

SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA  
ANTE GRAN PERTURBACIÓN EMPLEANDO  
LA SOLUCIÓN PARTICIONADA CON INTEGRACIÓN EXPLÍCITA

EDUARDO REVOLLO ESCUDERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
BUCARAMANGA  
2018

SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA  
ANTE GRAN PERTURBACIÓN EMPLEANDO  
LA SOLUCIÓN PARTICIONADA CON INTEGRACIÓN EXPLÍCITA

EDUARDO REVOLLO ESCUDERO

*Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*

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

*A Dios todo poderoso por las bendiciones recibidas.*

*A mis padres por haberme dado la vida y por haber luchado con todos sus esfuerzos para brindarme la educación.*

A mi esposa Martha e hijos Daniel y Mateo por el amor, comprensión y apoyo brindado durante varios momentos importantes de mi vida.

Al Dr. Hermann Vargas por su apoyo y aporte durante la realización de éste trabajo de grado.

*Eduardo Revollo Escudero*

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
<hr/>	
1. MARCO DE REFERENCIA	15
<hr/>	
1.1. ANTECEDENTES . . . . .	15
1.2. EL FENÓMENO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA . . . . .	16
2. SATURACIÓN Y SISTEMA DE EXCITACIÓN	
<hr/>	
2.1. REPRESENTACIÓN DE LA SATURACIÓN MAGNÉTICA . . . . .	17
2.2. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN . . . . .	20
3. METODOLOGÍA	
<hr/>	
3.1. ECUACIONES ALGEBRAICAS . . . . .	23
3.2. ECUACIONES DE MOVIMIENTO . . . . .	24
3.3. ECUACIONES DE LOS CIRCUITOS DEL ROTOR . . . . .	25
3.4. VERSIÓN GILL DEL MÉTODO DE RUNGE KUTTA DE CUARTO ORDEN . . . . .	26
3.5. SOLUCIÓN PARTICIONADA CON INTEGRACIÓN EXPLÍCITA . . . . .	27
3.6. ALGORITMO DE SOLUCIÓN . . . . .	28
4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	29
<hr/>	
4.1. CASO: SISTEMA DE BARRA INFINITA . . . . .	29
4.1.1. Modelo clásico . . . . .	30
4.1.2. Modelo con tensión de excitación constante . . . . .	34
4.1.3. Modelo con Regulador Automático de Tensión (AVR) . . . . .	38
4.1.4. Modelo con Regulador Automático de Tensión (AVR) y Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS) . . . . .	42
4.2. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS . . . . .	46

CONCLUSIONES 51

---

BIBLIOGRAFÍA 53

---

# LISTA DE FIGURAS

2.1. Característica de saturación de la máquina síncrona . . . . .	18
2.2. Circuitos equivalentes con los componentes del flujo resultante en el entrehierro. . . . .	19
2.3. Sistema de excitación con AVR y PSS. . . . .	20
3.1. Algoritmo de solución utilizado . . . . .	28
4.1. Sistema máquina barra infinita . . . . .	30
4.2. Ángulo del rotor [Grados] - Modelo clásico . . . . .	31
4.3. Desviación del ángulo del rotor [pu] - Modelo clásico . . . . .	31
4.4. Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo clásico . . . . .	32
4.5. Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo clásico	32
4.6. Torque en el entrehierro - Modelo clásico . . . . .	33
4.7. Potencia en el entrehierro - Modelo clásico . . . . .	33
4.8. Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo clásico . . . . .	34
4.9. Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	35
4.10. Desviación de la velocidad del rotor [pu] - Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	35
4.11. Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con $E_{fd}$ constante . . .	36
4.12. Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados- Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	36
4.13. Torque en el entrehierro - Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	37
4.14. Potencia en el entrehierro - Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	37
4.15. Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con $E_{fd}$ constante . . . . .	38
4.16. Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con AVR . . . . .	39
4.17. Desviación de la velocidad del ángulo del rotor [pu] - Modelo con AVR . . . . .	39
4.18. Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con AVR . . . . .	40
4.19. Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo con AVR	40
4.20. Torque en el entrehierro - Modelo con AVR . . . . .	41
4.21. Potencia en el entrehierro - Modelo con AVR . . . . .	41

4.22. Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con AVR . . . . .	42
4.23. Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con AVR y PSS . . . . .	43
4.24. Desviación de la velocidad del rotor [pu] - Modelo con AVR y PSS . . . . .	43
4.25. Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con AVR y PSS . . . . .	44
4.26. Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo con AVR y PSS . . . . .	44
4.27. Torque en el entrehierro - Modelo con AVR y PSS . . . . .	45
4.28. Potencia en el entrehierro - Modelo con AVR y PSS . . . . .	45
4.29. Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con AVR y PSS . . . . .	46
4.30. Ángulo del rotor . . . . .	47
4.31. Potencia en el entrehierro . . . . .	48
4.32. Tensión en terminales del generador . . . . .	49
4.33. Tensión de excitación . . . . .	50

## RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA SÍNCRONA ANTE GRAN PERTURBACIÓN EMPLEANDO LA SOLUCIÓN PARTICIONADA CON INTEGRACIÓN EXPLÍCITA<sup>1</sup>

AUTORES: EDUARDO REVOLLO ESCUDERO.<sup>2</sup>

PALABRAS CLAVE: Estabilidad transitoria, Solución particionada, Integración explícita, Perturbación

### DESCRIPTION:

En el análisis de la estabilidad transitoria se estudia la respuesta de los elementos dinámicos del sistema de potencia (generadores, cargas, elementos de compensación dinámicos, entre otros) y la variación de las magnitudes de la red (tensiones, corrientes, flujos de potencia por las líneas, entre otras) cuando se presentan grandes perturbaciones tales como cortocircuitos, pérdidas de generación ó pérdidas de carga. El análisis de la estabilidad transitoria ante grandes perturbaciones debe incluir las variaciones de los ángulos del rotor, las desviaciones de las velocidades del rotor, las variaciones del torque en el entrehierro de las máquinas y la variación de las tensiones en los terminales de las máquinas, entre otros.

En otros trabajos de grado, el análisis de la estabilidad transitoria ante gran perturbación se ha realizado mediante la solución simultánea con integración implícita, obteniendose resultados acordes con la literatura, sin embargo, en este trabajo de grado se implementa la solución particionada con integración explícita la cual se basa en la solución por separado de las ecuaciones algebraicas y diferenciales que modelan la dinámica del sistema de potencia y de las máquinas síncronas respectivamente. Adicionalmente, en este trabajo de grado se representa la máquina síncrona mediante los siguientes modelos: el modelo clásico, el modelo con tensión de campo constante, el modelo con regulador automático de tensión y el modelo con regulador automático de tensión y estabilizador del sistema de potencia.

---

<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: SIMULATION OF THE SYNCHRONOUS MACHINE UNDER LARGE DISTURBANCE USING THE PARTITIONED SOLUTION WITH EXPLICIT INTEGRATION.<sup>3</sup>

AUTHORS: EDUARDO REVOLLO ESCUDERO.<sup>4</sup>

KEY WORDS: Transient stability, Partitioned solution, Explicit integration, Disturbance.

### DESCRIPTION:

In the analysis of transient stability, the response of the dynamic elements of the power system (generators, loads, dynamic compensation elements, among others) and the variation of the magnitudes of the network (voltages, currents, power flows through the lines, among others) when there are large disturbances such as short circuits, generation losses or load losses. The analysis of the transient stability before big perturbations must include the variations of the angles of the rotor, the deviations of the speeds of the rotor, the variations of the torque in the air gap of the machines and the variation of the tensions in the terminals of the machines, among others.

In other degree work, the analysis of transient stability in the face of great disturbance has been made through the simultaneous solution with implicit integration, obtaining results consistent with the literature, however, in this work of degree the partitioned solution is implemented with explicit integration. which is based on the separate solution of the algebraic and differential equations that model the dynamics of the power system and of the synchronous machines respectively. Additionally, in this degree work the synchronous machine is represented by the following models: the classic model, the model with constant field voltage, the model with automatic voltage regulator and the model with automatic voltage regulator and power system stabilizer.

---

<sup>3</sup>Research work.

<sup>4</sup>Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Advisor: Hermann Raul Vargas Torres.

---

# INTRODUCCIÓN

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia puede definirse 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 en que se encuentre inicialmente el sistema, y de la perturbación a la que sea sometido. Un sistema eléctrico de potencia es un sistema dinámico altamente no-lineal, cuya respuesta a perturbaciones está influenciada por las diferentes características de los elementos que lo componen. Si se tienen en cuenta la gran variedad y cantidad de estos elementos, se puede concluir que el estudio de estabilidad en términos generales resultaría bastante complejo.

El análisis de estabilidad de ángulo de gran perturbación examina la respuesta dinámica del sistema de potencia hasta unos segundos después de ocurrida la perturbación modelando el sistema de transmisión y la dinámica de las cargas, generadores, controles y otros elementos del sistema. Tradicionalmente, el análisis de gran perturbación se ha realizado fuera de línea con el propósito de estudiar la respuesta del sistema a contingencias específicas y determinar la capacidad de éste de amortiguar las oscilaciones y alcanzar un estado de operación aceptable. Tales estudios se llevaban a cabo generalmente sólo en las fases de planeación o expansión con el propósito de garantizar que el sistema fuera lo suficientemente robusto. También se han utilizado para entrenamiento de operadores con el fin de establecer estrategias de operación.

La dificultad principal en el análisis de estabilidad de gran perturbación surge de la complejidad computacional inherente al problema. Debido a esto, fue difícil implementar simulaciones

en línea que dieran soporte a la toma de decisiones. La importancia de efectuar simulaciones en tiempo real o más rápidas es evidente. Con este tipo de herramientas, los operadores pueden tener una visión general de la evolución del sistema cuando está sujeto a perturbaciones, y tomar las medidas necesarias para aminorar sus efectos y evitar un posible colapso general<sup>5</sup>.

---

<sup>5</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.

## OBJETIVOS

---

### *Objetivo general*

Elaborar un paquete de computador utilizando MATLAB, que permita realizar la simulación de la máquina síncrona ante gran perturbación empleando la solución particionada con integración explícita.

---

### *Objetivos específicos*

- Modelar la máquina síncrona empleando el modelo clásico. • Modelar la máquina síncrona empleando el modelo clásico, mediante la utilización del software de procesamiento paralelo permitiendo incluir otras máquinas.
- Modelar la máquina síncrona empleando el modelo con regulador de tensión.
- Modelar la máquina síncrona empleando el modelo con estabilizador del sistema de potencia.
- Elaborar la herramienta software que permita simular el comportamiento de los modelos propuestos de la máquina síncrona empleando la solución particionada con integración explícita.

---

# MARCO DE REFERENCIA

---

## 1.1 ANTECEDENTES

En la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) se cuenta con experiencia en el análisis de estabilidad transitoria. Se inició con el trabajo de pregrado de Carlos Rodríguez titulado “Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: Diseño y elaboración”<sup>6</sup>, el mismo autor realizó la tesis de maestría titulada “Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones”<sup>7</sup>; en esta última se buscó mejorar el tiempo de simulación.

Después se llevó a cabo la tesis de maestría del Ingeniero René Alexander Barrera Cárdenas titulada “Modelado de la máquina síncrona mediante redes neuronales”<sup>8</sup> donde se mejoraron los tiempos dado que cada generador se modeló como una red neuronal; el problema que se generaba consistía en la necesidad de entrenar nuevamente la red neuronal que modelaba el generador que cambiaba sus parámetros.

Después se llevó a cabo el trabajo de grado titulado “Modelado y simulación de la máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo” realizado por

---

<sup>6</sup>RODRÍGUEZ SIERRA, Carlos. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: Diseño y elaboración*. Op. cit.

<sup>7</sup>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.

<sup>8</sup>BARRERA CÁRDENAS, René Alexander. *Modelado de la máquina síncrona mediante redes neuronales*. Tesis de Maestría. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2010.

Gerson David Jaimes<sup>9</sup>, en el cual se introdujo el procesamiento paralelo utilizando la unidad de procesamiento gráfico (GPU).

Por último, se llevó a cabo el trabajo de grado titulado “Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada” realizado por Angie Daniela Vásquez Calderón y Janire Guerrero Parra<sup>10</sup>, donde se continuó con el procesamiento paralelo utilizando la unidad de procesamiento gráfico (GPU).

## 1.2 EL FENÓMENO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

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

La necesidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica bajo ciertos estándares de calidad, exige que los sistemas eléctricos de potencia tengan un desempeño adecuado cuando experimentan perturbaciones (fallas en los elementos del sistema de origen interno o externo y cambios en la demanda), concretamente se requiere que el sistema mantenga la estabilidad ante cierto tipo de contingencias específicas. El análisis de estabilidad es el eje central de la teoría de sistemas dinámicos y puede determinarse mediante la solución numérica de las ecuaciones que describen su comportamiento o mediante la aplicación de un método analítico directo<sup>11</sup>.

---

<sup>9</sup>JAIMES SANTOS, Gerson David. 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.

<sup>10</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2016.

<sup>11</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Op. cit., p. 21.

---

# SATURACIÓN Y SISTEMA DE EXCITACIÓN

---

## 2.1 REPRESENTACIÓN DE LA SATURACIÓN MAGNÉTICA

En el desarrollo de las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina síncrona, se asumió que el circuito magnético era lineal y por consiguiente, se aplicaba el principio de superposición. El análisis de la máquina síncrona considerando detalladamente los efectos de saturación del circuito magnético resulta ser muy 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<sup>12</sup>.

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 entre-hierro  $\psi_{at}$ . Las inductancias se calculan en función de factores de saturación:

$$L_{ad} = K_{sd}L_{adu} \quad (2.1)$$

$$L_{aq} = K_{sq}L_{aqu} \quad (2.2)$$

Donde

$K_{sd}$  : Factor de saturación del eje directo

$K_{sq}$  : Factor de saturación del eje en cuadratura

---

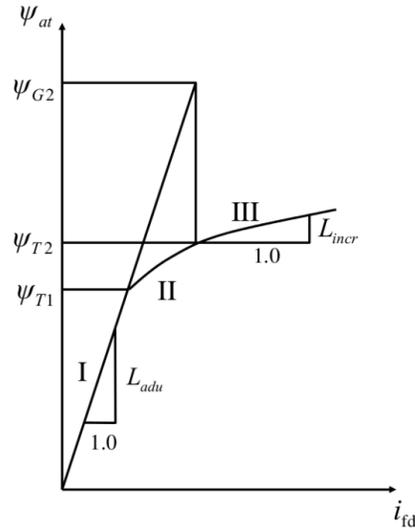
<sup>12</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Op. cit., p. 45-47.

