR hacen que

---

<sup>1</sup>VASQUEZ Angie Daniela y GUERRERO Janire. *Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada*. Trabajo de grado. Ingenieras Electricistas, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2016.

el comportamiento del generador sea inestable, ocasionando la pérdida de sincronismo. El control de excitación con AVR y PSS contribuye a la mejora de la estabilidad del sistema.

**Figura 24.** Ángulo del rotor, herramienta HAGP



**Figura 25.** Ángulo del rotor, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]

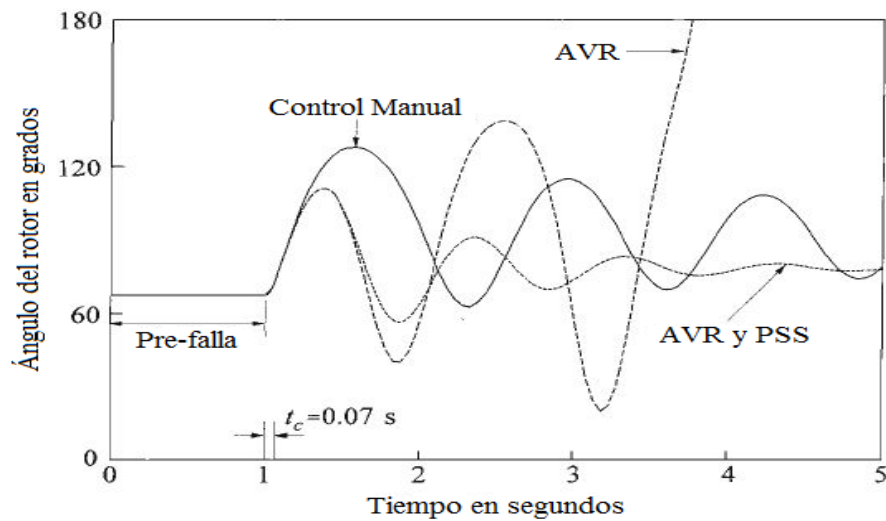


Figura 26. Potencia activa en terminales del generador, herramienta HAGP

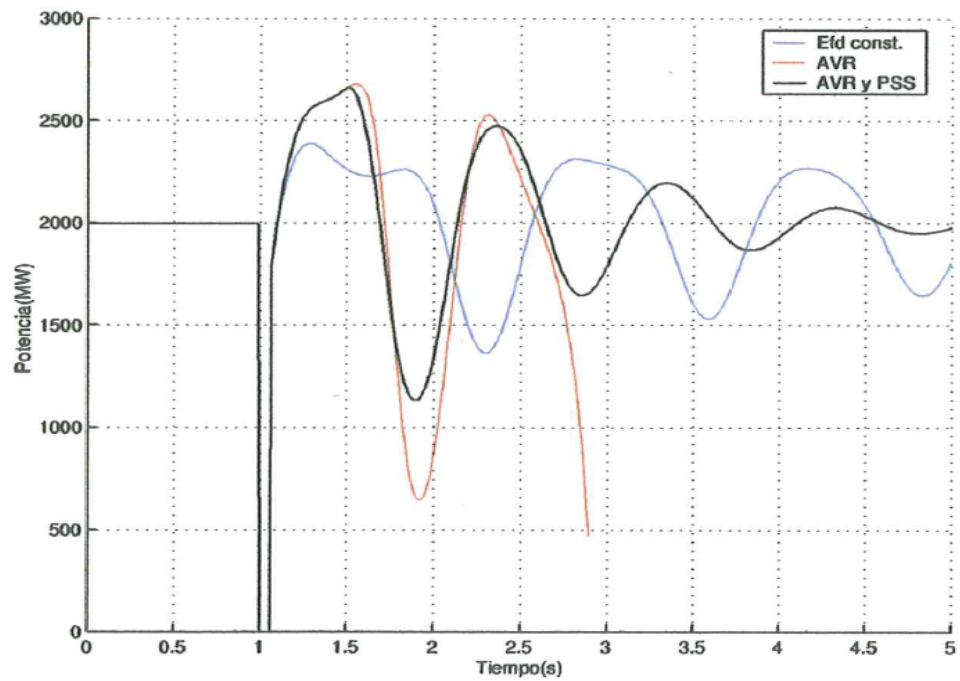


Figura 27. Potencia activa en terminales del generador, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]

