

# Evaluación del comportamiento de excitadores para generadores síncronos de alta potencia

I.U. Martínez-Gamboa<sup>1</sup>, F.S. Sellschopp-Sánchez<sup>1,\*</sup>, M. Rivero-Corona<sup>2</sup>, R. Loera-Palomo<sup>2</sup>

**Resumen**—En este artículo se describen los sistemas de excitación empleados en los generadores síncronos, además se presenta una breve descripción del modelo del generador síncrono. Se analizan tres modelos de excitadores los cuales corresponden a cada uno de los sistemas típicos de excitación: sistema de corriente directa (DC1A), sistema de corriente alterna (AC1A) y sistema estático (ST1A). Los resultados en el estudio se presentan con el fin de analizar el comportamiento del generador síncrono conectado a un sistema eléctrico con los diferentes tipos de excitadores. Para esto se aplican perturbaciones al excitador con la finalidad de evaluar su comportamiento y sus índices de respuesta. El modelado se realiza utilizando el software PSCAD.

**Palabras claves**—Sistemas de excitación, generador síncrono.

**Abstract**—This paper describes the excitation systems used in synchronous generators. A brief description of the synchronous generator model is presented. Three models are analyzed which correspond to each of the excitation systems: direct current system (DC1A), alternating current system (AC1A) and static system (ST1A). The results in the study are presented in order to analyze the behavior of the synchronous generator with the different types of excitation systems. Tests are performed to evaluate the behavior and response rates of each excitation systems. The analysis is performed using the PSCAD software.

**Keywords**— Excitation systems, synchronous generator.

## VIII. INTRODUCCIÓN

Los generadores síncronos son una parte fundamental de los sistemas eléctricos de potencia ya que son las principales fuentes de conversión de energía que entregan electricidad a las redes eléctricas. Esta conversión solo es posible si existe una excitación. Los sistemas de excitación se encargan de suministrar corriente directa al devanado de campo para producir la tensión en las terminales del generador síncrono. Además los sistemas de excitación cuentan con funciones de control y protección que son necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de potencia. Las funciones de control del sistema de excitación incluyen el control de la tensión en las

terminales del generador y el control del flujo de potencia reactiva. Las funciones de protección garantizan que los límites de capacidad del generador, del sistema de excitación y de otros equipos no sean excedidos (Kundur, 1994). De acuerdo a la fuente de excitación que utilizan, los sistemas de excitación se clasifican en tres categorías (Kundur, 1994):

- Sistemas de corriente directa (CD)
- Sistemas de corriente alterna (CA)
- Sistemas Estáticos

Los sistemas de CD utilizan generadores de corriente directa para suministrar la potencia al excitador. En estos sistemas la corriente directa es alimentada al rotor del generador síncrono a través de anillos colectores. El excitador puede estar en el mismo eje del generador o ser impulsado por un motor externo.

Los sistemas de CA utilizan alternadores para la excitación del generador. El excitador es comúnmente situado en el mismo eje del rotor. Estos sistemas emplean dos tipos de rectificadores, estacionarios y giratorios. Los sistemas con rectificadores estacionarios utilizan anillos colectores para suministra la corriente directa al rotor. Por otro lado, en los sistemas con rectificadores giratorios no es necesario el uso de anillos colectores ni escobillas ya que la corriente de cd es alimentada directamente al rotor, porque el rectificador gira junto con el devanado de campo del generador. Estos últimos sistemas son conocidos como *brushless systems* (sistemas sin escobillas).

En los sistemas estáticos todos los elementos son estacionarios, emplean rectificadores y transformadores para suministrar la potencia de excitación, la cual obtienen de las mismas terminales del generador. La corriente directa es suministrada al devanado de campo del generador por medio de anillos colectores.

Las características, modelos y definiciones de los sistemas de excitación así como el rendimiento dinámico y los requerimientos de los sistemas son ampliamente descritos en (IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines, IEEE Std 421.1™-2007, 15 July 2007), (IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5™-2005, 21 April 2006), (IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, IEEE Std 421.2 -2014, 27 March 2014).