$L_{adu}$ : Valor insaturado de  $L_{ad}$

$L_{aqu}$ : Valor insaturado de  $L_{aq}$

En el modelo, se asume que la relación de saturación entre el flujo resultante en el entre-hierro y la fuerza magnetomotriz (fmm) bajo condiciones de carga, es la misma que bajo condiciones de circuito abierto (CO).

Figura 2.1: Característica de saturación de la máquina síncrona



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

Los factores de saturación son calculados a partir de las características de circuito abierto de los ejes directo y en cuadratura. La relación obtenida a partir de la *figura* (2.1) es la siguiente:

$$K_{sd} = \frac{\psi_{at}}{\psi_{at} + \psi_I} \quad (2.3)$$

Donde  $\psi_I$  se define según la región de la curva en la cual trabaje la máquina. La curva de saturación (ver *figura* 2.1) se divide en tres regiones: región insaturada (I), región no lineal (II) y región lineal completamente saturada (III).

Para la región I definida para  $\psi_{at} \leq \psi_{at1}$ ,

$$\psi_I = 0 \quad (2.4)$$

Para la región II definida para  $\psi_{T1} \leq \psi_{at} \leq \psi_{T2}$ , se empleará la siguiente función exponencial:

$$\psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at} - \psi_{T1})} \quad (2.5)$$

Donde  $A_{sat}$  y  $B_{sat}$  son constantes que dependen de las características de saturación de la región II.

Para la región III, definida para  $\psi_{at} > \psi_{T2}$ ,

$$\psi_I = \psi_{G2} + L_{ratio}(\psi_{at} - \psi_{T2}) - \psi_{at} \quad (2.6)$$

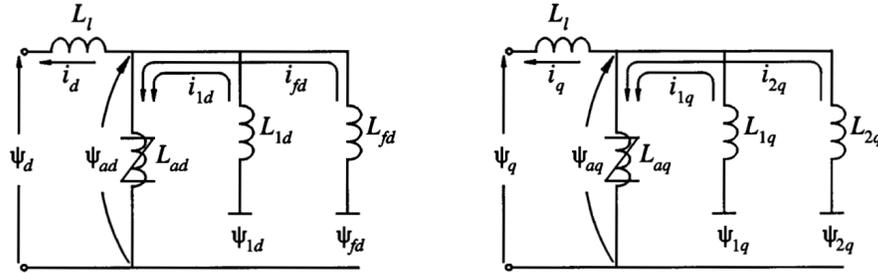
$$L_{ratio} = \frac{L_{adu}}{L_{incr}} \quad (2.7)$$

Además el valor de  $K_{sd}$  para cualquier punto de operación, depende del correspondiente valor del flujo resultante en el entre-hierro dado por:

$$\psi_{at} = \sqrt{\psi_{ad}^2 + \psi_{aq}^2} \quad (2.8)$$

Donde  $\psi_{ad}$  y  $\psi_{aq}$  son los componentes del flujo resultante en el entre-hierro en el eje directo y en cuadratura respectivamente.

Figura 2.2: Circuitos equivalentes con los componentes del flujo resultante en el entre-hierro.



(a) Eje d (b) Eje q FUENTE:  
 KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*.  
 McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

Las componentes del flujo resultante en el entrehierro vienen dadas por:

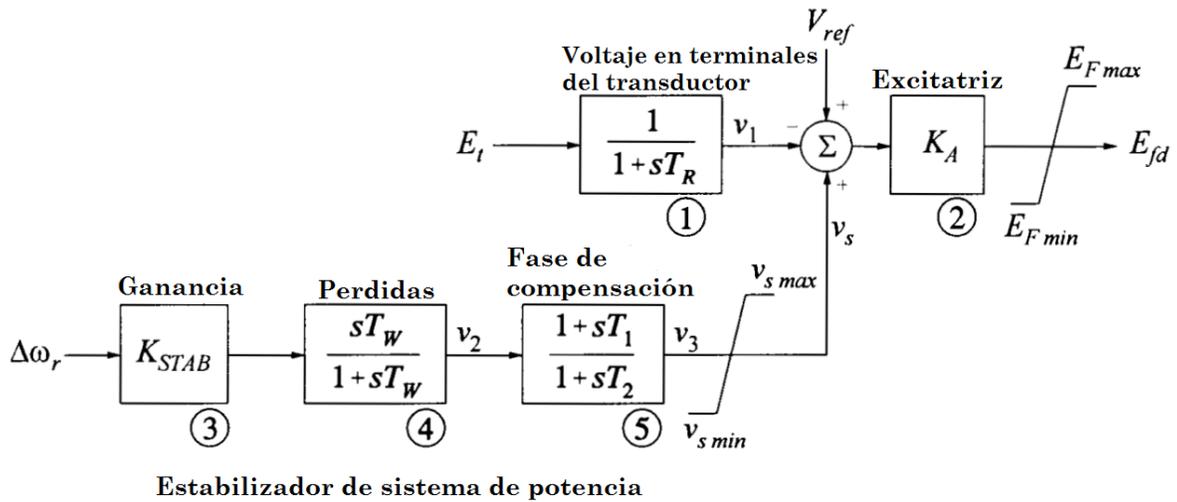
$$\psi_{ad} = \psi_d + L_l i_d = (e_q + R_a i_q) + L_l i_d \quad (2.9)$$

$$\psi_{aq} = \psi_q + L_l i_q = (-e_d - R_a i_d) + L_l i_q \quad (2.10)$$

## 2.2 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

Se considera un sistema de excitación retro-alimentado por tiristor (también conocido como 'De fuente de potencial y rectificador controlado') clasificado como STA1, junto a un regulador automático de tensión (AVR) y un estabilizador del sistema potencia (PSS)<sup>13</sup>. Este sistema cuenta con una alta ganancia de excitación ( $K_A$ ) sin reducir la ganancia transitoria. El modelo de este sistema de excitación se muestra en la *figura (2.3)* y cuenta con límites en el excitador y en la salida del PSS.

Figura 2.3: Sistema de excitación con AVR y PSS.



FUENTE: KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958. Traducido por el autor.

Para una excitatriz de tiristor con fuente de potencial, la tensión varía con la tensión en los terminales del generador ( $E_t$ ) y la corriente de excitación de salida ( $I_{fd}$ ).

$$E_{Fmax} = V_{Rmax}E_t - K_c I_{fd} \quad (2.11)$$

$$E_{Fmin} = V_{Rmin}E_t \quad (2.12)$$

Al bloque 1 de la *figura (2.3)* lo representa la siguiente ecuación:

<sup>13</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Op. cit., p. 42-44.

$$pv_1 = \frac{E_t - v_1}{T_R} \quad (2.13)$$

Los bloques 3 y 4, son representados por:

$$pv_2 = K_{STAB} p \Delta w_r - \frac{v_2}{T_w} \quad (2.14)$$

Del bloque 5, se obtiene:

$$pv_3 = \frac{T_1 pv_2 + v_2 - v_3}{T_2} \quad (2.15)$$

A partir del término  $pv_2$  dado por la ecuación (2.14) se obtiene la salida del estabilizador.

$$v_s = v_3 \quad (2.16)$$

Destacando que  $v_s$  se encuentra en el rango:

$$v_{smin} \leq v_s \leq v_{smax} \quad (2.17)$$

A partir del bloque 2, se expresa la salida del excitador como:

$$E_{fd} = K_A [V_{ref} - v_1 + v_s] \quad (2.18)$$

Destacando que  $E_{fd}$  se encuentra en el rango:

$$E_{Fmin} \leq E_{fd} \leq E_{Fmax} \quad (2.19)$$

La tensión de campo del generador ( $e_{fd}$ ) en el sistema en  $pu$  es proporcional a la tensión de salida de la excitatriz ( $E_{fd}$ ), relacionándose así:

$$e_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} \quad (2.20)$$

### Valores iniciales de las variables del sistema de excitación

Para el estado estable del generador, la tensión de campo ( $e_{fd}$ ) se determina por la ecuaciones del generador. Los valores del sistema de excitación se determinan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_{fd} &= \frac{L_{adu}}{R_{fd}} e_{fd} \\ v_1 &= E_t \\ v_2 &= 0 \\ v_s &= 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Y la tensión de referencia para el regulador automático de tensión (AVR) es:

$$V_{ref} = \frac{E_{fd}}{K_A} + v_1 \quad (2.22)$$

Cabe destacar que el valor de referencia expresado en la ecuación (2.22) toma valores apropiados de acuerdo con las condiciones de carga del generador antes de haber ocurrido una perturbación es decir, en estado estable.

---

# METODOLOGÍA

---

En el presente capítulo se presentan las ecuaciones algebraicas que modelan el comportamiento de los sistemas de potencia y las ecuaciones diferenciales que modelan la dinámica de las máquinas síncronas, y se explica la manera como se llevó a cabo la solución particionada de las ecuaciones algebraicas y diferenciales para simular el comportamiento de la máquina síncrona ante una gran perturbación.

## 3.1 ECUACIONES ALGEBRAICAS

Las ecuaciones algebraicas de un sistema de potencia multimáquina de  $n$  barras conectado a una barra infinita se presenta a continuación:

$$Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + \cdots + Y_{1n}V_n = y_{1b}V_b + y_{s1}E_1'' \quad (3.1)$$

$$Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + \cdots + Y_{2n}V_n = y_{2b}V_b + y_{s2}E_2'' \quad (3.2)$$

$$Y_{n1}V_1 + Y_{n2}V_2 + \cdots + Y_{nn}V_n = y_{nb}V_b + y_{sn}E_n'' \quad (3.3)$$

Donde:

$Y_{ii}$  = Término de la diagonal de la matriz de admitancias de barras del sistema en el marco de referencia común R-I

$Y_{ij}$  = Término de fuera de la diagonal de la matriz de admitancias de barras del sistema en el marco de referencia común R-I

$y_{si}$  = Adnitancia del estator de la máquina  $i$  en el marco de referencia común R-I

$y_{ib}$  =Admitancia entre la barra i y la barra infinita b

$V_i$  =Tensión de la barra i en el márco de referencia R-I

$E_i''$  =Tensión interna subtransitoria de la máquina i en el marco de referencia R-I

Expresando las ecuaciones (3.1) a (3.3) en forma matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{s1} & 0 & \cdots & 0 & y_{1b} \\ 0 & y_{s2} & \cdots & 0 & y_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & y_{sn} & y_{nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1'' \\ E_2'' \\ \vdots \\ E_n'' \\ V_b \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Al despejar de la ecuación (3.4) se obtiene la expresión matricial para calcular el vector de tensiones de barra del sistema en el marco de referencia común R-I como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_{s1} & 0 & \cdots & 0 & y_{1b} \\ 0 & y_{s2} & \cdots & 0 & y_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & y_{sn} & y_{nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1'' \\ E_2'' \\ \vdots \\ E_n'' \\ V_b \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Las ecuaciones que permiten calcular las componentes real e imaginaria de la tensión interna subtransitoria de la máquina i en el marco de referencia R-I son las siguientes<sup>14</sup>:

$$E_R'' = -\frac{X_{1q}''}{L_{1q}} \psi_{1q} \sin(\delta) - \frac{X_{2q}''}{L_{2q}} \psi_{2q} \sin(\delta) + \frac{X_{fd}''}{L_{fd}} \psi_{fd} \cos(\delta) + \frac{X_{1d}''}{L_{1d}} \psi_{1d} \cos(\delta) \quad (3.6)$$

$$E_I'' = \frac{X_{fd}''}{L_{fd}} \psi_{fd} \sin(\delta) + \frac{X_{1d}''}{L_{1d}} \psi_{1d} \sin(\delta) + \frac{X_{1q}''}{L_{1q}} \psi_{1q} \cos(\delta) + \frac{X_{2q}''}{L_{2q}} \psi_{2q} \cos(\delta) \quad (3.7)$$

## 3.2 ECUACIONES DE MOVIMIENTO

Las ecuaciones que modelan la dinámica oscilatoria de la máquina síncrona son las siguientes:

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r) \quad (3.8)$$

<sup>14</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Op. cit., p. 55.

$$p\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (3.9)$$

Donde:

$\omega_0$  :  $2\pi f_0$  en rad/s eléctricos

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

$p$  : operador derivativo  $d/dt$

### 3.3 ECUACIONES DE LOS CIRCUITOS DEL ROTOR

Las ecuaciones que modelan la dinámica de los circuitos del rotor de la máquina síncrona son las siguientes<sup>15</sup>:

$$\begin{aligned} p\psi_{fd} = & \omega_0 e_{fd} + \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[ \left( \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} - \frac{L''_{ads} X''_q X''_{ads}}{\det(A) * L_{fd}} - 1 \right) \psi_{fd} + \left( \frac{L''_{ads}}{L_{1d}} - \frac{L''_{ads} X''_q X''_{ads}}{\det(A) * L_{1d}} \right) \psi_{1d} \right. \\ & + \left( \frac{L''_{ads} R_a X''_{aqs}}{\det(A) * L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left( \frac{L''_{ads} R_a X''_{aqs}}{\det(A) * L_{2q}} \right) \psi_{2q} + \frac{L''_{ads} R_a}{\det(A)} E_R \sin(\delta) \\ & \left. + \frac{L''_{ads} X''_q}{\det(A)} E_R \cos(\delta) - \frac{L''_{ads} R_a}{\det(A)} E_I \cos(\delta) + \frac{L''_{ads} X''_q}{\det(A)} E_I \sin(\delta) \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} p\psi_{1d} = & \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left[ \left( \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} - \frac{L''_{ads} X''_q X''_{ads}}{\det(A) * L_{fd}} \right) \psi_{fd} + \left( \frac{L''_{ads}}{L_{1d}} - \frac{L''_{ads} X''_q X''_{ads}}{\det(A) * L_{1d}} - 1 \right) \psi_{1d} \right. \\ & + \left( \frac{L''_{ads} R_a X''_{aqs}}{\det(A) * L_{1q}} \right) \psi_{1q} + \left( \frac{L''_{ads} R_a X''_{aqs}}{\det(A) * L_{2q}} \right) \psi_{2q} + \frac{L''_{ads} R_a}{\det(A)} E_R \sin(\delta) \\ & \left. + \frac{L''_{ads} X''_q}{\det(A)} E_R \cos(\delta) - \frac{L''_{ads} R_a}{\det(A)} E_I \cos(\delta) + \frac{L''_{ads} X''_q}{\det(A)} E_I \sin(\delta) \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} p\psi_{1q} = & \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left[ - \left( \frac{L''_{aqs} R_a X''_{ads}}{\det(A) * L_{fd}} \right) \psi_{fd} - \left( \frac{L''_{aqs} R_a X''_{ads}}{\det(A) * L_{1d}} \right) \psi_{1d} \right. \\ & + \left( \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} - \frac{L''_{aqs} X''_d X''_{aqs}}{\det(A) * L_{1q}} - 1 \right) \psi_{1q} + \left( \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} - \frac{L''_{aqs} X''_d X''_{aqs}}{\det(A) * L_{2q}} \right) \psi_{2q} \\ & \left. + \frac{L''_{aqs} R_a}{\det(A)} E_R \cos(\delta) - \frac{L''_{aqs} X''_d}{\det(A)} E_R \sin(\delta) + \frac{L''_{aqs} R_a}{\det(A)} E_I \sin(\delta) + \frac{L''_{aqs} X''_d}{\det(A)} E_I \cos(\delta) \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