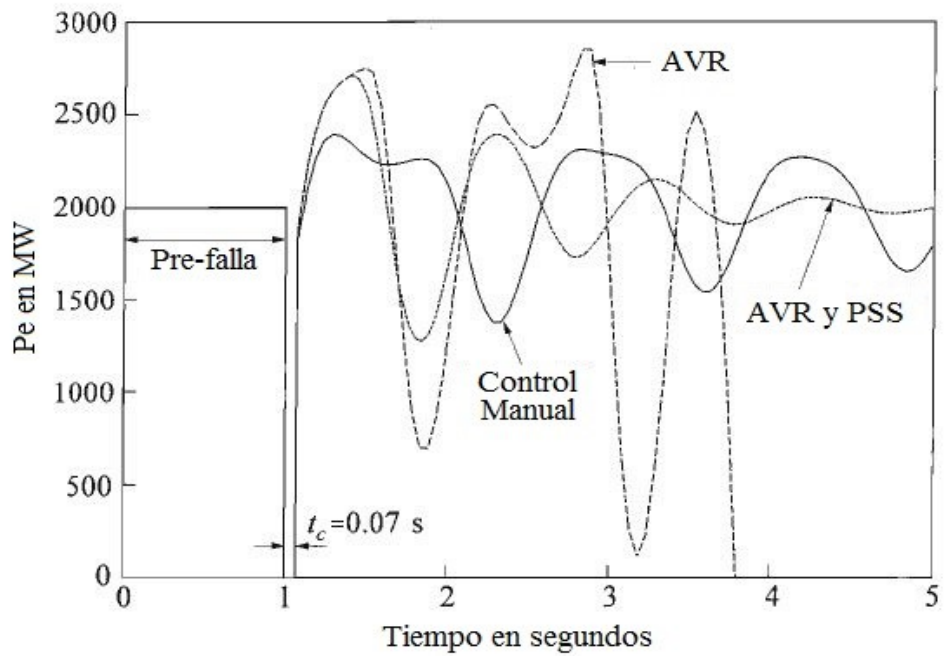
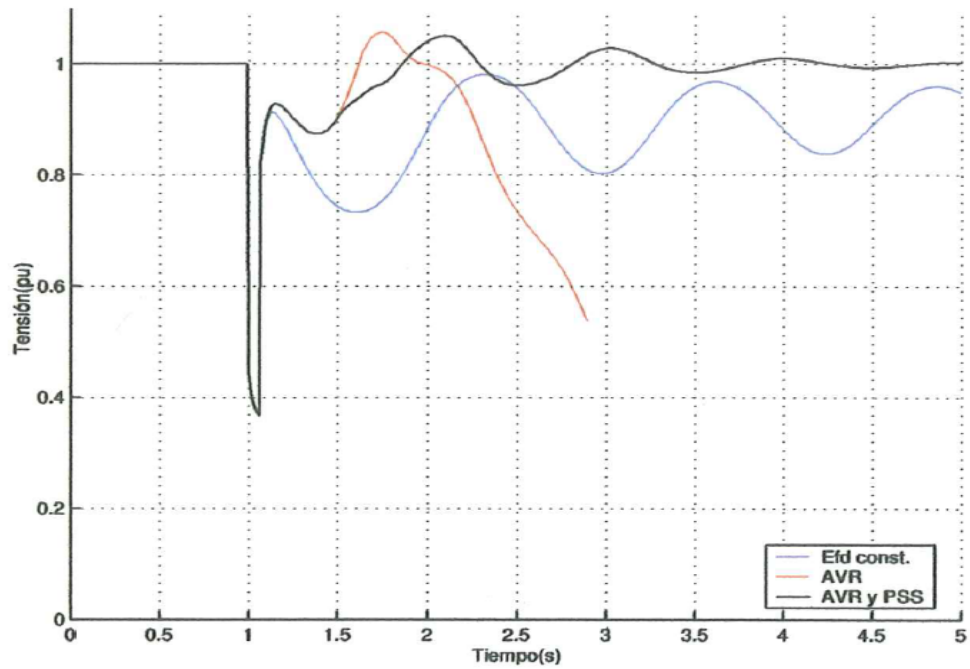


Figura 28. Tensión en terminales del generador, herramienta HAGP



2.

Figura 29. Tensión en terminales del generador, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]