En este trabajo se evalúa el funcionamiento de tres

<sup>1</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna S/N 27000, Torreón, Coahuila, México

<sup>2</sup> CONACYT – TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación

\* [sellschopp@hotmail.com](mailto:sellschopp@hotmail.com)

modelos de excitadores que pueden ser empleados en los generadores síncronos. Estos modelos representan a cada tipo de sistema de excitación: corriente directa (DC1A), corriente alterna (AC1A) y estático (ST1A).

IX. MODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO

El generador síncrono consiste de dos partes esenciales: el campo y la armadura. El devanado de campo conduce la corriente directa y produce un campo magnético, el cual induce una serie de voltajes en los devanados de armadura (Kundur, 1994), (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002). La Figura 1 muestra el esquema de la sección transversal de un generador síncrono trifásico con un par de polos.

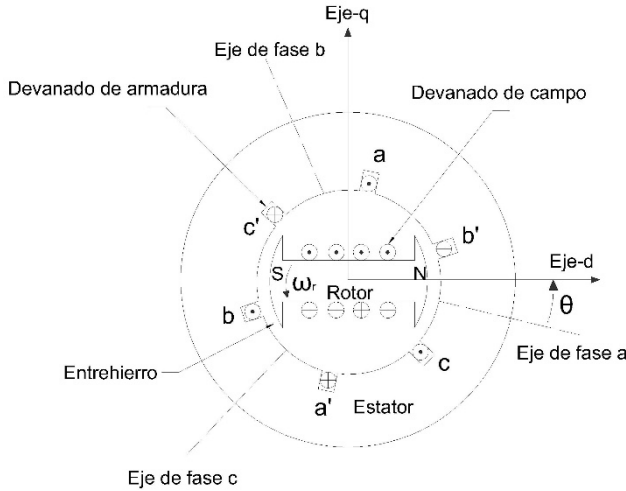
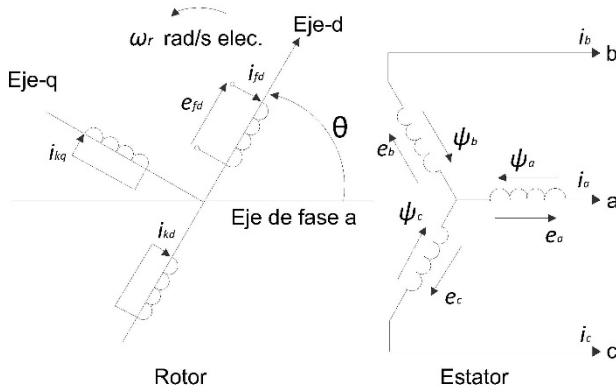


Figura 1. Diagrama esquemático de un generador síncrono trifásico

El rotor del generador cuenta con dos ejes principales: eje directo (d) el cual está en el centro magnético del polo norte y el eje en cuadratura (q) que está 90° eléctricos delante del eje-d.

La Figura 2 muestra los circuitos que se involucran en el análisis del generador síncrono.



- a, b, c : devanados de fase del estator
- fd : devanado de campo
- kd : circuito amortiguador del eje d
- kq : circuito amortiguador del eje q
- k : 1,2,...,n; n= no. de circuitos amortiguadores
- theta : ángulo por el cual el eje d lleva el eje magnético de la fase a, rad eléctricos
- omega\_r : velocidad angular rad/s eléctricos

Figura 2. Circuitos del rotor y estator del generador síncrono

En (1), (2) y (3) se describen las ecuaciones de voltaje asociadas al circuito del estator.

$$e_a = \frac{d\psi}{dt} - R_a i_a = p\psi - R_a i_a \tag{1}$$

$$e_b = p\psi - R_a i_b \tag{2}$$

$$e_c = p\psi - R_a i_c \tag{3}$$

De igual manera, las ecuaciones de voltaje asociadas al circuito del rotor se describen en (4), (5) y (6).