<sup>15</sup>VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada. Op. cit., p. 54-55.

$$\begin{aligned}
 p\psi_{2q} = & \frac{w_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left[ - \left( \frac{L''_{aqs} R_a X''_{ads}}{\det(A) * L_{fd}} \right) \psi_{fd} - \left( \frac{L''_{aqs} R_a X''_{ads}}{\det(A) * L_{1d}} \right) \psi_{1d} + \left( \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} - \frac{L''_{aqs} X''_d X''_{aqs}}{\det(A) * L_{1q}} \right) \psi_{1q} \right. \\
 & + \left( \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} - \frac{L''_{aqs} X''_d X''_{aqs}}{\det(A) * L_{2q}} - 1 \right) \psi_{2q} + \frac{L''_{aqs} R_a}{\det(A)} E_R \cos(\delta) - \frac{L''_{aqs} X''_d}{\det(A)} E_R \sin(\delta) \\
 & \left. + \frac{L''_{aqs} R_a}{\det(A)} E_I \sin(\delta) + \frac{L''_{aqs} X''_d}{\det(A)} E_I \cos(\delta) \right] \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Donde:

$E_R$  =Componente real de la tensión en las terminales de la máquina en el marco de referencia común R-I

$E_I$  =Componente imaginaria de la tensión en las terminales de la máquina en el marco de referencia común R-I

### 3.4 VERSIÓN GILL DEL MÉTODO DE RUNGE KUTTA DE CUARTO ORDEN

La versión Gill del método de Runge Kutta de cuarto orden es un método de integración numérico que permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales de cuarto orden. Con  $x_0$  como el valor inicial de  $x$  en el comienzo de un paso de tiempo y utilizando  $j = 1, 2, 3, 4$  para denotar cuatro etapas, cada etapa del método de Gill puede ser descrita como sigue<sup>16</sup>:

$$k_j = a_j [f(x_{j-1}, t) - b_j q_{j-1}] \quad (3.14)$$

$$x_j = x_{j-1} + k_j \Delta t \quad (3.15)$$

$$q_j = q_{j-1} + 3k_j - c_j f(x_{j-1}, t) \quad (3.16)$$

Los valores de los coeficientes a, b y c son los siguientes:

$$a_1 = 1/2, b_1 = 2, c_1 = a_1, a_2 = 1 - \sqrt{0,5}, b_2 = 1, c_2 = a_2$$

$$a_3 = 1 + \sqrt{0,5}, b_3 = 1, c_3 = a_3, a_4 = 1/6, b_4 = 2, c_4 = 1/2$$

La solución al final de un paso de tiempo es dada por  $x_4$ . Inicialmente  $q_0 = 0$ , a partir de entonces, al avanzar la solución, el  $q_0$  para el siguiente paso es igual al  $q_4$  del paso anterior.

<sup>16</sup>KUNDUR, Op. cit., p. 840.

### 3.5 SOLUCIÓN PARTICIONADA CON INTEGRACIÓN EXPLÍCITA

En este método, las ecuaciones algebraicas y diferenciales se resuelven por separado para obtener las tensiones en las barras del sistema ( $V_1, V_2, \dots, V_n$ ) y las variables de estado de cada máquina ( $\psi_{fd}, \psi_{1d}, \psi_{1q}, \psi_{2q}, \Delta\omega$  y  $\delta$ ).

Inmediatamente después de ocurrida una perturbación, se resuelven las ecuaciones algebraicas mediante la ecuación (3.5) para obtener los nuevos valores de las tensiones de barra. A partir de los nuevos valores de las tensiones de barra en el marco de referencia común R-I, se calcula mediante las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19), las corrientes inyectadas en las barras del sistema, la potencia activa en las terminales de las máquinas y el torque en el entrehierro de cada máquina de manera respectiva.

$$I(x, V) = Y_N V \quad (3.17)$$

$$P_t = V_R I_R + V_I I_I \quad (3.18)$$

$$T_e = P_t + R_a * \sqrt{I_R^2 + I_I^2} \quad (3.19)$$

Por cada máquina se resuelven las ecuaciones diferenciales para hallar las variables de estado de cada máquina. El método de integración explícita que se escogió para resolver las ecuaciones diferenciales es la versión Gill del método de Runge Kutta de cuarto orden la cual consta de cuatro etapas denotadas por  $j = 1, 2, 3, 4$ .

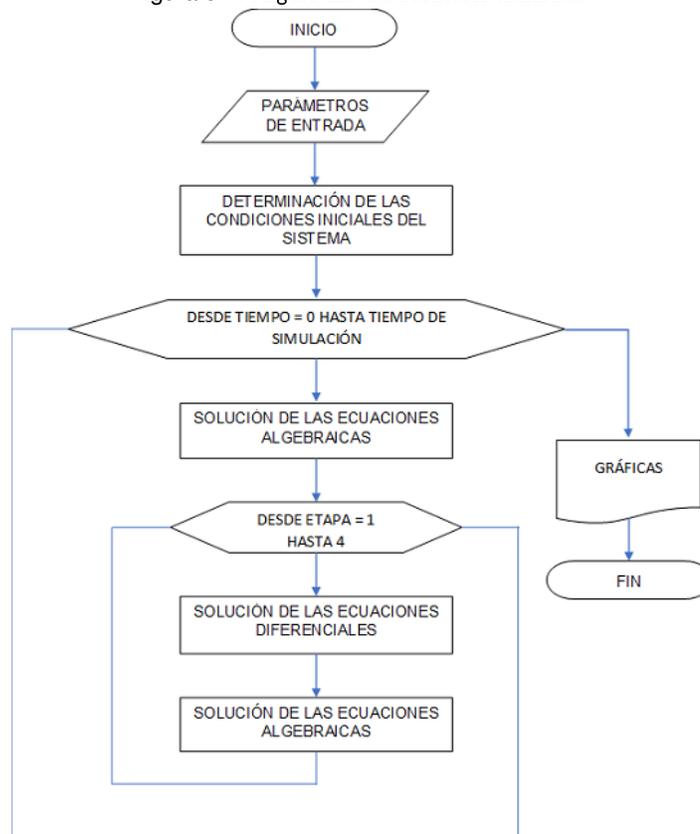
Con los valores de las tensiones de barra obtenidos en la solución de las ecuaciones algebraicas y los valores iniciales de las variables de estado  $x_0$ , se calculan las derivadas de las variables de estado con respecto al tiempo  $f(x, V)$  mediante las ecuaciones (3.10), (3.11), (3.12) y (3.13) y con  $j=1$  en las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.16) se calculan las variables  $k_1, x_1$  y  $q_1$ , siendo  $x_1$  la variable que representa los nuevos valores de las variables de estado. Luego con  $x = x_1$  se resuelven las ecuaciones algebraicas mediante la ecuación (3.5) para obtener los nuevos valores de las tensiones de barra. A partir de los nuevos valores de las tensiones de barra, se calcula mediante las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19), las corrientes inyectadas en las barras del sistema, la potencia activa en las terminales de las máquinas y el torque en el entrehierro de cada máquina de manera respectiva. Con los valores de las tensiones de barra obtenidos en la solución de las ecuaciones algebraicas y los valores iniciales de las variables de estado  $x_1$ , se calculan las derivadas de las variables de estado con respecto al tiempo  $f(x, V)$  mediante las ecuaciones (3.10), (3.11), (3.12) y (3.13) y con  $j = 2$  en las ecuaciones (3.14), (3.15) y (3.16) se calculan las variables  $k_2, x_2$  y  $q_2$ , siendo  $x_2$  la variable que representa los nuevos valores de las variables de estado. Luego con  $x = x_2$  se resuelven las ecuaciones algebraicas mediante

la ecuación (3.5) para obtener los nuevos valores de las tensiones de barra. A partir de los nuevos valores de las tensiones de barra, se calcula mediante las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19), las corrientes inyectadas en las barras del sistema, la potencia activa en las terminales de las máquinas y el torque en el entrehierro de cada máquina de manera respectiva. Este proceso que envuelve alternadamente la solución de las ecuaciones algebraicas y diferenciales es aplicado sucesivamente hasta calcular  $x_4$  que representa la solución al final de cada paso de tiempo.

### 3.6 ALGORITMO DE SOLUCIÓN

En la figura (3.1) que se expone a continuación, se presenta el algoritmo que se utilizó para resolver las ecuaciones algebraicas y diferenciales empleando la solución particionada con integración explícita.

Figura 3.1: Algoritmo de solución utilizado



---

# RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

---

El algoritmo de simulación fue implementado sobre un generador conectado a una barra infinita, considerando cuatro modelos de la máquina síncrona: modelo clásico, modelo con tensión de excitación constante ( $E_{fd}$  constante), modelo con regulador automático de tensión (AVR) y modelo con regulador automático de tensión y estabilizador del sistema de potencia (AVR y PSS). En cada uno de estos casos se evidencia el comportamiento de las principales variables del sistema mediante gráficas respecto al tiempo, dichas variables son:

- Ángulo del rotor
- Desviación del ángulo del rotor
- Tensiones de todas las barras
- Tensiones de las barras con generación
- Torque de los generadores
- Tensión de excitación ( $E_{fd}$ )

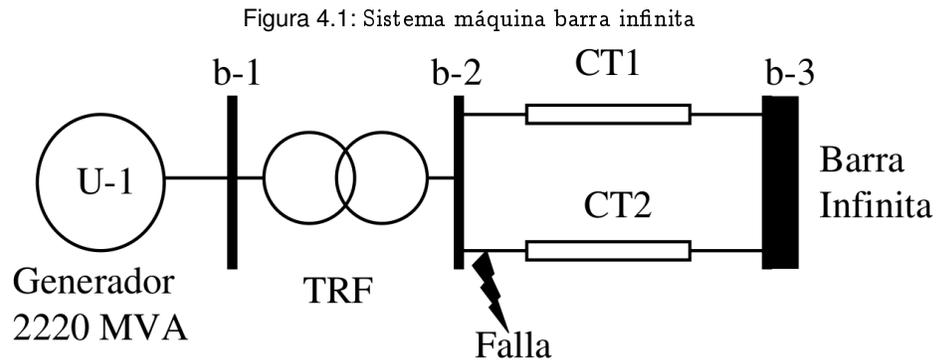
## 4.1 CASO: SISTEMA DE BARRA INFINITA

El sistema consiste en un generador conectado a una barra infinita (ver *figura* (4.1)), el cual corresponde al ejemplo 13.2 del libro de KUNDUR<sup>17</sup> donde las reactancias del transformador, el circuito uno (CT1) y el circuito 2 (CT2) del sistema tienen valores en por unidad sobre

---

<sup>17</sup>KUNDUR, Op. cit., p. 864.

una base de 2220 MVA de 0.15, 0.5 y 0.93 respectivamente. Se considera una falla trifásica que ocurre en un tiempo de falla  $t_f = 1 [s]$  entre las barras 2 y 3, donde la barra directamente afectada por la falla es la 2 (debido a su cercanía con la misma) y se logra despejar después de 0,07 [s] de iniciarse.



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

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con cada uno de los modelos:

---

**4.1.1 Modelo clásico** El modelo clásico de la máquina se describe a través de las ecuaciones de movimiento expuestas en la sección (3.2). Al resolver las ecuaciones de movimiento se obtienen los ángulos de los rotores de las máquinas y las desviaciones de velocidad de los rotores.

En las *figuras* (4.2) a (4.8) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes variables del sistema.