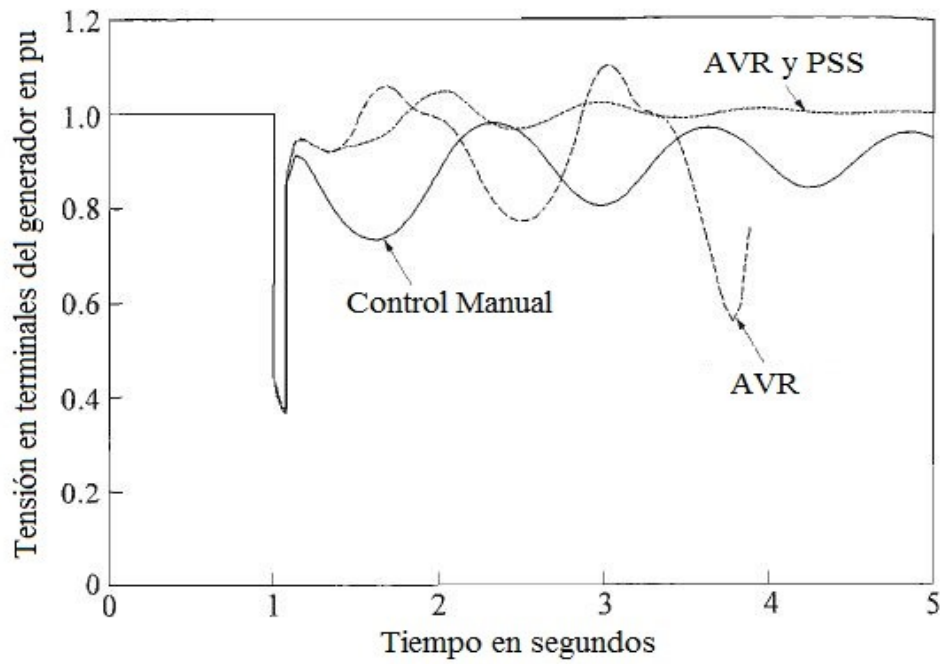


Figura 30. Tensión de excitación, herramienta HAGP

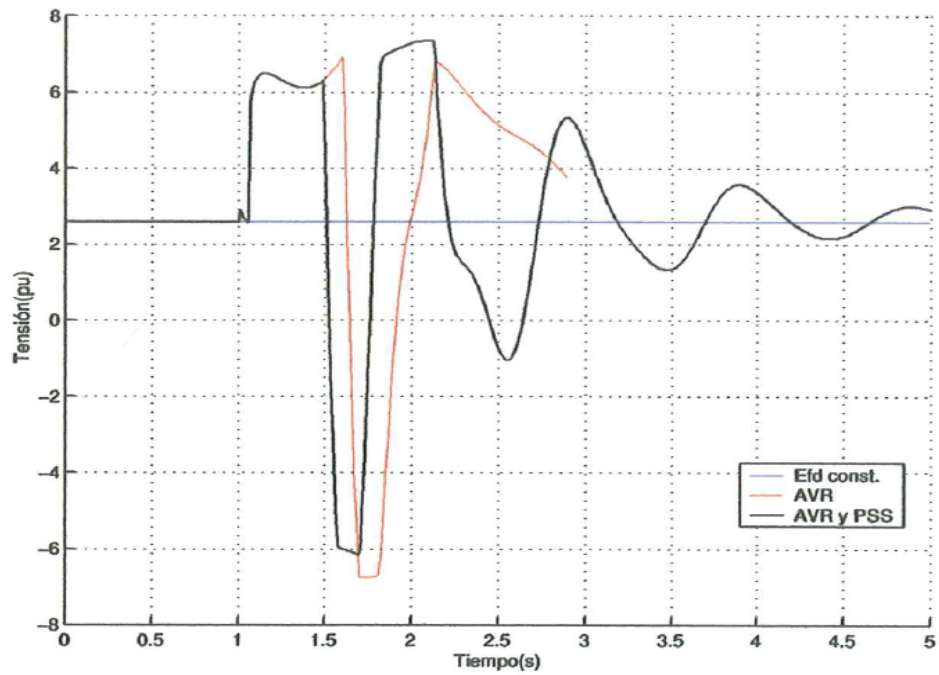
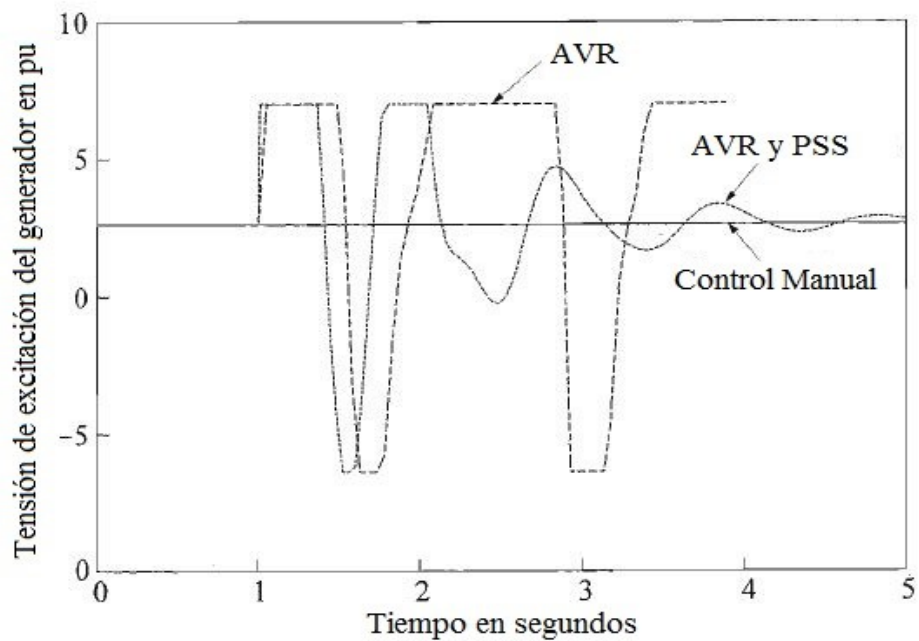


Figura 31. Tensión de excitación, ejemplo 13.2 [Kundur, 1994]



## 4. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

### 4.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo de grado consistía en elaborar una herramienta software en JavaScript que pudiera realizar un análisis de estabilidad de ángulo de gran perturbación de una máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita. De acuerdo con los resultados obtenidos, en el capítulo 3 se puede evidenciar que el objetivo general se cumplió. En el software se encuentran los modelos de la máquina síncrona y dado el caso sus controles asociados con el sistema de excitación. Cabe destacar que la herramienta permite el acceso al usuario para el ingreso y/o modificación de los parámetros del sistema y opciones de simulación.

Las conclusiones que se muestran a continuación son el resultado del repetido uso de la herramienta durante su elaboración y ejecución:

1. Se implementó una herramienta con tres modelos de máquina síncrona de acuerdo con su control de excitación. Esto permite analizar el comportamiento dinámico de la máquina ante una gran perturbación dependiendo del sistema de control que se esté empleando.
2. De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 3, se determina que el modelo de máquina que emplea un sistema de control de excitación con AVR y PSS compensa de mejor forma las variaciones de las velocidades de sincronismo que los otros controles de excitación implementados, ayudando a la máquina a que no salga de operación cuando ocurre una falla.
3. La herramienta computacional permite visualizar variables del sistema tales como: ángulo del rotor, desviación de las velocidades rotóricas, torque eléctrico, tensión en terminales del generador y tensión de excitación del generador. Al realizar la

comparación de las variables obtenidas por DINAMIC MS con las obtenidos por la herramienta HAGP, se observó que presentan un comportamiento similar, sin embargo, al hacer una comparación con los resultados expuestos en el capítulo 13 del libro Power System Stability and control de Prabha Kundur se evidencia que los resultados se asemejan más a estos.

4. El acceso a DINAMIC MS se realiza de forma sencilla. El usuario solo necesita tener instalado un navegador web para su ejecución, además la herramienta elaborada permite el ingreso fácil y/o modificación tanto de los parámetros del sistema como de las diversas gráficas de las variables eléctricas.