$$e_{fd} = p\psi_{fd} - R_{fd} i_{fd} \tag{4}$$

$$0 = p\psi_{kd} - R_{kd} i_{kd} \tag{5}$$

$$0 = p\psi_{kq} - R_{kq} i_{kq} \tag{6}$$

X. MODELOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Para determinar la operación del generador y el sistema de excitación, se desarrollan modelos matemáticos que permiten estimar los requerimientos técnicos, establecer los circuitos de control y protección útiles para el estudio de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia.

A continuación se presentan los modelos de sistemas de excitación empleados en este trabajo.

A. Modelo tipo DC1A

Este modelo, mostrado en la Figura 3, es usado para representar los sistemas de excitación de corriente directa conmutables, en el cual el campo es controlado con reguladores de tensión de acción continua, especialmente los amplificadores rotativos, amplificadores magnéticos o amplidinas (IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5™-2005, 21 April 2006).

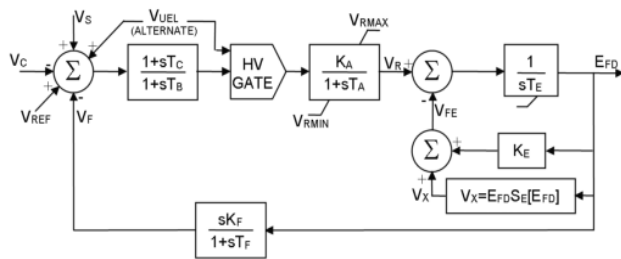


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de excitación tipo DC1A

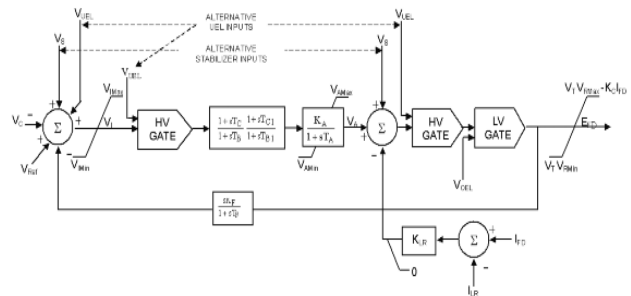


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de excitación tipo ST1A

**B. Modelo tipo AC1A**

Este modelo, mostrado en la Figura 4, representa el sistema alternador-rectificador de campo controlado. Este sistema consiste de un alternador como excitador que emplea rectificadores no controlados. El regulador de tensión obtiene la potencia de una fuente que no es afectada por transitorios (IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5™-2005, 21 April 2006).

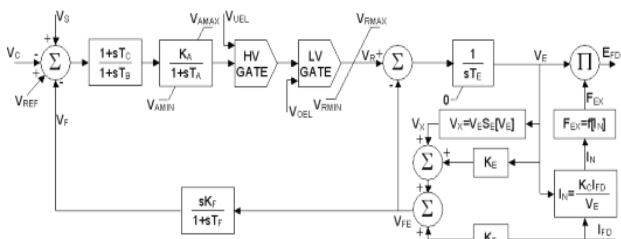


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de excitación tipo AC1A

**C. Modelo tipo ST1A**

El modelo mostrado en la Figura 5 es conocido como sistema excitador-rectificador controlado con fuente de potencial. Este modelo representa los sistemas que suministran la energía de excitación a través de un transformador que se alimenta de las terminales del generador o un bus auxiliar, y es regulado por un rectificador controlado. La máxima tensión que puede suministrar este tipo de sistemas está directamente relacionada con la tensión en las terminales del generador.

**XI. CASOS DE ESTUDIO**

Para evaluar el comportamiento de los sistemas de excitación, se elaboró un modelo compuesto de un generador síncrono conectado a un bus infinito a través de un alimentador, al cual están conectadas unas cargas.