Figura 4.2: Ángulo del rotor [Grados] - Modelo clásico

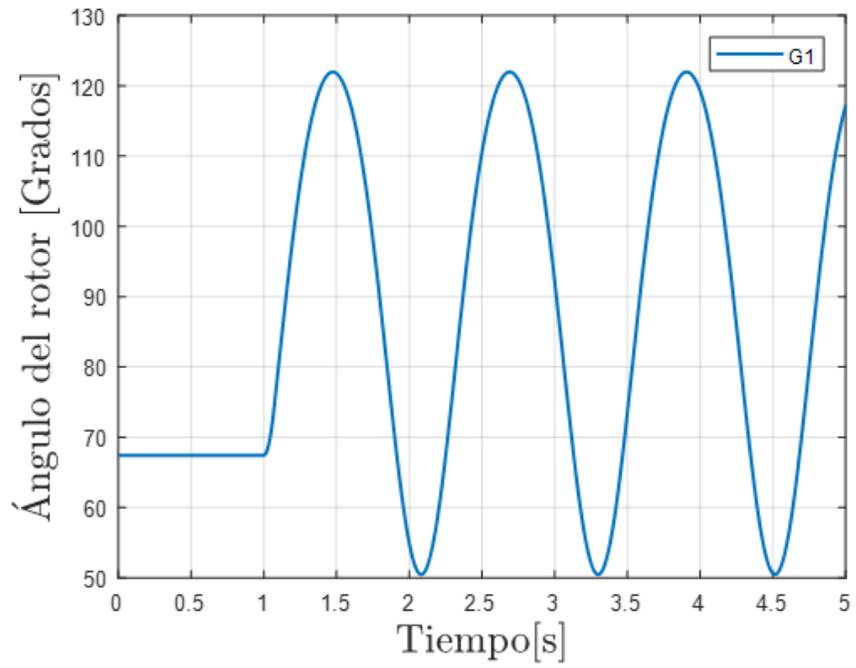


Figura 4.3: Desviación del ángulo del rotor [pu] - Modelo clásico

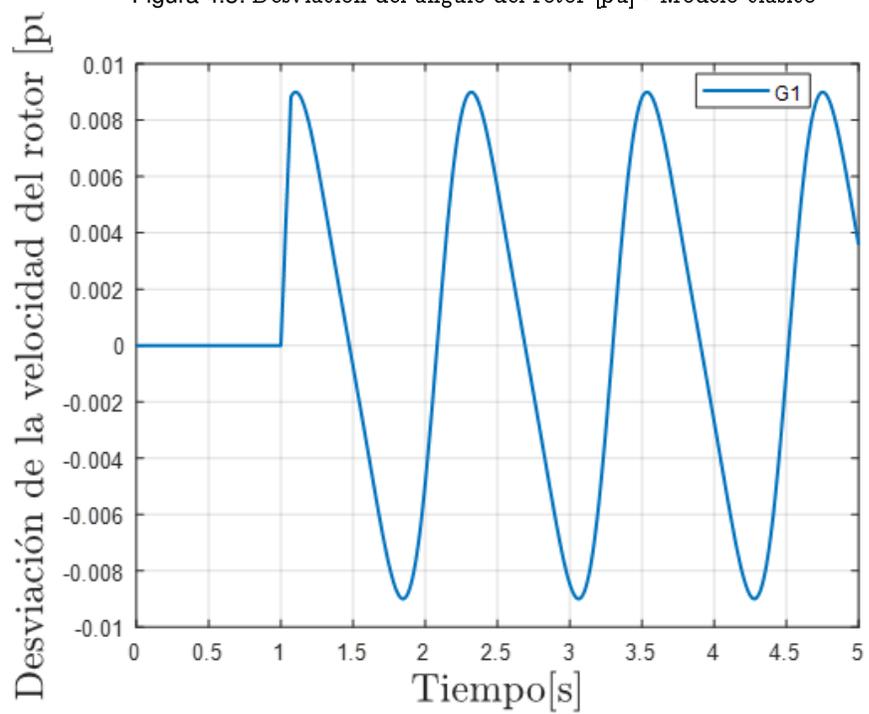


Figura 4.4: Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo clásico

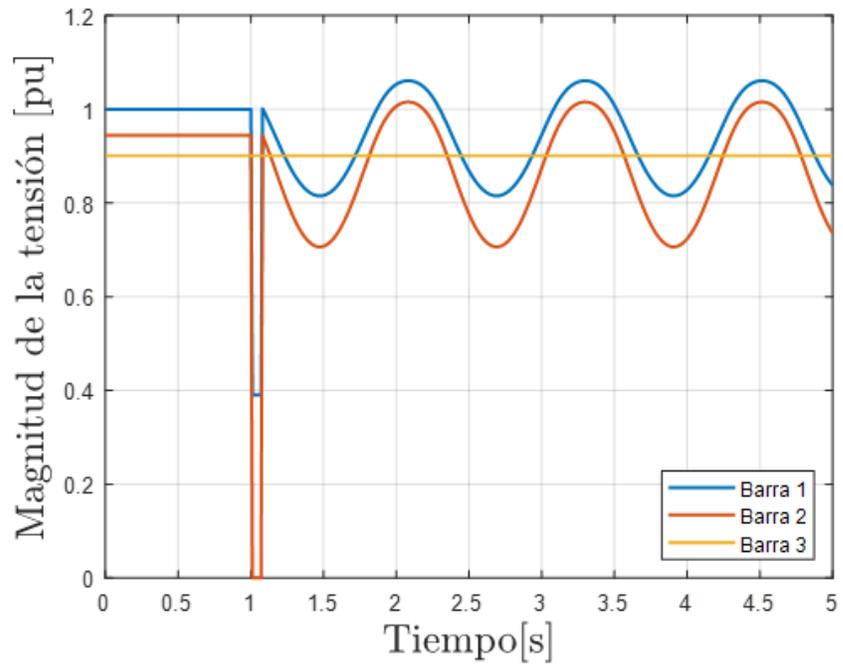


Figura 4.5: Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo clásico

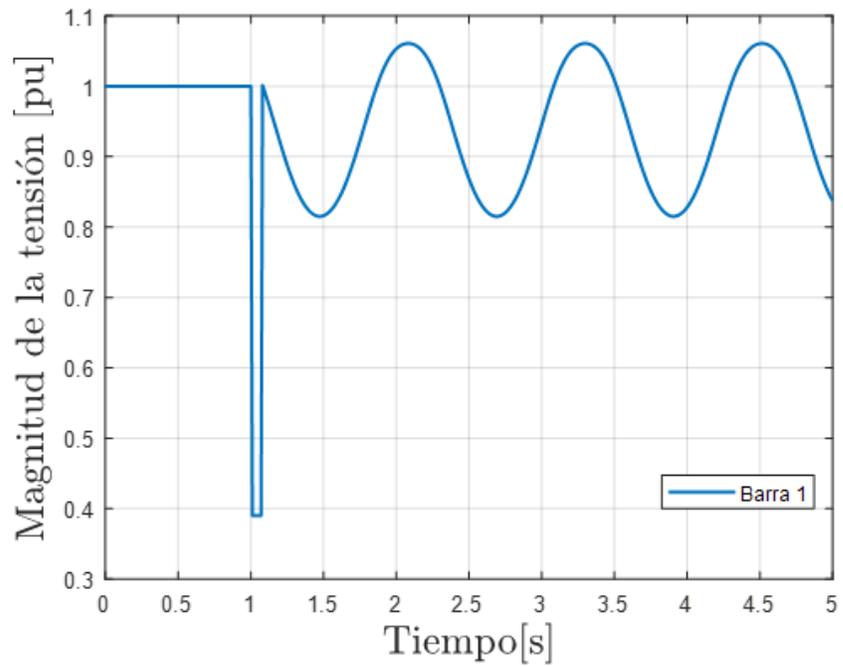


Figura 4.6: Torque en el entrehierro - Modelo clásico

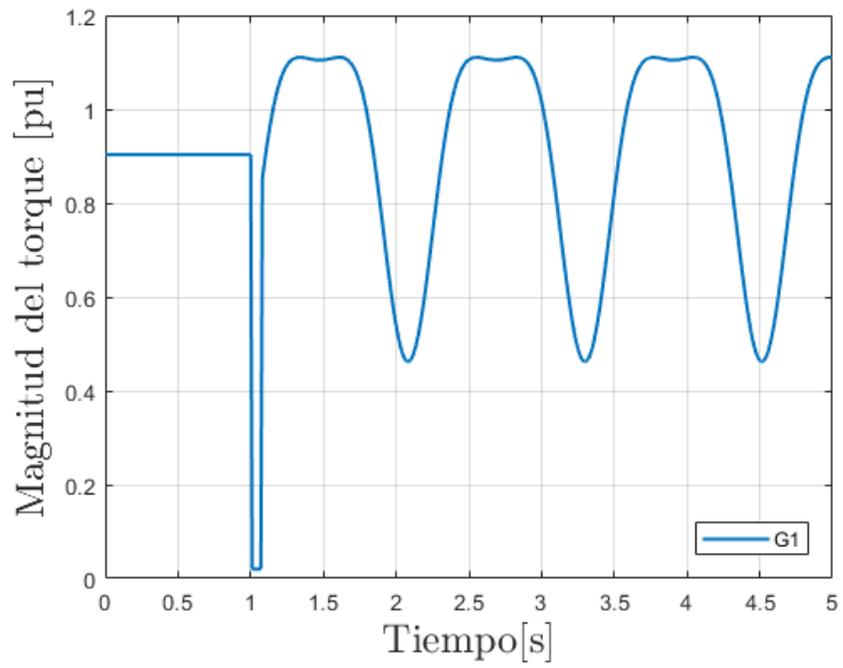


Figura 4.7: Potencia en el entrehierro - Modelo clásico

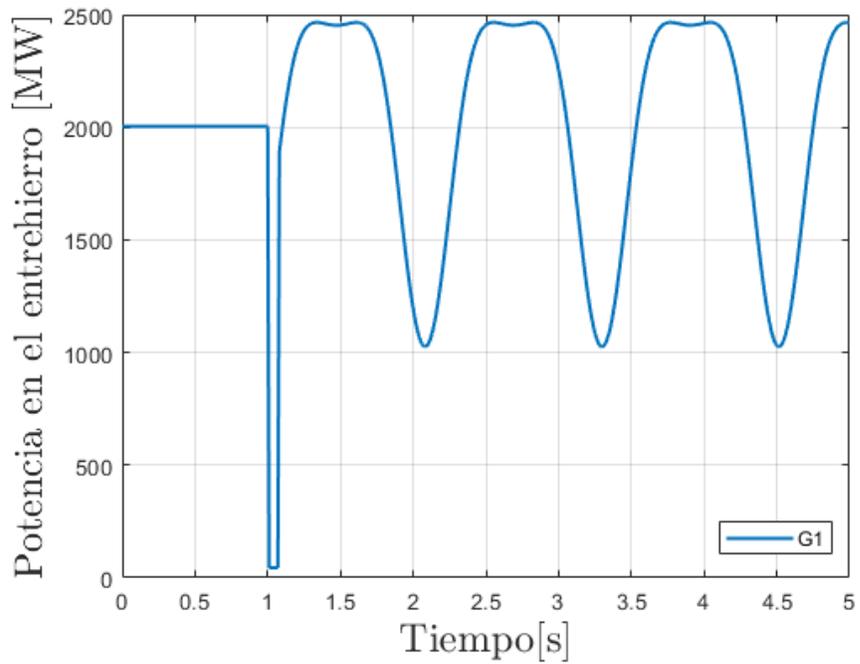
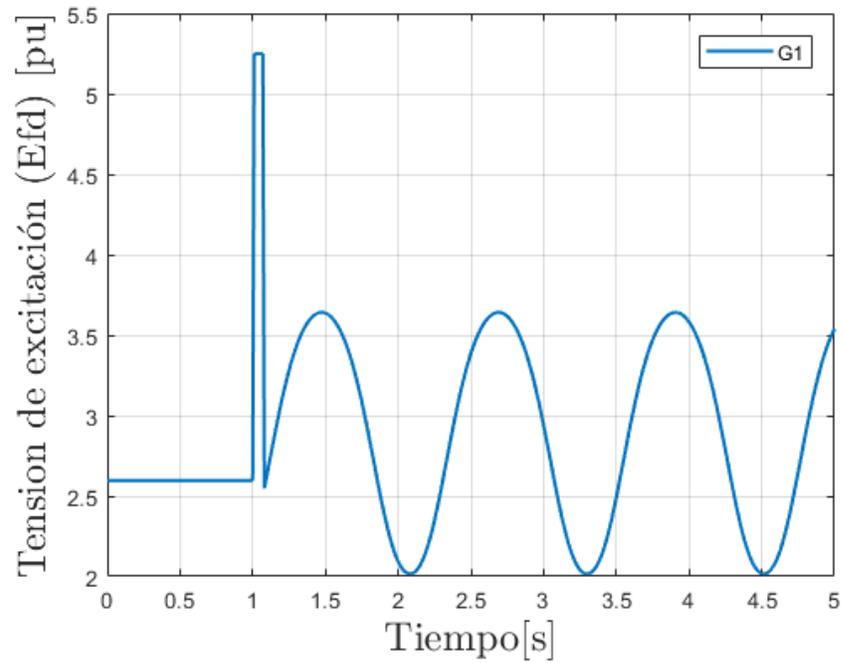


Figura 4.8: Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo clásico



---

**4.1.2 Modelo con tensión de excitación constante** Bajo éste modelo la tensión de excitación  $E_{fd}$  se mantiene constante y se resuelven las ecuaciones de movimiento y las ecuaciones de los circuitos del rotor expuestas en las secciones (3.2) y (3.3) respectivamente.

En las figuras (4.9) a (4.15) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes variables del sistema.

Figura 4.9: Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con  $E_{fd}$  constante

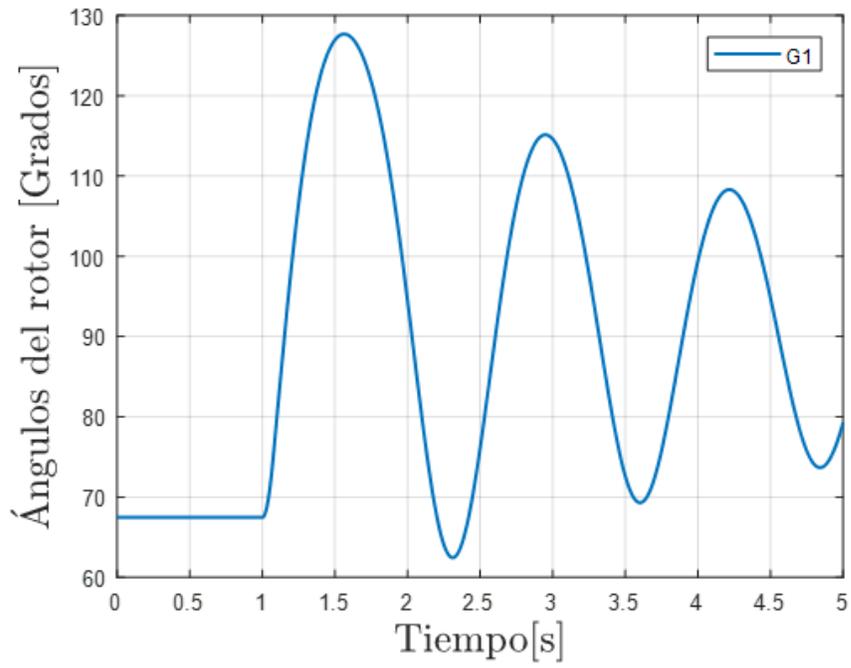


Figura 4.10: Desviación de la velocidad del rotor [pu] - Modelo con  $E_{fd}$  constante