## 4.2 SUGERENCIAS

Se espera que este trabajo de grado sea tomado como base para posteriores desarrollos e investigaciones, se sugiere:

- Analizar sistemas de potencia de mayor tamaño.
- Simular la respuesta del sistema en condiciones desbalanceadas.
- Mejorar modelos de excitación.
- Incluir nuevos modelos de elementos dinámicos.
- Implementación de otros métodos numéricos para la solución de las ecuaciones que describen la dinámica del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

BOOTSTRAP, *Bootstrap*. [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet:  
<https://getbootstrap.com>

JAIMES, Gerson. *Modelado y simulación de la máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo*. Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2014.

JSFIDDLE [Revisado 30 de junio de 2018] Disponible en internet:  
<http://jsfiddle.net/bgrins/7DjCP/>

KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

MATH JS, *An extensive math library for JavaScript and Node.js*. 25 de febrero de 2018, [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet: <http://mathjs.org/>

MDN web docs. (2005-2018), *Hojas de Estilo en Cascada*. [Revisado 17 de mayo de 2018]. Disponible en internet:  
<https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/CSS>

PLOTLY, *The open source JavaScript graphing library that powers Plotly*. 2015 [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet:  
<https://plot.ly/javascript/getting-started/>

RODRÍGUEZ SIERRA, Carlos. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: Diseño y elaboración.*, Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2003.

RODRÍGUEZ SIERRA, Carlos. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones.* Tesis de Maestría. Magíster en Ingeniería, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2007.

SKINNER, Jon y BOND Will, *Sublime Text*, [Revisado 17 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <https://www.sublimetext.com/3>

STACK OVERFLOW, *Print the contents of a DIV* [Revisado 30 de junio de 2018] Disponible en internet: <https://stackoverflow.com/questions/2255291/print-the-contents>

VASQUEZ Angie Daniela y GUERRERO Janire. *Modelado y simulación de una maquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada.* Trabajo de grado. Ingenieras Electricistas, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2016.

## A. DINAMIC MS, MANUAL DEL USUARIO

### INTRODUCCIÓN

DINAMIC MS es una herramienta virtual que permite modelar y simular condiciones de funcionamiento de la maquina síncrona conectada a una barra infinita, con el fin de realizar estudios de estabilidad de ángulo ante una gran perturbación. Esta herramienta fue desarrollada por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Esta herramienta permite analizar tres diferentes modelos de máquina síncrona de acuerdo con su control de excitación, como pueden ser: control manual, control con AVR y control con AVR y PSS. Adicionalmente, admite datos de entrada tales como: parámetros del sistema de potencia, parámetros de la maquina síncrona, parámetros de saturación magnética, parámetros del sistema de control de excitación, condición de operación de pre-falla, tiempos de falla y tiempos de simulación.

En la herramienta virtual DINAMIC MS permite realizar la simulación del comportamiento dinámico de la máquina síncrona ante una gran perturbación. Estas simulaciones se realizan teniendo en cuenta las simplificaciones empleadas en estudios de estabilidad, es decir, se desprecian los efectos ocasionados por los transitorios electromagnéticos y se representa la red mediante un modelo fasorial cuasiestacionario. Así mismo, las expresiones algebraicas y diferenciales del sistema se resuelven utilizando la regla trapezoidal como método de integración.

## REQUISITOS E INSTALACIÓN

Para la ejecución de la herramienta virtual DINAMIC MS, se necesita instalar un navegador web y acceso a internet. El proceso de instalación comprende los siguientes pasos:

- Descomprimir la carpeta de archivos *dinamic.ms*.
- Abrir el archivo index.html.

## EJECUCIÓN

Para la ejecución de DINAMIC MS, se abre el archivo index.html y de esta forma se tendrá acceso a la ventana principal, la cual contiene información básica de la herramienta desarrollada (ver figura 32).

**Figura 32.** Entorno inicial de la herramienta virtual DINAMIC MS

Universidad Industrial de Santander

### MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE ÁNGULO ANTE UNA GRAN PERTURBACIÓN

INICIO MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA -

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T  
Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica - GISEL  
Universidad Industrial de Santander - UIS

La herramienta software DINAMIC MS simula el comportamiento durante la operación de la máquina síncrona conectada a una barra infinita en condiciones de pre-falla, falla y post-falla empleando métodos de integración implícita, ya que es una forma de representar simultáneamente dinámicas rápidas y lentas.

**AUTORES:**  
Oscar Camacho Pardo  
Diana Sofia Mendoza Contreras

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas

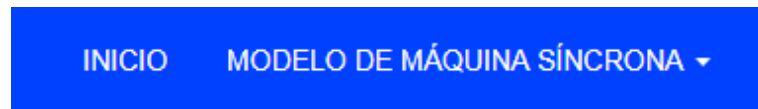
**DIRECTOR:**  
Hermann Raúl Vargas Torres

El sistema de potencia implementado consiste en una planta de generación, la cual es conectada por medio de dos circuitos a un sistema de barra infinita. Este sistema corresponde al ejemplo 13.2 del libro de KUNDUR<sup>[1]</sup>.

[1] KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

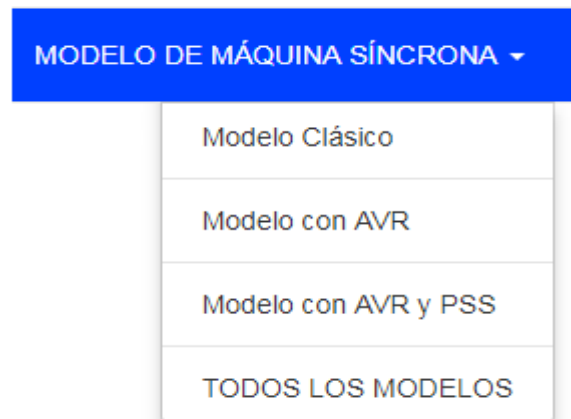
Una vez presentada la información general de la herramienta, se cuenta con un menú desplegable principal, en la parte superior derecha, el cual contiene las opciones: INICIO y MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA, tal y como se muestra en la figura 33.