El generador tiene una potencia aparente de 120 MVA y una tensión de salida de 13.8 kV. Las cargas tienen un valor del 25 y 75% de la capacidad del generador. El modelo y la simulación fueron desarrollados en el simulador computacional PSCAD.

**A. Determinación de los índices de respuesta de los sistemas de excitación**

Para determinar los índices de respuesta de los sistemas de excitación, se lleva a cabo la prueba de variación en la tensión de referencia. Esta prueba consiste en hacer una simulación del sistema en estado estable, una vez estabilizado el sistema, se cambia el valor en la tensión de referencia a un valor que represente un cierto porcentaje por encima del valor nominal. Para este estudio el cambio en la referencia se realizó para un valor típico reportado en la literatura científica de +5% con respecto al valor inicial.

Los índices de respuesta a determinar son: el sobrepaso (Sp), el tiempo de respuesta (Tr) y el tiempo de estabilización (Ts).

La Tabla I muestra los rangos aceptados por la norma IEEE Std. 421.2 para los índices de respuesta transitoria.

TABLA I. RANGOS ESTABLECIDOS POR LA IEEE PARA LOS ÍNDICES DE RESPUESTA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Índice de respuesta	Rangos aceptables
Sobrepaso (Sp)	0 a 40%
Tiempo de respuesta (Tr)	0.025 a 2.5 s
Tiempo de estabilización (Ts)	0.2 a 10 s

Los modelos de los sistemas de excitación fueron simulados con los parámetros estándar incluidos en (IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5™-2005, 21 April 2006).

Las Figuras 6 a 8 muestran el comportamiento y los índices de respuesta para los sistemas de excitación tipo DC1A, AC1A y ST1A respectivamente.

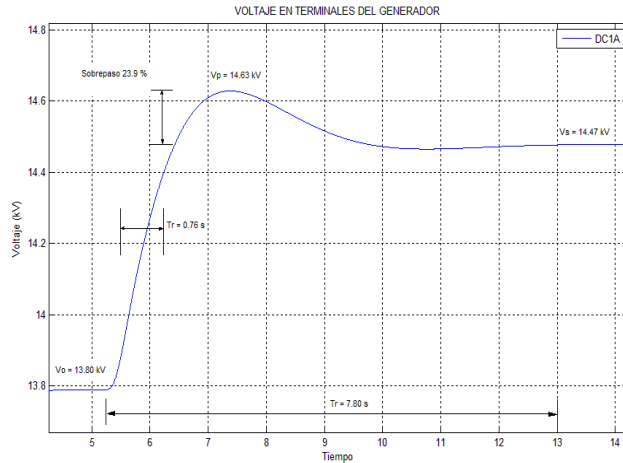


Figura 6. Tensión en terminales del generador en estado estable y respuesta al aumento de 5% en el voltaje de referencia para el sistema de excitación tipo DC1A

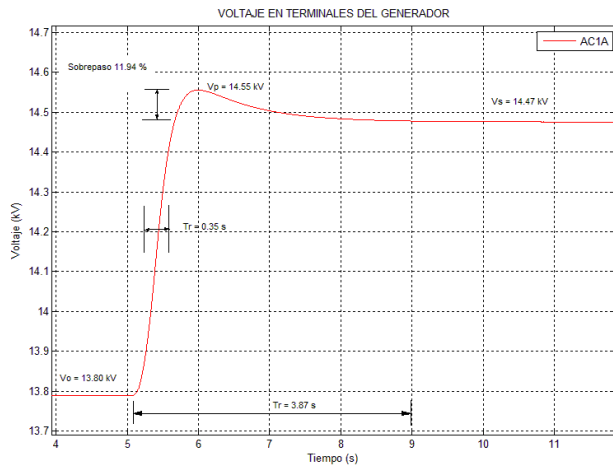


Figura 7. Tensión en terminales del generador en estado estable y respuesta al aumento de 5% en el voltaje de referencia para el sistema de excitación tipo AC1A