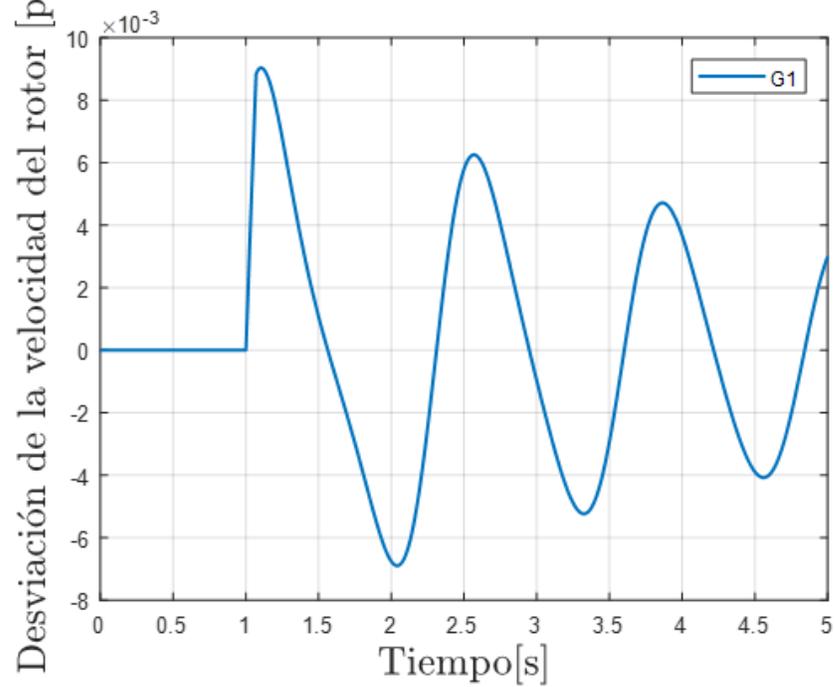


Figura 4.11: Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con  $E_{fd}$  constante

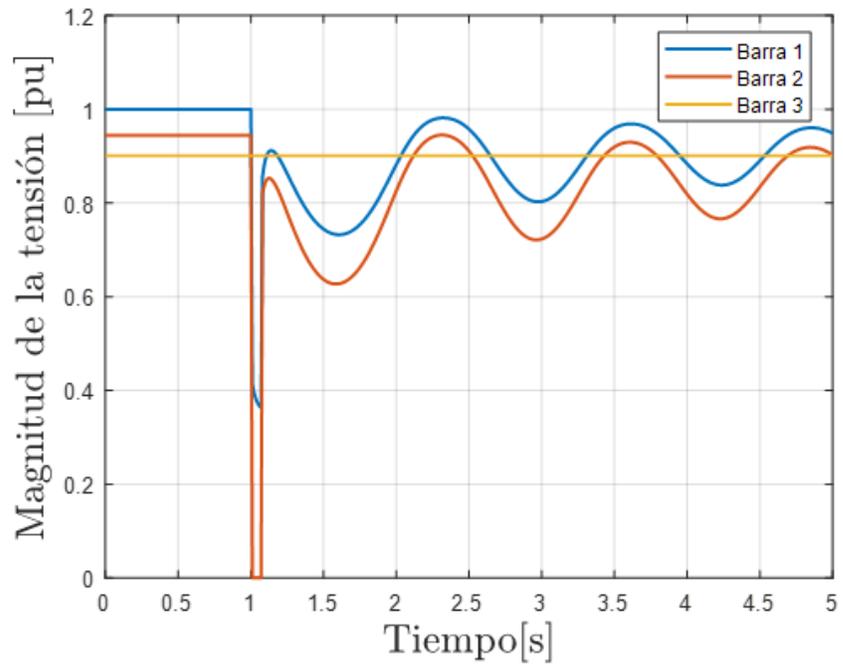


Figura 4.12: Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados- Modelo con  $E_{fd}$  constante

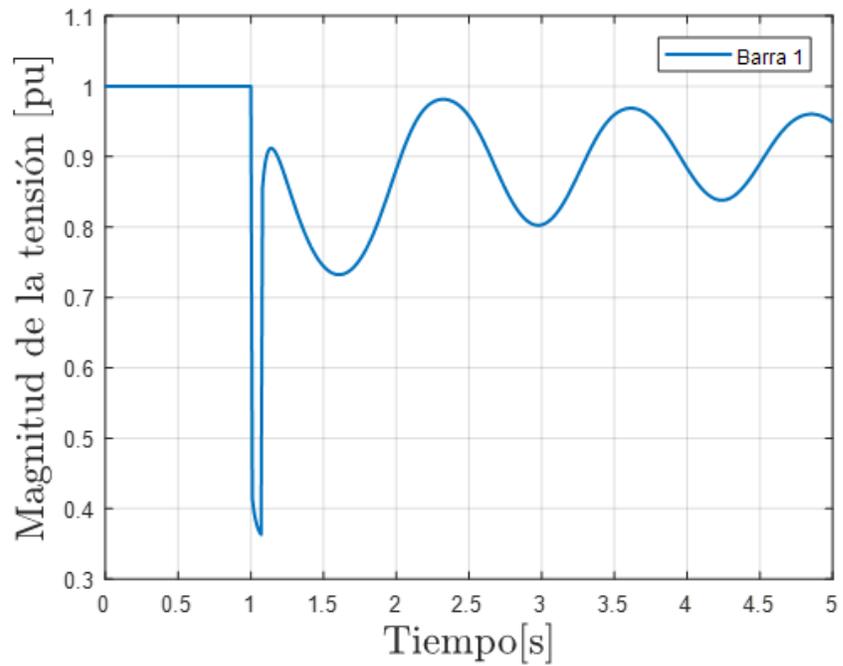


Figura 4.13: Torque en el entrehierro - Modelo con  $E_{fd}$  constante

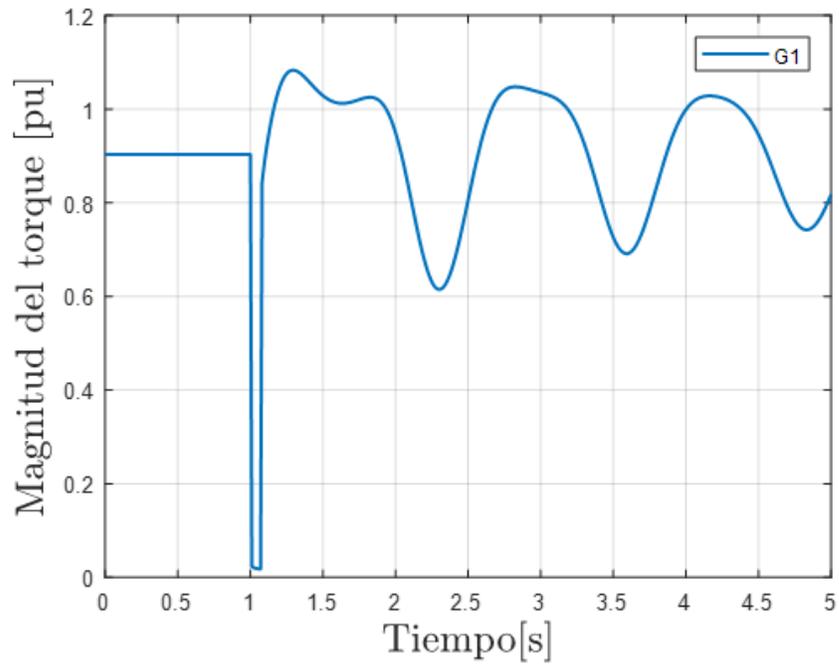


Figura 4.14: Potencia en el entrehierro - Modelo con  $E_{fd}$  constante

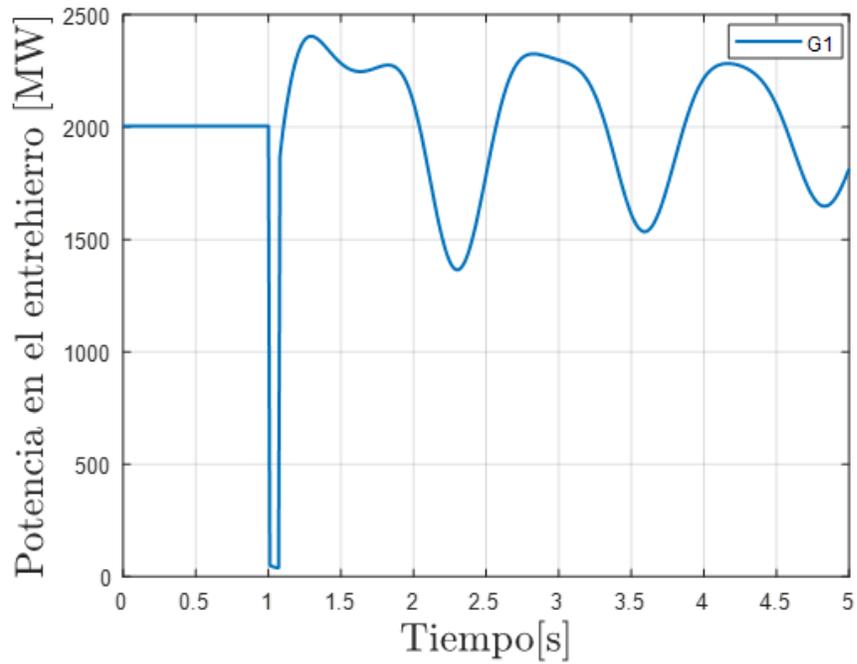
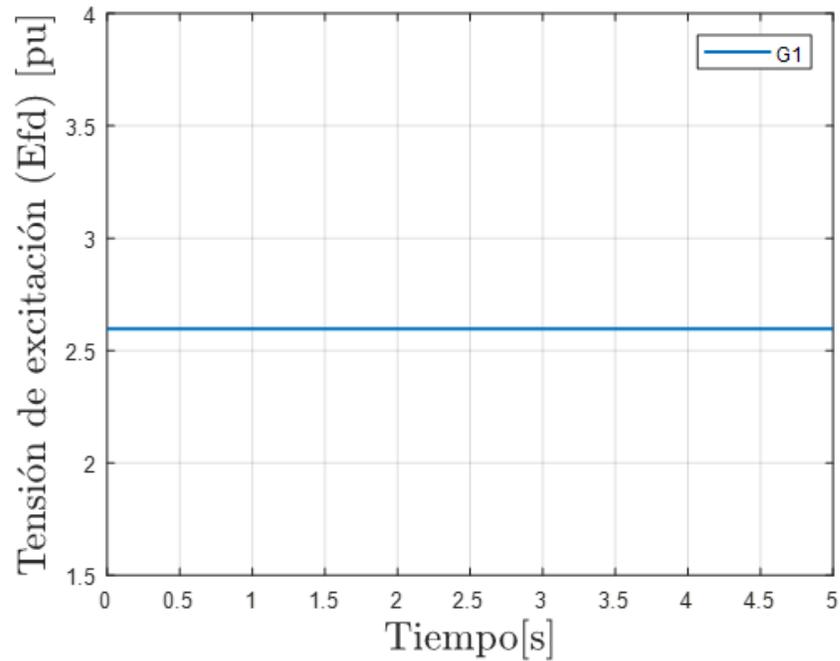


Figura 4.15: Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con  $E_{fd}$  constante



---

**4.1.3 Modelo con Regulador Automático de Tensión (AVR)** El modelo con regulador automático de tensión (AVR) de la máquina se describe a través de las ecuaciones de movimiento y del circuito rotor expuestas en las secciones (3.2) y (3.3) respectivamente, y a través de las ecuaciones del sistema de excitación que se refieren al AVR expuestas en la sección (2.2).

En las figuras (4.16) a (4.22) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes variables del sistema.

Figura 4.16: Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con AVR

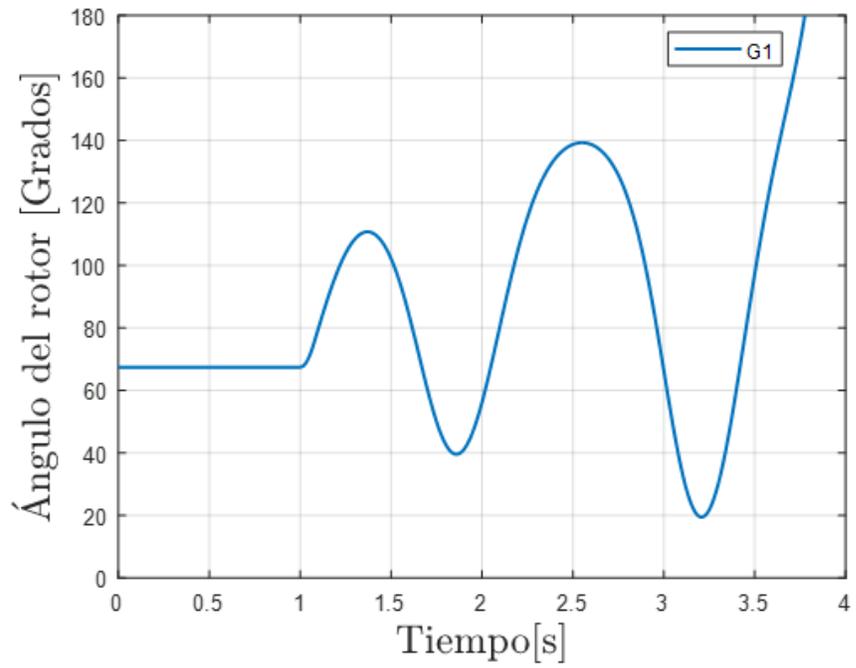


Figura 4.17: Desviación de la velocidad del ángulo del rotor [pu] - Modelo con AVR