**Figura 33.** Menú desplegable principal de DINAMIC MS



La opción INICIO permite ingresar a la ventana principal de DINAMIC MS. Seguidamente, la opción MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA permite seleccionar el modelo a emplear (ver figura 34).

**Figura 34.** Selección de modelo de máquina síncrona



Las primeras tres opciones (modelo clásico, modelo con AVR y modelo con AVR y PSS) realizan el estudio de estabilidad a cada modelo por separado. La opción TODOS LOS MODELOS permite visualizar a la vez los tres modelos mencionados anteriormente. Al elegir alguna de las cuatro opciones, DINAMIC MS accede a la ventana principal del modelo a implementar. Un ejemplo del entorno general de uno de los modelos seleccionados es el que se muestra en la figura 35.

Figura 35. Entorno general de modelo con AVR y PSS



# MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE ÁNGULO ANTE UNA GRAN PERTURBACIÓN



Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T  
 Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica - GISEL  
 Universidad Industrial de Santander - UIS

## MODELO CON AVR Y PSS

Importar desde .TXT  
 Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado

Cargar Datos

**Parámetros del sistema de potencia [pu]**

$X_{tr}$  [p.u.]    $X_{ct1}$  [p.u.]    $X_{ct2}$  [p.u.]

**Parámetros del generador [pu]**

$X_d$  [p.u.]    $X_q$  [p.u.]    $X_d'$  [p.u.]    $X_q'$  [p.u.]  
 $X_d''$  [p.u.]    $X_q''$  [p.u.]    $X_l$  [p.u.]    $R_a$  [p.u.]  
 $T_{d0}$  [s]    $T_{q0}$  [s]    $T_{d0}''$  [s]    $T_{q0}''$  [s]  
 $H$  [s]    $K_D$  [p.u.]

**Efecto de saturación magnética [pu]**

$A_{sat}$  [p.u.]    $B_{sat}$  [p.u.]    $\Psi_{T1}$  [p.u.]    $\Psi_{T2}$  [p.u.]

**Parámetros del sistema de excitación [pu]**

$K_A$  [p.u.]    $T_R$  [s]    $E_{fmax}$  [p.u.]    $E_{fmin}$  [p.u.]  
 $K_{STAB}$  [p.u.]    $T_W$  [s]    $T_1$  [s]    $T_2$  [s]  
 $V_{smax}$  [p.u.]    $V_{smin}$  [p.u.]

**Condiciones operativas de pre-falla [pu]**

$P$  [p.u.]    $Q$  [p.u.]    $f$  [Hz]  
 $E_t$  [p.u.]    $\delta_{Et}$  [grados]    $E_b$  [p.u.]    $\delta_{Eb}$  [grados]

**Tiempos de falla [s]**

Inicio de falla [s]   Despeje de falla [s]

**Simulación [s]**

Tiempo de simulación [s]   Paso de integración [s]

Tipo de gráfica a visualizar

- Ángulo de Rotor   Escala [ ] : 1
- Desviación ángulo de rotor   Escala [ ] : 1
- Torque Eléctrico   Escala [ ] : 1
- Tensión en terminales del generador   Escala [ ] : 1
- Tensión de excitación del generador   Escala [ ] : 1

Restaurar todo   Graficar

Imprimir

## PARÁMETROS DE ENTRADA

Los datos de entrada contienen parámetros del sistema de potencia, parámetros del generador, parámetros de saturación magnética, control de excitación, condiciones op-

erativas de pre-falla, tiempos de falla y tiempos de simulación. En las tablas 4 a la 10 se presentan los parámetros requeridos para los modelos de máquina síncrona.

**Tabla 4.**

*Parámetros del sistema de potencia pu*

Parámetro	Descripción
$X_{TR}$	Reactancia del transformador
$X_{CT1}$	Reactancia del circuito 1
$X_{CT2}$	Reactancia del circuito 2

**Tabla 5.**

*Parámetros de saturación magnética en pu*

Parámetro	Descripción
$A_{sat}$	Constante de saturación
$B_{sat}$	Constante de saturación
$\Psi_{T1}$	Constante de saturación
$\Psi_{T2}$	Constante de saturación

La tabla A.8 extraída del libro *Power Stability and Control* muestra los rangos de valores típicos para parámetros del generador, dependiendo del tipo de central generadora (térmica o hidráulica)<sup>1</sup>. De acuerdo con las expresiones empleadas para obtener los parámetros, se hace evidente que:

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d \quad (\text{A.1})$$

$$T'_{d0} > T'_d > T''_{d0} > T''_d \quad (\text{A.2})$$

$$T'_{q0} > T'_q > T''_{q0} > T''_q \quad (\text{A.3})$$

---

<sup>1</sup>KUNDUR, Op. Cit., P. 153

**Tabla 6.***Parámetros del generador*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
$X_d$	Reactancia síncrona de eje directo	pu
$X_q$	Reactancia síncrona de eje en cuadratura	pu
$X'_d$	Reactancia transitoria de eje directo	pu
$X'_q$	Reactancia transitoria de eje en cuadratura	pu
$X''_d$	Reactancia subtransitoria de eje directo	pu
$X''_q$	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura	pu
$X_l$	Reactancia de dispersión de estator	pu
$R_a$	Resistencia de estator	pu
$T'_{d0}$	Constante de tiempo transitoria de eje directo	s
$T'_{q0}$	Constante de tiempo transitoria de eje en cuadratura	s
$T''_{d0}$	Constante de tiempo subtransitoria de eje directo	s
$T''_{q0}$	Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura	s
H	Constante de inercia	s
$K_D$	Coefficiente de torque amortiguado	pu