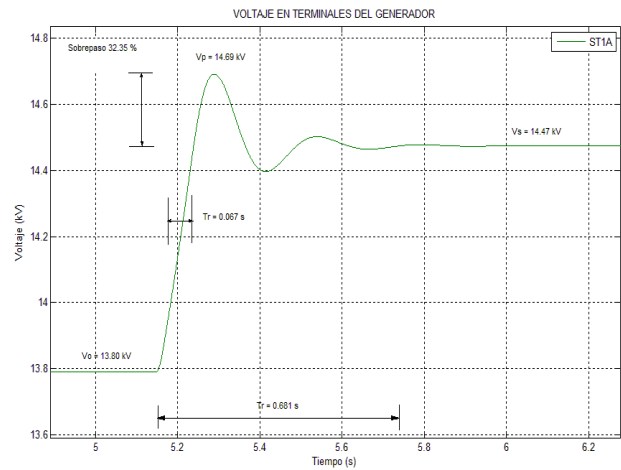


Figura 8. Tensión en terminales del generador en estado estable y respuesta al aumento de 5% en el voltaje de referencia para el sistema de excitación tipo ST1A

*B. Prueba de variación de carga en el sistema*

Esta prueba consiste en variar la carga conectada a un sistema eléctrico de potencia en donde se encuentra conectado el generador síncrono de tal manera que se pueda observar el comportamiento de las diferentes variables del sistema ante la acción del excitador conectado al generador síncrono. En este caso la prueba consistió en un incremento de carga equivalente al 25 % de la capacidad del generador.

Las Figuras 9 a 12 muestran el comportamiento de algunas variables del sistema ante un incremento de carga.

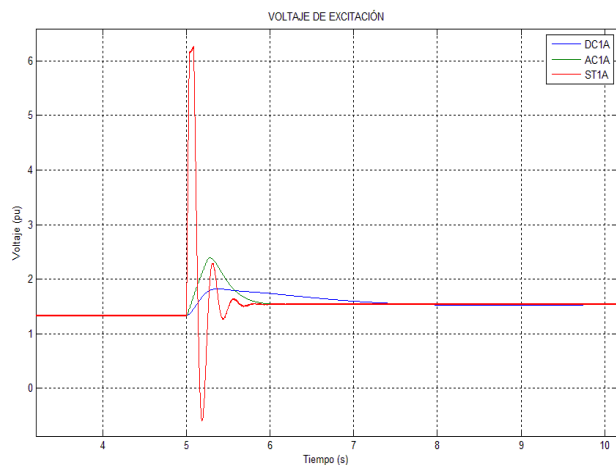


Figura 9. Tensión de excitación ante un incremento de carga para cada uno de los sistemas de excitación: DC1A, AC1A y ST1A

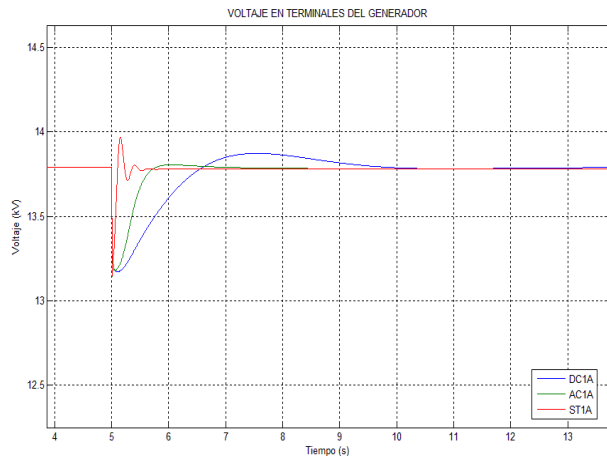


Figura 10. Tensión en terminales del generador ante un incremento de carga para cada uno de los sistemas de excitación: DC1A, AC1A y ST1A