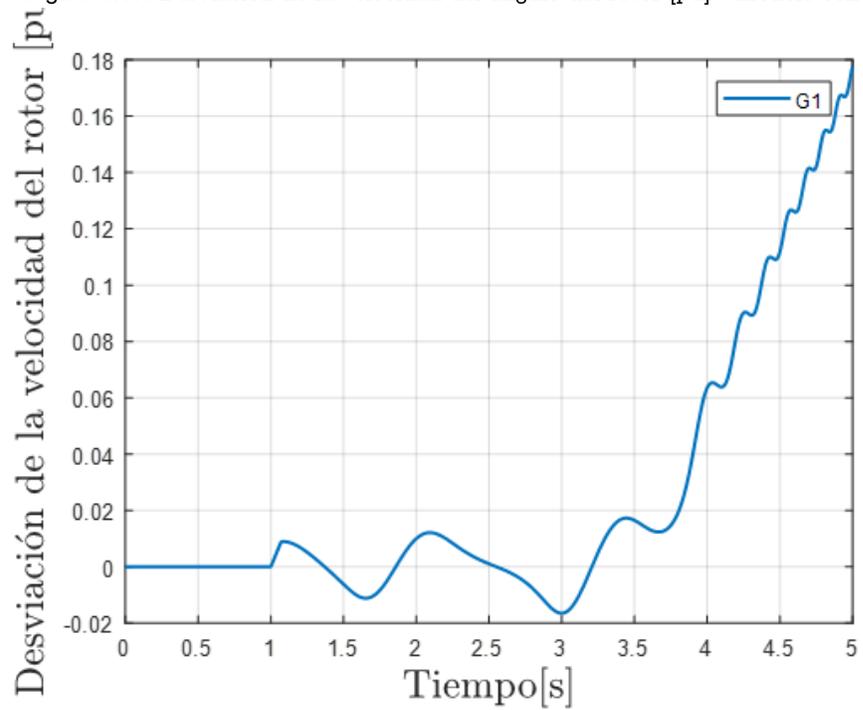


Figura 4.18: Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con AVR

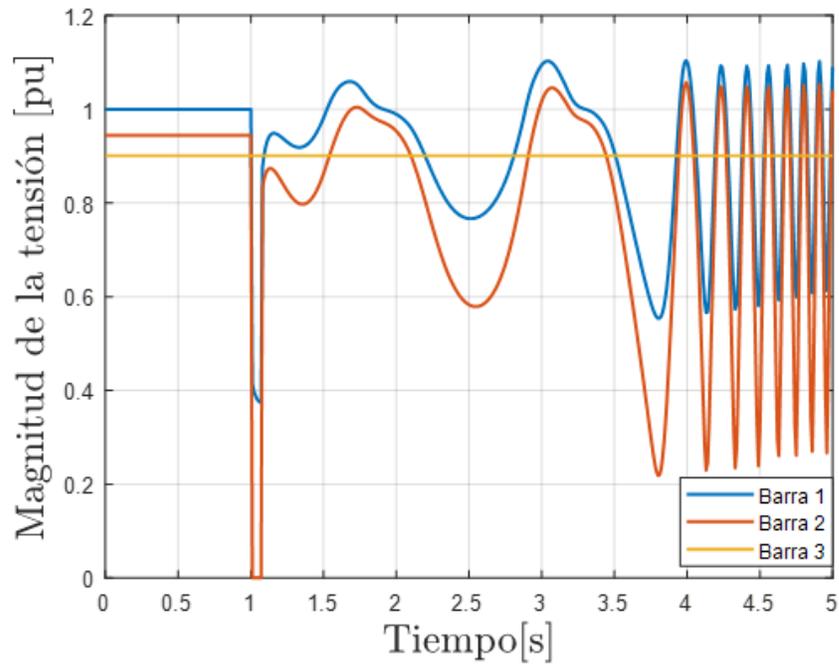


Figura 4.19: Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo con AVR

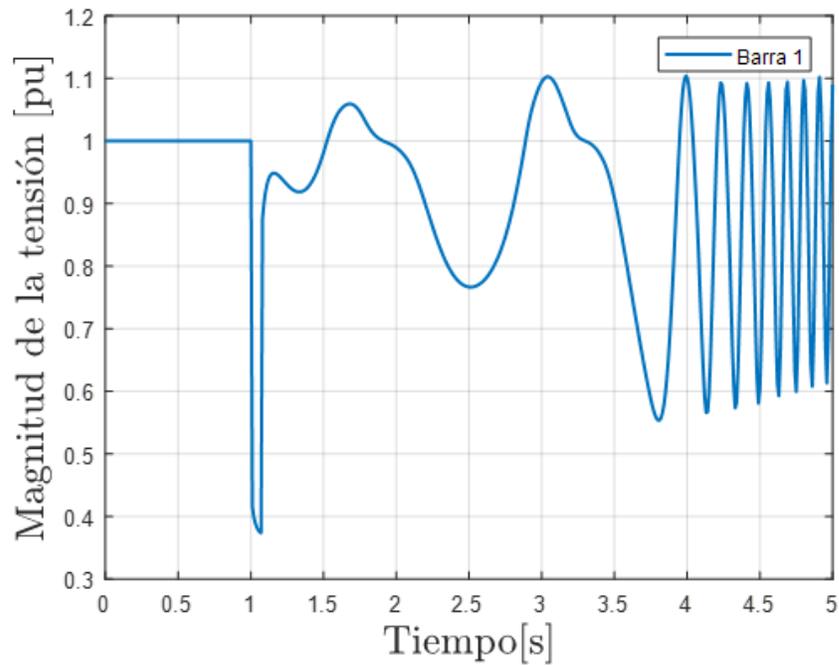


Figura 4.20: Torque en el entrehierro - Modelo con AVR

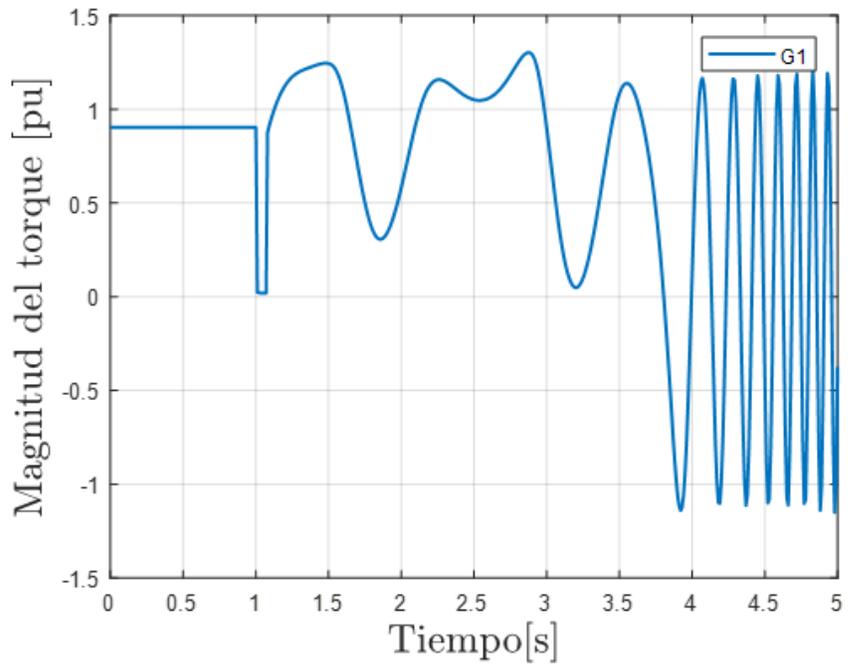


Figura 4.21: Potencia en el entrehierro - Modelo con AVR

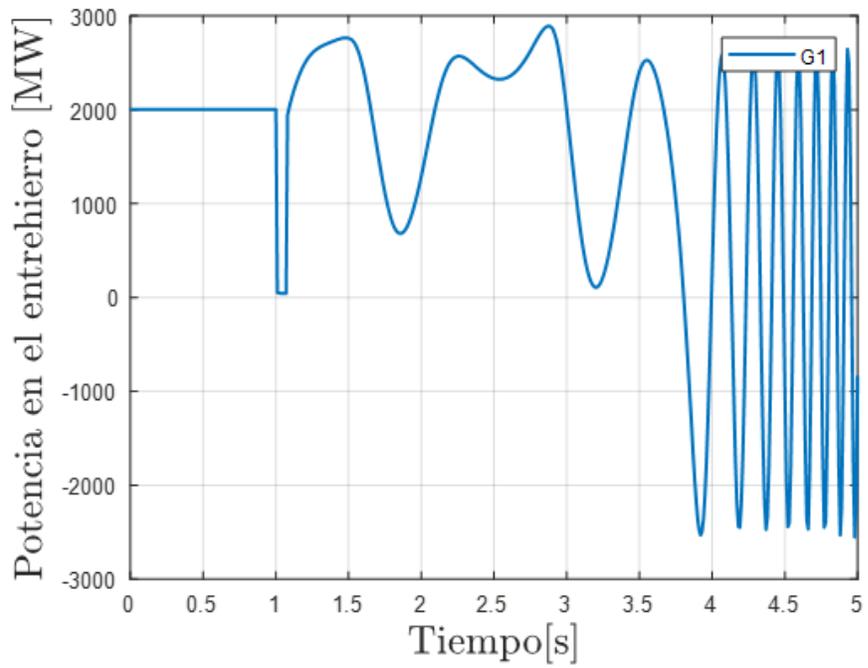
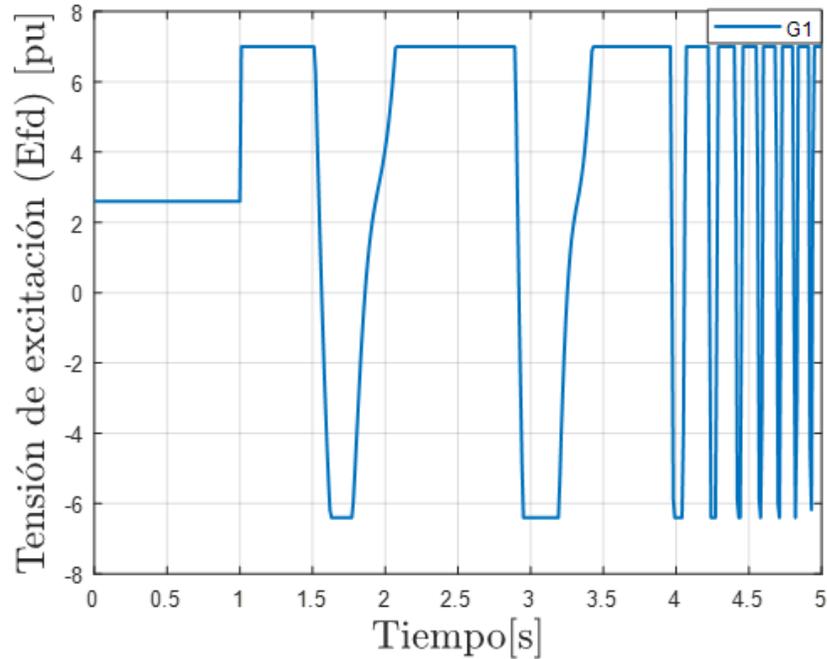


Figura 4.22: Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con AVR



---

**4.1.4 Modelo con Regulador Automático de Tensión (AVR) y Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS)** El modelo con regulador automático de tensión (AVR) y estabilizador del sistema de potencia (PSS) de la máquina se describe a través de las ecuaciones de movimiento y de los circuitos del rotor expuestas en las secciones (3.2) y (3.3) respectivamente, y a través de las ecuaciones del sistema de excitación que se refieren al AVR y PSS expuestas en la sección (2.2) donde la representación general se da a partir de la figura (2.3).

En las *figuras* (4.23) a (4.29) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes variables del sistema.

Figura 4.23: Ángulo del rotor [Grados] - Modelo con AVR y PSS

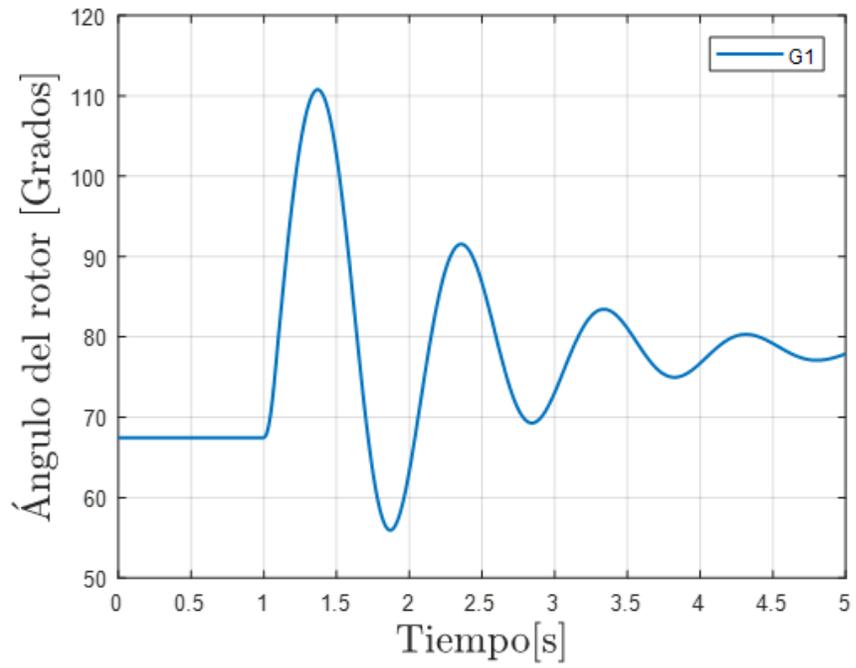


Figura 4.24: Desviación de la velocidad del rotor [pu] - Modelo con AVR y PSS

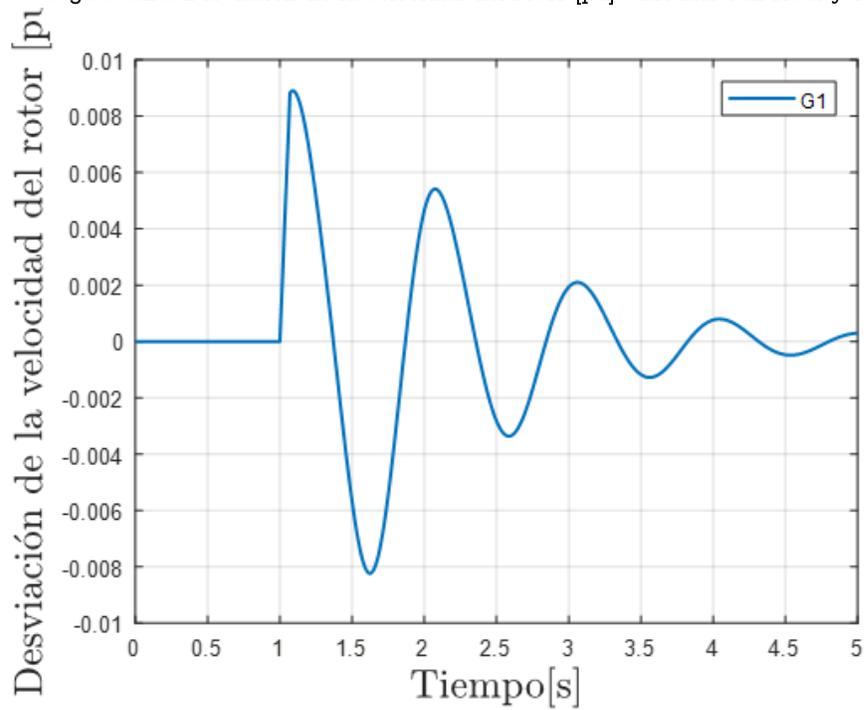


Figura 4.25: Magnitud de tensión en las barras del sistema - Modelo con AVR y PSS