**Tabla 7.***Parámetros del sistema de excitación*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
$K_A$	Ganancia de excitación	pu
$T_R$	Constante de tiempo del transductor	s
$E_{F \max}$	Tensión de campo máxima	pu
$E_{F \min}$	Tensión de campo mínima	pu
$K_{STAB}$	Ganancia del estabilizador	pu
$T_W$	Constante de tiempo filtro washout (pérdidas)	s
$T_1$	Constante de tiempo compensador	s
$T_2$	Constante de tiempo compensador	s
$V_s \max$	Límite superior del estabilizador	pu
$V_s \min$	Límite inferior del estabilizador	pu

**Tabla 8.***Parámetros de condiciones operativas de pre-falla*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
P	Potencia activa	pu
Q	Potencia reactiva	pu
f	frecuencia del sistema	Hz
$E_t$	Magnitud de fasor de tensión en terminales del generador	pu
$\delta_{E_t}$	Ángulo de fasor de tensión en terminales del generador	grados
$E_B$	Magnitud de fasor de tensión en barras del sistema	pu
$\delta_{E_B}$	Ángulo de fasor de tensión en barras del sistema	pu

**Tabla 9.***Parámetros de tiempos de falla en segundos*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Inicio de falla	Tiempo de origen de falla, después de iniciada la simulación
Despeje de falla	Tiempo de despeje de falla, después de originada

**Tabla 10.***Parámetros de simulación en segundos*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tiempo de simulación	Tiempo de simulación, iniciando desde 0
Paso de integración	Paso de integración

**Tabla 11.***Valores típicos de los parámetros del generador*

Parámetro		Hidráulicas	Térmicas	Unidades
Reactancia síncrona	$X_d$	0,6 - 1,5	1,0 - 2,3	pu
	$X_q$	0,4 - 1,0	1,0 - 2,3	pu
Reactancia transitoria	$X'_d$	0,2 - 0,5	0,15 - 0,4	pu
	$X'_q$	-	0,3 - 1,0	pu
Reactancia subtransitoria	$X''_d$	0,15 - 0,35	0,12 - 0,25	pu
	$X''_q$	0,2 - 0,45	0,12 - 0,25	pu
Constante de tiempo transitorio	$T'_{d0}$	1,5 - 9,0	3,0 - 10,0	s
	$T'_{q0}$	-	0,5 - 2,0	s
Constante de tiempo subtransitorio	$T''_{d0}$	0,01 - 0,05	0,02 - 0,05	s
	$T''_{q0}$	0,01 - 0,09	0,02 - 0,05	s
Reactancia de dispersión de estator	$X_l$	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	pu
Resistencia estator	$R_a$	0,002 - 0,02	0,0015 - 0,005	pu

FUENTE: KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. Tabla 4.2, McGraw Hill, ISBN 0 07 035958. Traducida por los autores.

**A.0.1 Datos de entrada** El ingreso de los datos numéricos para cada uno de los modelos de maquina síncrona se puede hacer de dos formas:

- Ingreso de datos manual
- Ingreso de datos con un documento .txt

*Nota:* El signo empleado para la separación de la parte entera y la parte decimal de los datos numéricos es el punto.

### Ingreso de datos manual

El ingreso de datos manual se hace de la forma convencional, situándose en cada uno de los espacios destinados en cada parámetro.

### Ingreso de datos con un documento .txt

Este método permite al usuario ingresar los datos de una forma más rápida por medio de un documento .txt (bloc de notas o documento de texto). Un ejemplo que explica la forma correcta de escribir los datos en un documento .txt es el que se muestra en la figura 36. Cabe destacar que los datos deben estar entre llaves.

**Figura 36.** Ejemplo de archivo .txt para ingreso de datos numéricos

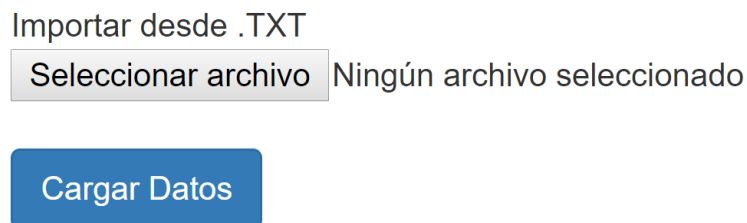
```
{
  "xtr": 0.15,
  "xc1": 0.5,
  "xc2": 0.93,
  "ld": 1.81,
  "lq": 1.76,
  "ldp": 0.3,
  "lqp": 0.65,
  "ldpp": 0.23,
  "lqpp": 0.25,
  "l1": 0.15,
  "ra": 0.003,
  "td0p": 8.0,
  "tq0p": 1.0,
  "td0pp": 0.03,
  "tq0pp": 0.07,
  "H": 3.5,
  "KD": 0,
  "Asat": 0.031,
  "Bsat": 6.93,
  "psit1": 0.8,
  "psit2": infinity,
  "KA": 200,
  "Tr": 0.015,
  "Efdmax": 7,
  "Efdmin": -6.4,
  "Kstab": 9.5,
  "Tw": 1.41,
  "T1": 0.154,
  "T2": 0.033,
  "vsmax": 0.2,
  "vsmin": -0.2,
  "P": 0.9,
  "Q": 0.436,
  "frec": 60,
  "Et": 1.0,
  "aEt": 28.34,
  "vinfi": 0.90081,
  "ared": 0,
  "tfallaa": 1,
  "tdfallaa": 0.07,
  "tsim": 5,
  "dt": 0.01
}
```

Terminado el documento .txt, el usuario se dirige a la opción “Seleccionar archivo”,

seguidamente busca el documento .txt y da la opción de Abrir. En la ventana se muestra el nombre del documento (por defecto aparece “Ningún archivo seleccionado”) y se dirige a la opción “Cargar datos”. Automáticamente los espacios destinados para cada uno de los parámetros se llenan con lo escrito en el documento .txt.