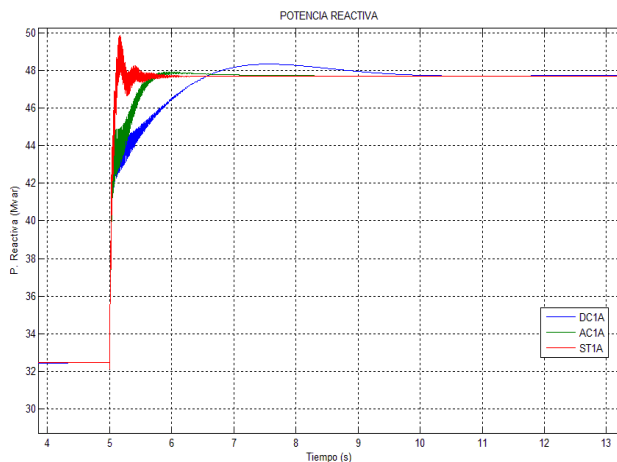


Figura 11. Potencia Reactiva ante un incremento de carga para cada uno de los sistemas de excitación: DC1A, AC1A y ST1A

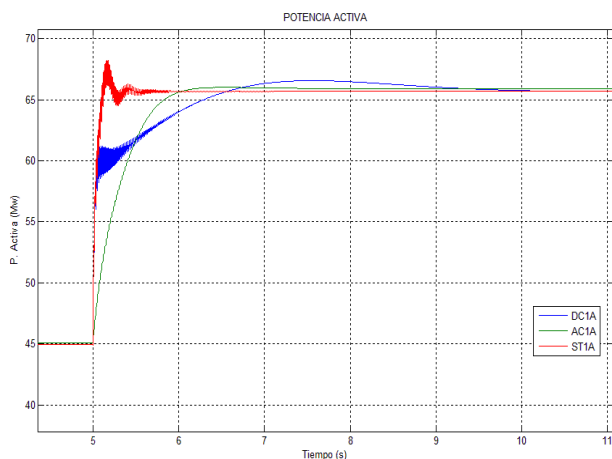


Figura 12. Potencia Activa ante un incremento de carga para cada uno de los sistemas de excitación: DC1A, AC1A y ST1A

Cuando existe un incremento de carga se produce una caída de tensión, por lo tanto el sistema de excitación actúa incrementando la corriente de excitación para mantener la tensión nominal en las terminales del generador.

## XII. RESULTADOS

Una vez realizadas las simulaciones de los casos, se verificó que los índices de respuesta de los tres sistemas de excitación cumplieran con los rangos aceptables establecidos por la IEEE al aplicar el cambio en la tensión de referencia, además de que se verifica el comportamiento de diferentes variables ante el cambio de carga en el generador.

En la Tabla II se muestran los resultados obtenidos de los índices de respuesta de cada uno de los sistemas de excitación, además se menciona si los sistemas cumplen con los rangos aceptados por la IEEE.

TABLA II. ÍNDICES DE RESPUESTA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Sistema de excitación	Índice de respuesta			Cumple con la norma
	Sobrepaso [%]	Tr [s]	Ts [s]	
DC1A	23.90	0.76	7.80	Sí
AC1A	11.94	0.35	3.87	Sí
ST1A	32.55	0.06	0.68	Sí

Como se observó en la prueba para determinar los índices de respuesta, el sistema de excitación estático (ST1A) tiene los tiempos de respuesta y estabilización más rápidos, aunque presenta el mayor pico y el mayor porcentaje de sobrepaso, seguido en rapidez por el sistema de corriente alterna (AC1A) y por último el de corriente directa (DC1A).

Referente a la prueba de variación de incremento de carga se produce una caída de tensión en terminales del generador, por lo tanto el sistema de excitación actúa incrementando la corriente de excitación para mantener la tensión nominal en las terminales del generador. Como se verificó en el caso del incremento del 5% de la tensión de referencia, para el caso de la variación de carga los resultados fueron similares en cuanto a los tiempos de respuesta y estabilización. Considerando los tres sistemas de excitación, el excitador estático (ST1A) es el que tiene el tiempo de respuesta y estabilización más rápido, seguidos por el AC1A y posteriormente el DC1A.

## XIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas de excitación son una de las partes más importantes en los generadores síncronos debido a que estos suministran la potencia necesaria para generar la tensión en las terminales del generador, además de ayudar a mantener la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia. En este trabajo se describió el comportamiento de los sistemas de excitación más comunes para

generadores síncronos y se realizó la evaluación de cada uno de ellos con ayuda software PSCAD. El objetivo principal fue estudiar los diferentes tipos de sistemas de excitación, modelar, simular y evaluar el funcionamiento de cada uno de ellos bajo distintas condiciones de operación. Además de determinar los índices de respuesta de los tres tipos de sistemas analizados: DC1A, AC1A y ST1A.

Actualmente los sistemas de excitación más utilizados son los sistemas de corriente alterna y los estáticos debido a su rápida respuesta. Los sistemas de excitación de corriente alterna sin escobillas se emplean en generadores de gran capacidad debido a que no es necesario el uso de anillos colectores ni escobillas para suministrar la corriente directa. En los sistemas de excitación estáticos los tiempos de respuesta son muy rápidos, la corriente y tensión de excitación son mucho más altos que en los sistemas de CD y CA, aunque su principal desventaja es que la fuente de potencia es el generador principal y requieren fuentes adicionales para energizar al generador.

Los resultados fueron satisfactorios, aunque solo se analizaron tres de los doce modelos de sistemas desarrollados por la IEEE. Por lo que se deberá realizar una mayor investigación para comparar y determinar el sistema de excitación más adecuado para los distintos tipos de generadores síncronos utilizados en las plantas de generación de energía eléctrica.

#### XIV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM por las facilidades para el desarrollo de este proyecto. Los investigadores CONACyT agradecen al programa de Cátedras CONACyT.

#### XV. REFERENCIAS

*IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, IEEE Std 421.2 -2014.* (27 March 2014).

*IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specification, IEEE Std 421.4™-2014.* (27 March 2014).

*IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5™-2005.* (21 April 2006).

*IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines, IEEE Std 421.1™-2007.* (15 July 2007).

Jerkovic, V., Miklosevic, K., & Spoljaric, Z. *"Excitation System Models of Synchronous Generator"*. Croatia: Faculty of Electrical Engineering Osijek.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (2da ed.). John Wiley & Sons, IEEE Press.

Kundur, P. (1994). *"Power System Stability and Control"*. McGraw Hill.

#### XVI. BIOGRAFÍA



**Martínez Gamboa Irving Uriel.** Estudiante de la carrera de ingeniería eléctrica con especialidad en potencia y uso eficiente de la energía del Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México. Él actualmente cursa el 9no semestre de la licenciatura, realizando la residencia profesional en el área de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de La Laguna. Las áreas de interés son: sistemas eléctricos de potencia, máquinas y redes eléctricas, energías renovables, protecciones de sistemas eléctricos.



**Francisco Sergio Sellschopp Sánchez.** Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de La Laguna en 2003 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado de Ingeniería Eléctrica del TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas, calidad de la energía e incorporación de fuentes renovables a redes eléctricas.



**Michel Rivero Corona.** Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador adscrito al CONACYT - Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Laguna. Las líneas de interés del Dr. Rivero es la dinámica de fluidos, implementación de modelos para la estimación y predicción del potencial eólico y solar, flujos magnetohidrodinámicos, Procesamiento Electromagnético de Materiales.



**Rodrigo Loera Palomo.** Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en 2007 en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en 2013 en la misma institución. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Sus áreas de investigación corresponden a los sistemas electrónicos de potencia, reguladores conmutados de alta frecuencia y teoría de control aplicada a sistemas electrónicos de potencia.