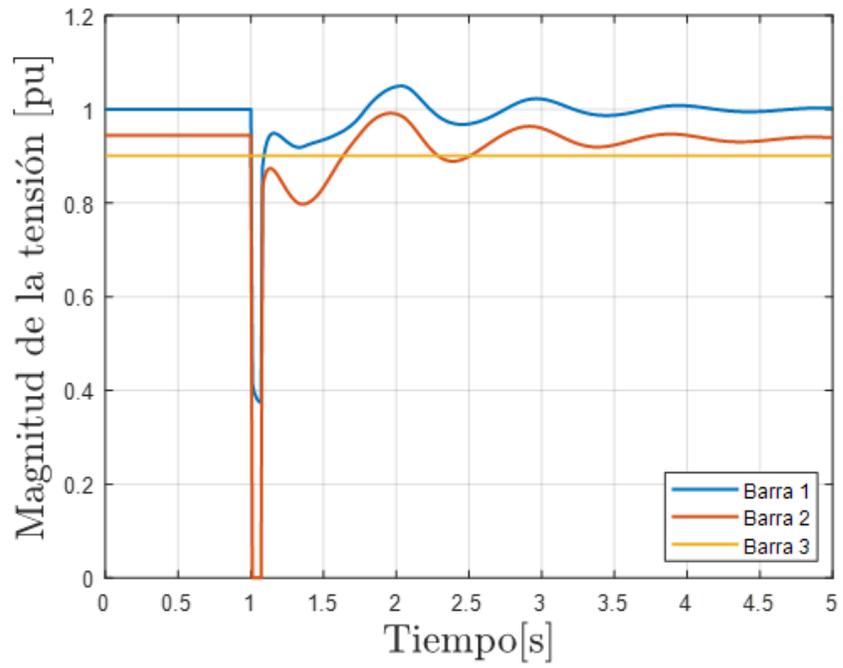


Figura 4.26: Magnitud de tensión en las barras con generadores acoplados - Modelo con AVR y PSS

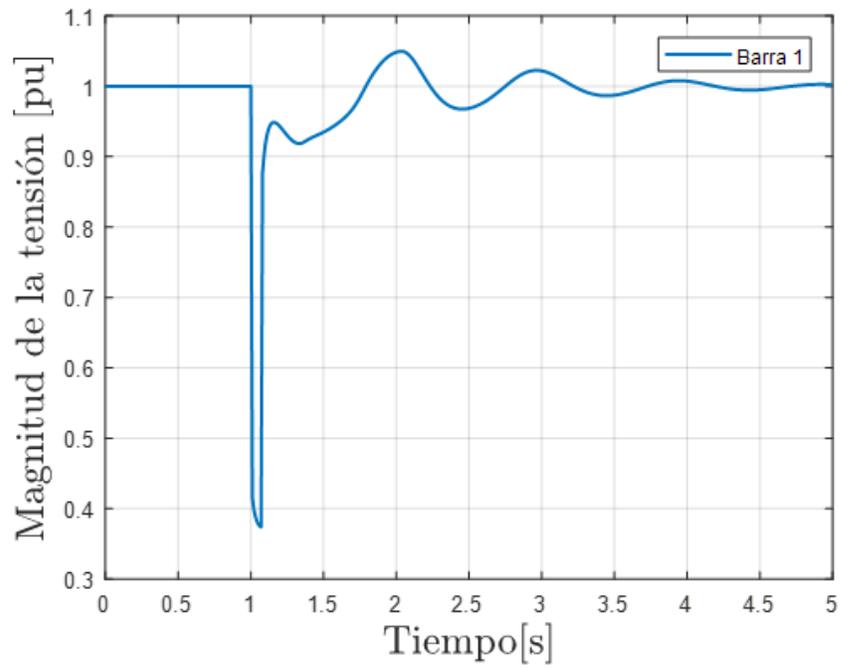


Figura 4.27: Torque en el entrehierro - Modelo con AVR y PSS

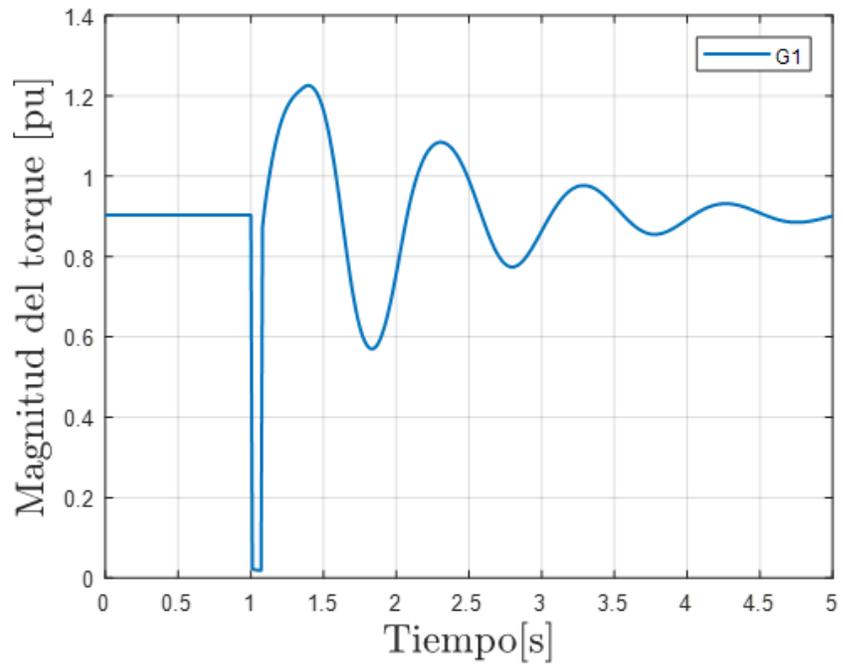


Figura 4.28: Potencia en el entrehierro - Modelo con AVR y PSS

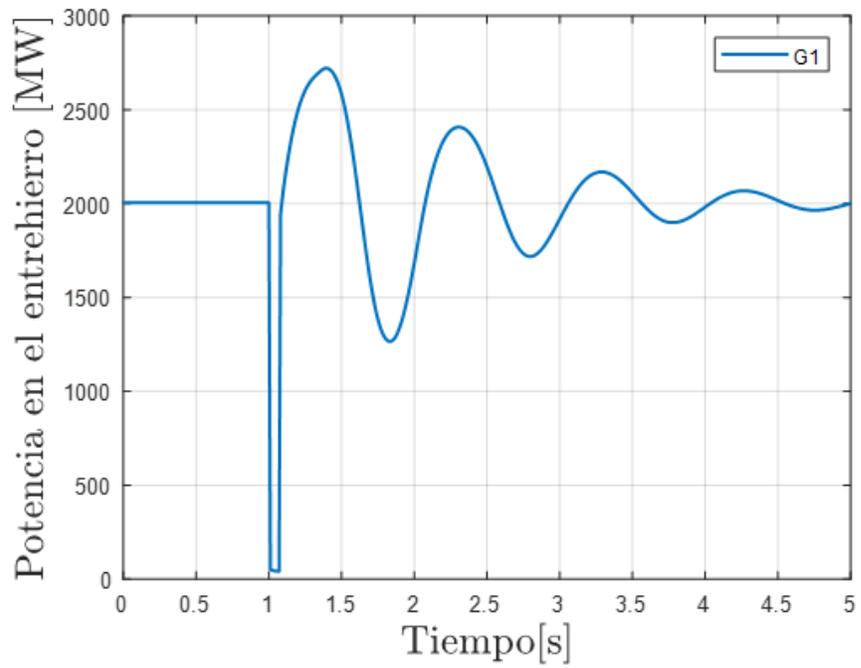
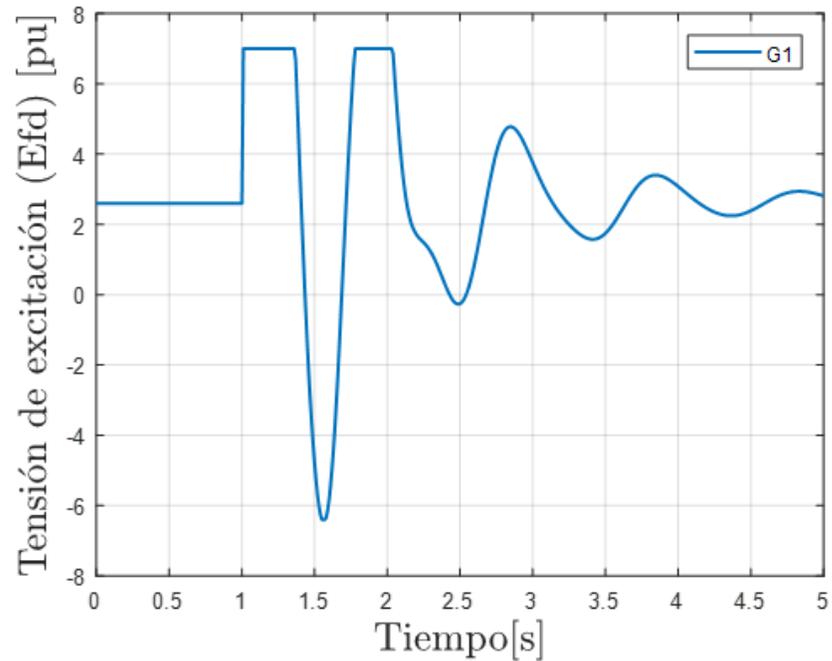


Figura 4.29: Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ) - Modelo con AVR y PSS

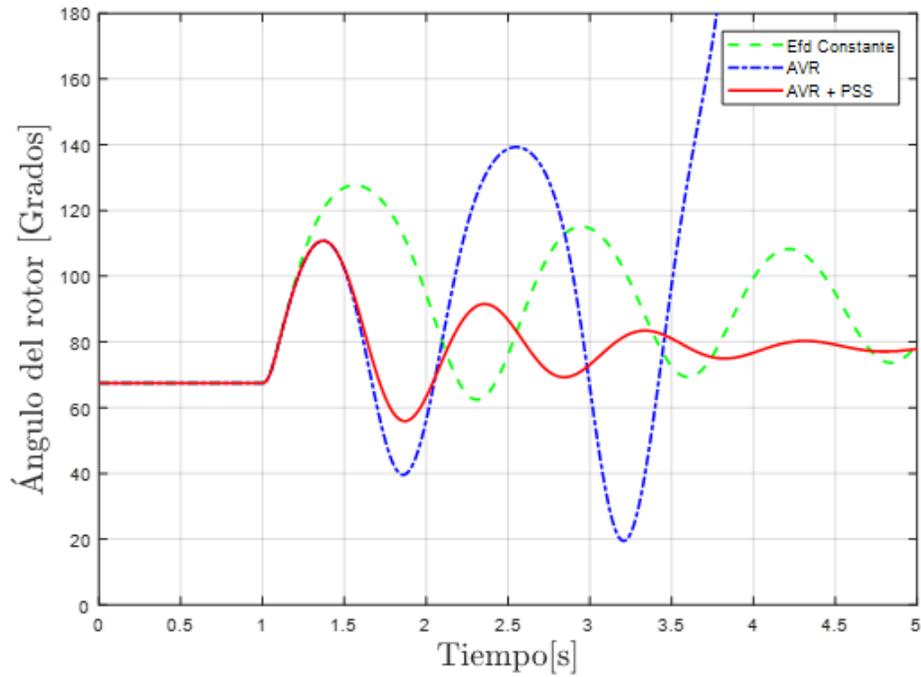


## 4.2 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

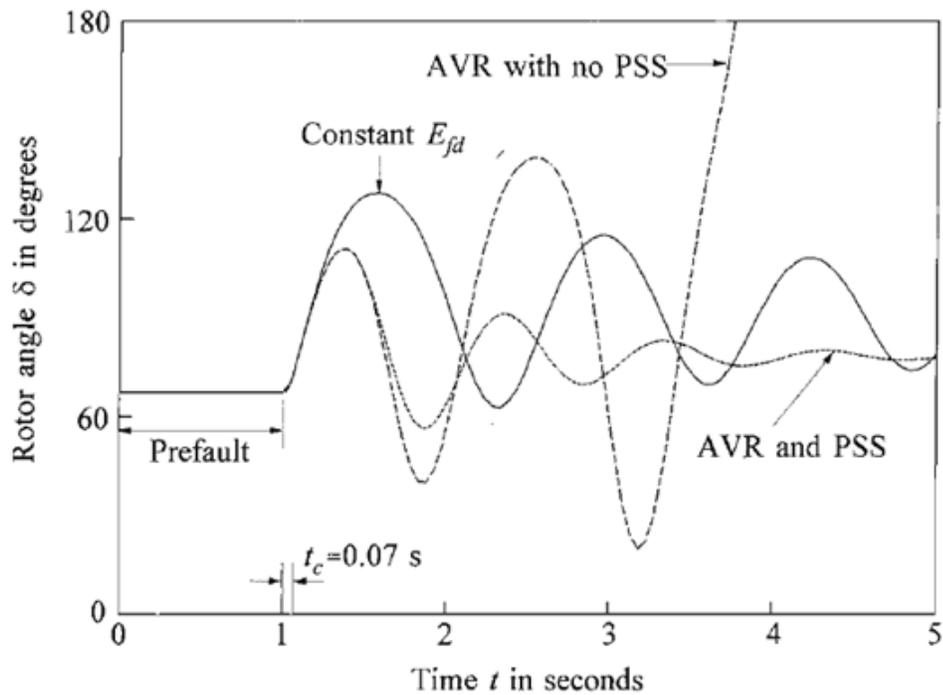
En las figuras (4.30), (4.31), (4.32) y (4.33), se aprecian los resultados obtenidos con el paquete de computador elaborado en MATLAB y los resultados ilustrados en la solución del ejemplo 13.2 del libro de KUNDUR para las siguientes variables:

- Ángulo del rotor
- Potencia en el entrehierro
- Tensión en terminales del generador
- Tensión de excitación ( $E_{fd}$ ).