Las opciones de seleccionar archivo y cargar datos se muestran en la figura 37.

**Figura 37.** Ingreso de datos con un documento .txt



El usuario también tiene la opción de modificar los datos manualmente incluso si ya se ha cargado el documento .txt.

## GRÁFICAS

Una vez ingresado los datos requeridos en el modelo de máquina, el usuario selecciona el tipo de gráfica a visualizar tal y como se muestra en la figura 38. Este menú permite seleccionar a la vez una o varias variables eléctricas. En la parte derecha de este menú, se encuentra la opción de escala en magnitud de las gráficas, lo cual permite al usuario realizar un mejor análisis de las variables eléctricas al momento de seleccionar más de una opción.

Para la opción de TODOS LOS MODELOS, se cuenta con un menú desplegable el cual permite seleccionar el tipo de gráfica a visualizar tal y como se muestra en la figura 39.

Para finalizar el proceso, una vez seleccionada la gráfica a visualizar, el usuario se dirige a la opción “Graficar” (ver figura 40).

**Figura 38.** Tipo de gráfica a visualizar para modelo clásico, modelo con AVR y modelo con AVR y PSS

**Tipo de gráfica a visualizar**

<input type="checkbox"/> Ángulo de Rotor	Escala	<input type="text"/>	: 1
<input type="checkbox"/> Desviación ángulo de rotor	Escala	<input type="text"/>	: 1
<input type="checkbox"/> Torque Eléctrico	Escala	<input type="text"/>	: 1
<input type="checkbox"/> Tensión en terminales del generador	Escala	<input type="text"/>	: 1
<input type="checkbox"/> Tensión de excitación del generador	Escala	<input type="text"/>	: 1

**Figura 39.** Tipo de gráfica a visualizar para todos los modelos

**Tipo de gráfica a visualizar**

----

----

ÁNGULO DE ROTOR

DESVIACIÓN ÁNGULO DE ROTOR

TORQUE ELÉCTRICO

TENSIÓN EN TERMINALES DEL GENERADOR

TENSIÓN DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR

**Figura 40.** Opción de Graficar y Restaurar todos los parámetros



Para visualizar una nueva gráfica, se dirige al menú mencionado anteriormente, selecciona el parámetro que desea visualizar y nuevamente selecciona opción *\Graficar*”.

Si se desea guardar la gráfica obtenida, el usuario se dirige a la opción de *“Imprimir”* (ver figura 41) y guarda el archivo como PDF.

Para realizar la descarga en un archivo .png, se accede a la parte superior derecha de la gráfica y se da la opción *‘Download plot as a png’* (ver figura 42).

**Figura 41.** Opción de guardar la gráfica obtenida



**Figura 42.** Descargar gráfica en formato png



## B. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DINAMIC MS

### INTRODUCCIÓN

El propósito de este apéndice consiste en realizar una descripción del proceso empleado para el desarrollo de la herramienta software DINAMIC MS a través de JavaScript. Inicialmente se hace una descripción del lenguaje de programación empleado y demás elementos asociados a los sitios web. Seguidamente se muestra la estructura que posee la herramienta.

### GLOSARIO

A continuación, se definen algunos términos utilizados a lo largo del apéndice:

- *Lenguaje de programación*: lenguaje formal que especifica un conjunto de instrucciones que se pueden usar para producir diversos tipos de resultados; generalmente consisten en instrucciones para una computadora, se pueden utilizar para crear programas que implementen algoritmos específicos.
- *Código abierto*: modelo de desarrollo de software basado en la colaboración abierta. Se enfoca más en los beneficios prácticos (acceso al código fuente) que en cuestiones éticas o de libertad que tanto se destacan en el software libre.
- *Software*: conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas.
- *Software libre*: conjunto de software que, por elección manifiesta de su autor, puede ser copiado, estudiado, modificado, utilizado libremente con cualquier fin y redistribuido con o sin cambios ó mejoras.

## JAVASCRIPT EN DINAMIC MS

JavaScript es un lenguaje de programación robusto que puede ser aplicado a un documento HTML y es usado para crear interactividad dinámica en los sitios web.

HyperText Markup Language (HTML), también es un lenguaje de programación. Es el elemento de construcción más básico de una página web y se usa para crear y representar visualmente una página web. Determina el contenido de la página web, pero no su funcionalidad. El lenguaje que describe la apariencia/presentación de una página web es el Cascading Style Sheets, mejor conocido como CSS. En resumen, HTML se encarga de crear y representar visualmente una página web, CSS describe la apariencia y JavaScript la funcionalidad<sup>1</sup>.

Para configurar el entorno de desarrollo, es necesario contar con un navegador web que permita ejecutar el código JavaScript asociado y visualizar los ficheros html. Los navegadores más conocidos son Firefox, Chrome e Internet Explorer. En este trabajo se escogió el navegador Chrome<sup>2</sup> debido a que es el navegador con mayor número de usuarios en el mundo. Cabe destacar que su instalación es gratuita y su funcionalidad se extiende a computadores, teléfonos y tablets. Otro aspecto importante consiste en tener un editor de texto, en este caso el editor escogido fue Sublime Text<sup>3</sup>.

## ESTRUCTURA DEDINAMIC MS

En los archivos *.js* se encuentra el desarrollo de los modelos de la máquina, es decir, Modelo Clásico, Modelo con AVR y Modelo con AVR y PSS, estos registran los datos de

---

<sup>1</sup>MDN web docs. (2005-2018), [Revisado 17 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/CSS>

<sup>2</sup>GOOGLE, Un navegador rápido y gratuito. [Revisado 17 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <https://www.google.es/chrome/>

<sup>3</sup>SKINNER, Jon y BOND Will, Sublime Text14 de mayo de 2018, [Revisado 17 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <https://www.sublimetext.com/3>

entrada que son proporcionados por el usuario a través de la interfaz en el navegador. En general, los documentos *modelo\_avr.js*, *modelo\_avr\_pss.js* y *modelo\_clasico.js* están conformados por funciones, sentencias de control como *if* y *for*, variables y vectores entre otros.

Al tratarse el método de integración implícita mediante la regla trapezoidal, la sentencia de control *for* es importante para realizar el proceso iterativo y la aplicación de los factores de saturación en cada instante de tiempo. Los eventos de pre-falla, falla y post-falla se realizan con sentencias de control *if*, de acuerdo con los tiempos de ocurrencia de cada caso.

A pesar de que JavaScript cuenta con funciones matemáticas propias, existen limitaciones a la hora de abordar temas como operaciones con números complejos e inversas de matrices, lo cual hace que sea necesario el uso de librerías adicionales. En este trabajo se empleó la librería *mathjs*<sup>4</sup>. Math.js es una extensa biblioteca de matemáticas para JavaScript. Cuenta con un analizador de expresiones flexible con soporte para computación simbólica, contiene un gran conjunto de funciones integradas y variables tipo constante, y ofrece una solución integrada para trabajar con diferentes tipos de datos como números en notación científica, números complejos, fracciones, unidades y matrices.

Otra de las librerías de código abierto utilizadas fue *plotly.js*<sup>5</sup> que se utiliza para crear gráficas, lo cual constituye una parte fundamental del presente trabajo porque por medio de estas es que se puede hacer una apreciación de las diferentes variables analizadas de la máquina síncrona.

---

<sup>4</sup>MATH JS, 25 de febrero de 2018, [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet: <http://mathjs.org/>

<sup>5</sup>PLOTLY, 2015 [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet: <https://plot.ly/javascript/getting-started/>

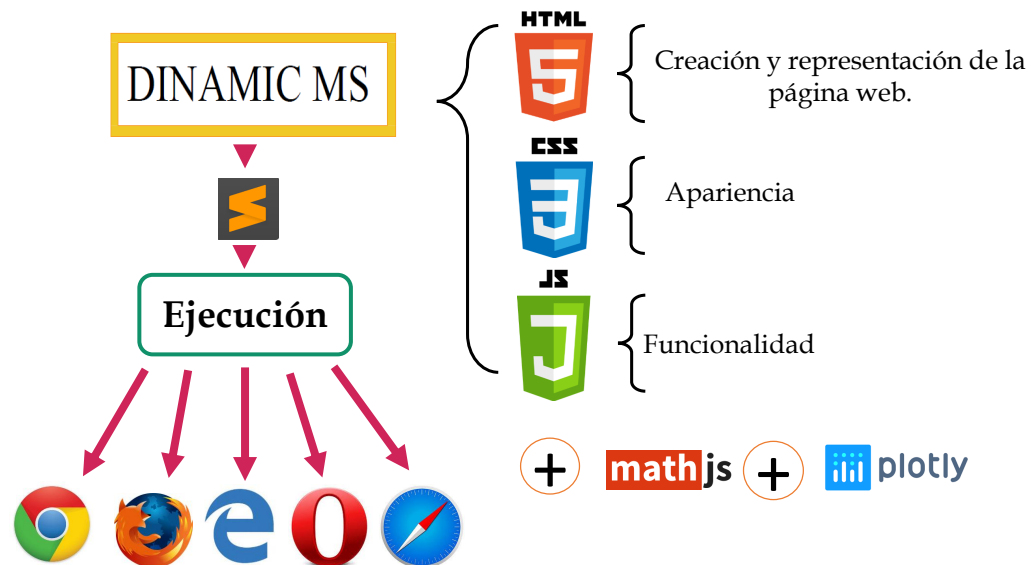
Con relación al diseño de la interfaz se utilizó Bootstrap.js<sup>6</sup> que corresponde a conjunto de herramientas de código abierto para diseño de sitios y aplicaciones web. Contiene plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, cuadros, menús de navegación y otros elementos de diseño basado en HTML y CSS, así como extensiones de JavaScript adicionales.

Cabe destacar que se emplearon 2 fragmentos de códigos libres, los cuales se adaptaron para obtener una solución para poder imprimir<sup>7</sup> la sección de la gráfica y para importar datos a JavaScript desde un documento .txt.

Para poder importar datos, se hace uso de la clase *file-reader*<sup>8</sup>.

En general la estructura de DINAMIC MS se puede observar en la figura 43.

**Figura 43.** Estructura de DINAMIC MS



<sup>6</sup>BOOTSTRAP, [Revisado 17 de mayo de 2018] Disponible en internet: <https://getbootstrap.com/>

<sup>7</sup>Stack Overflow, [Revisado 30 de junio de 2018] Disponible en internet: <https://stackoverflow.com/questions/2255291/print-the-contents-of-a-div?answertab=activetab-top>

<sup>8</sup>Jsfiddle [Revisado 30 de junio de 2018] Disponible en internet: <https://stackoverflow.com/questions/2255291/print-the-contents-of-a-div?answertab=activetab-top>[Revisado 30 de junio de 2018] Disponible en internet:<http://jsfiddle.net/bgrins/7DjCP/>