Figura 4.30: Ángulo del rotor



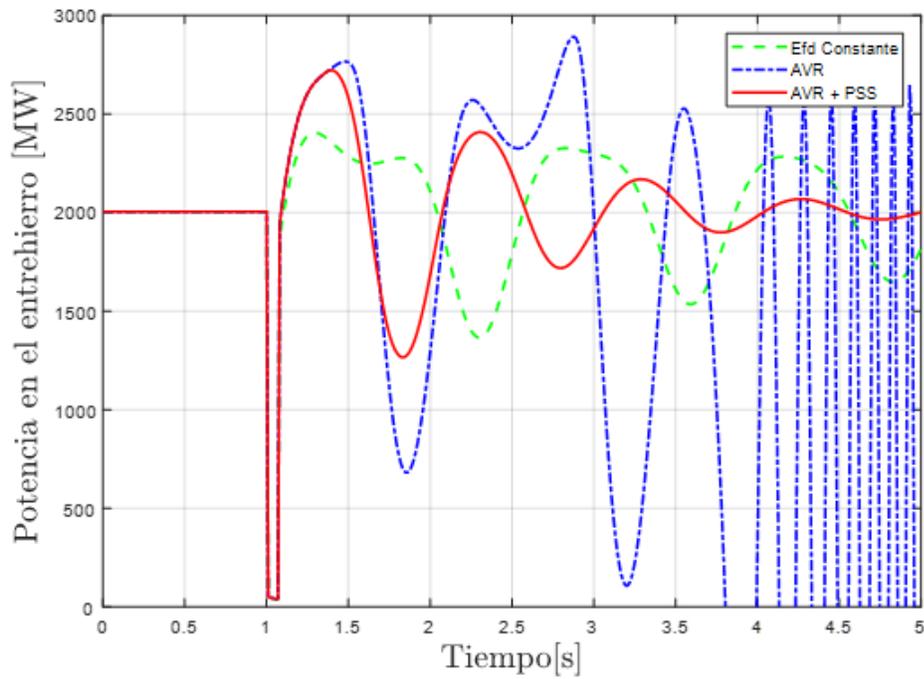
(a) Resultado obtenido



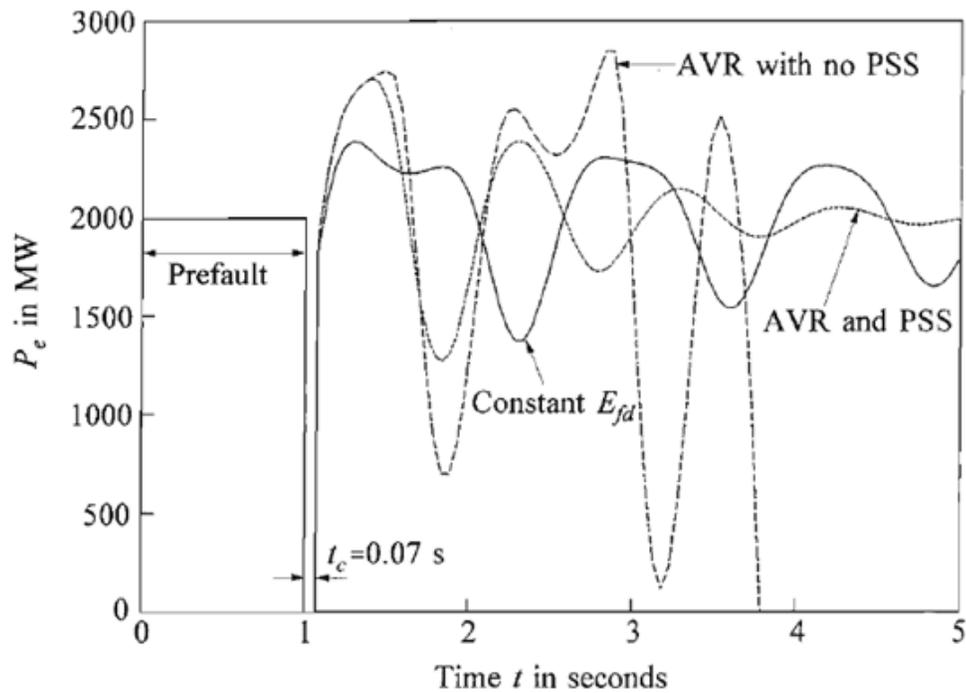
FUENTE: KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

(b) Resultado ilustrado en Kundur

Figura 4.31: Potencia en el entrehierro



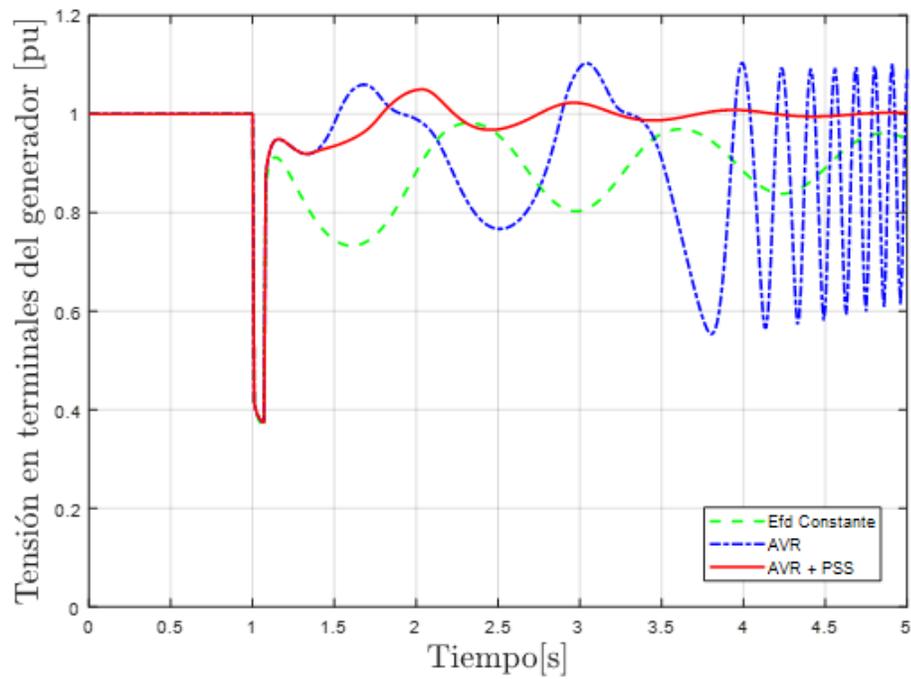
(a) Resultado obtenido



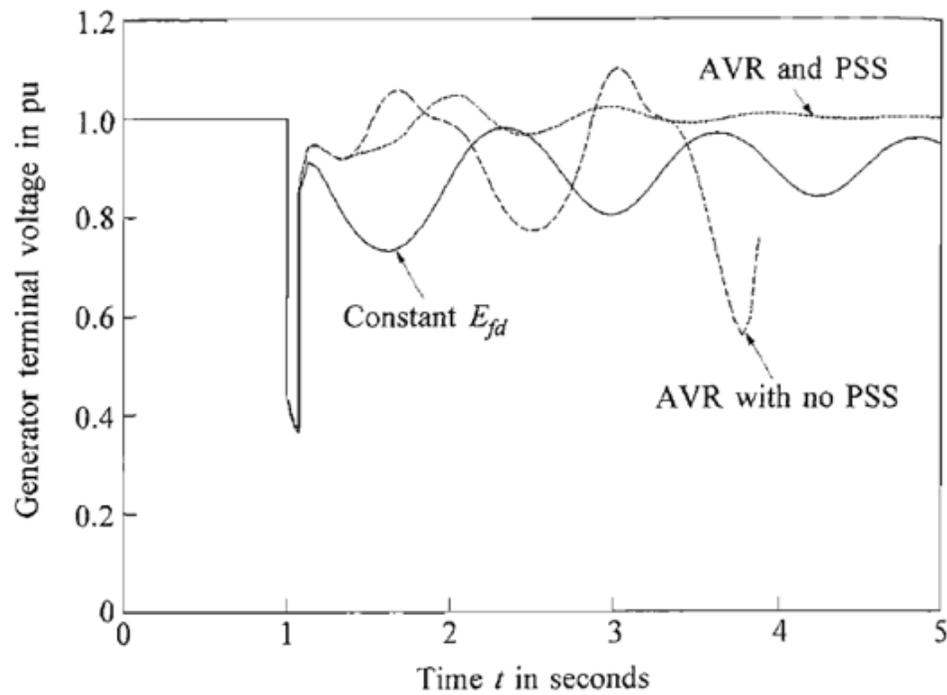
FUENTE: KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

(b) Resultado ilustrado en Kundur

Figura 4.32: Tensión en terminales del generador



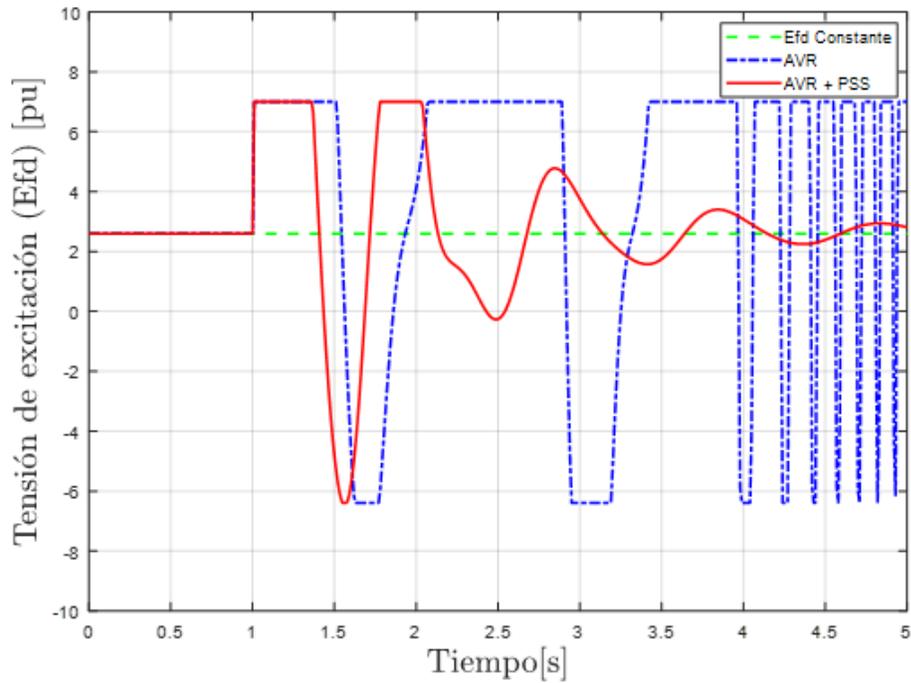
(a) Resultado obtenido



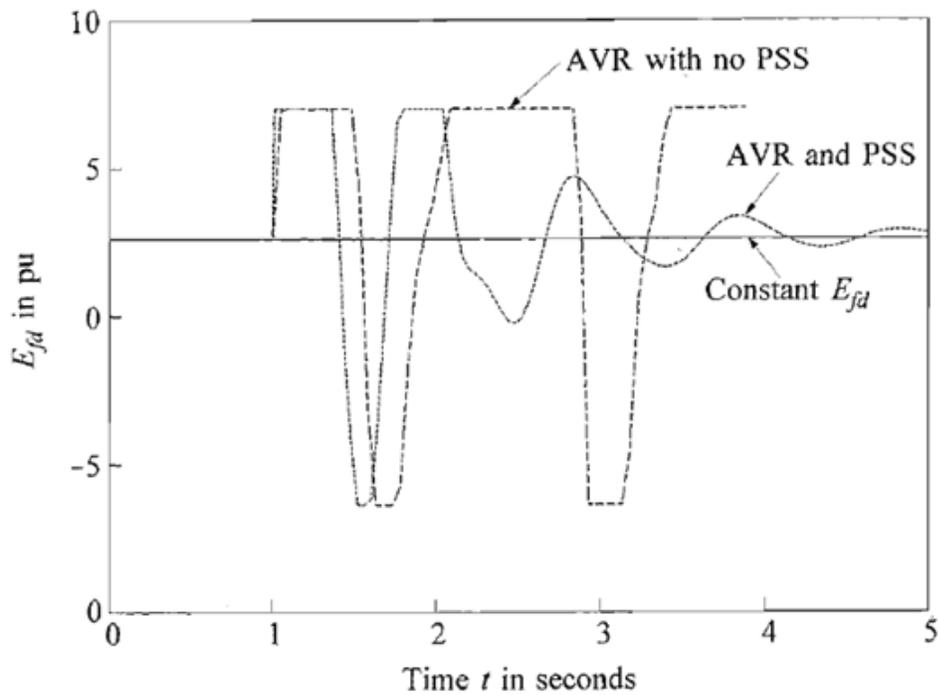
FUENTE: KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958.

(b) Resultado ilustrado en Kundur

Figura 4.33: Tensión de excitación



(a) Resultado obtenido



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

(b) Resultado ilustrado en Kundur

---

# CONCLUSIONES

- Se logró el objetivo general propuesto, ya que se elaboró un paquete de computador en Matlab que permite simular la máquina síncrona ante gran perturbación empleando la solución particionada con integración explícita.
- A diferencia de los estudios de estado estable, los estudios de estabilidad transitoria requieren que las ecuaciones algebraicas de los estatores de las máquinas sean incluidas en el sistema de ecuaciones algebraicas del sistema.
- La programación del algoritmo de solución particionada con integración explícita es mucho más sencilla e intuitiva que la programación del algoritmo de solución simultánea con integración implícita empleada por otros autores.
- Los resultados de las simulaciones del caso del sistema de barra infinita fueron satisfactorios ya que coincidieron con los resultados esperados.

## APORTES Y SUGERENCIAS

Los principales aportes fueron los siguientes:

- La formulación del sistema de ecuaciones algebraicas del sistema de potencia teniendo en cuenta las ecuaciones del estator.
- La elaboración de un paquete de computador en MATLAB que permite realizar el análisis de la estabilidad transitoria de sistemas de potencia multimáquina de  $n$  barras, con la posibilidad de incluir una o más barras infinitas.

Por su parte, entre algunas sugerencias pertinentes para trabajos posteriores cabe mencionar:

- Inclusión de otros modelos dinámicos que complementen la representación de la máquina síncrona.

---

# BIBLIOGRAFÍA

BARRERA CÁRDENAS, René Alexander. *Modelado de la máquina síncrona mediante redes neuronales*. Tesis de Maestría. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2010.

JAIMES, Gerson David. *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.

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

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.

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.

VÁSQUEZ CALDERÓN, Angie Daniela; GUERRERO PARRA, Janire. *Modelado y simulación de una máquina síncrona conectada a una barra infinita empleando procesamiento paralelo y solución particionada*. Trabajo de grado. Ingeniero Electricista, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2016.