

# Análisis Electromagnético de un Generador Síncrono de Imanes Permanentes usando Elementos Finitos en 3D

J. González-Domínguez<sup>1</sup>, M. A. Arjona<sup>1</sup>, C. Hernández<sup>1</sup>

**Resumen**— En este artículo se presenta el análisis electromagnético de un generador síncrono de imanes permanentes. Se propone un caso en el cual se simula el generador operando a velocidad constante en condiciones normales y después de cierto tiempo ocurre una disminución en el flujo remanente de los imanes en el rotor, afectando los valores de tensión y de corriente en los terminales del estator y la densidad de flujo magnético en la máquina. Se presentan los resultados obtenidos a través del software de elementos finitos Flux 3D.

**Temas claves**—Elementos Finitos, Flujo Remanente, Generador Síncrono de Imanes Permanentes.

**Abstract**— This paper presents the electromagnetic analysis of a permanent magnet synchronous generator. A study case is proposed in which the operation of the generator at constant speed under normal conditions is simulated and after a while a decrease in the residual flux of the magnets on the rotor is presented, affecting the values of voltage and current in the stator terminals and the magnetic flux density on the machine. The results obtained through finite element software Flux 3D are presented.

**Keywords**— Finite Elements, Residual Flux, Permanent Magnet Synchronous Generator.

## I. INTRODUCCIÓN

Como fuente de energía renovable, la energía eólica es hoy en día una de las alternativas más viables para la generación de energía eléctrica sin contaminar el ambiente.

Existen diferentes tipos de generadores eléctricos empleados para la conversión de la energía eólica en electricidad, los más comunes son los de inducción tipo jaula de ardilla, los generadores de inducción doblemente alimentados y los generadores síncronos de imanes permanentes. En sistemas de generación eólica de baja y media potencia los más utilizados son los generadores síncronos de imanes permanentes.

Con el desarrollo de materiales de alto rendimiento compuestos por imanes permanentes, los generadores síncronos de imanes permanentes son un tema de interés en la investigación debido al gran número de ventajas que ofrecen: alta eficiencia, ausencia de escobillas y de anillos rozantes, devanados de excitación, fuentes de CD, que presentan pérdidas por calentamiento, cobre, entre otras.

Este artículo presenta un análisis en el comportamiento de los imanes permanentes en el rotor del generador síncrono. Se somete a una disminución del flujo remanente a los imanes. En condiciones reales esto se puede deber a las altas temperaturas bajo las que pueden operar las máquinas debido a fallas provocadas por las altas corrientes que circulan por los devanados del estator cuando éstos están conectados a la red eléctrica. Se muestran los resultados obtenidos y cómo es que repercute en los voltajes y corrientes en los conductores del estator, así como la distribución de la densidad de los campos magnéticos en la máquina, antes y durante la disminución del flujo remanente.

Actualmente existen métodos numéricos computacionales usados en el análisis de dispositivos electromagnéticos como los generadores eléctricos, uno de ellos es el método de elementos finitos; su aplicación en el estudio de este tipo de máquinas puede evitar la construcción de prototipos de prueba, obteniendo con esto una gran reducción en cuanto a costos de material y fabricación se refiere. Algunas de las ventajas que presenta el método de elementos finitos son: flexibilidad para modelar geometrías y fronteras irregulares, manejo de materiales no lineales y generación de una solución altamente confiable [1]-[2].

El generador bajo prueba será modelado y simulado en el software de elementos finitos Flux 3D [3]; el análisis en 3D permite obtener resultados más precisos, así como una mejor visualización de los campos magnéticos producidos por los imanes permanentes en el rotor y en los conductores del estator en el generador.

<sup>1</sup> Jesús González Domínguez (jesus\_cowboyhall@hotmail.com), Marco Arjona, Concepción Hernández Flores. Instituto Tecnológico de la Laguna, Blvd. Revolución y Cza, Cuauhtémoc S/N, Col. Centro, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

## II. FORMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

### A. Análisis de Elementos finitos

Actualmente el método de Elemento Finito es el más confiable para la solución de problemas electromagnéticos. El desarrollo matemático del método de elemento finito puede estar basado en el método variacional o en métodos residuales como el de Galerkin. Los métodos variacionales se desarrollan con el uso de una expresión llamada funcional relacionada con la energía del problema. La minimización del funcional conduce a la solución de la ecuación diferencial que describe el fenómeno electromagnético que gobierna el problema. El método de Galerkin se basa en la integración de la ecuación diferencial parcial, la cual a su vez es multiplicada por una función ponderada sobre el dominio de interés, esto da origen a la solución del problema.

### B. Procedimiento de análisis

El desarrollo del método de elemento finito se puede dividir en cuatro etapas principales: La discretización del problema en un número determinado de elementos generalmente triangulares. La derivación de las ecuaciones que gobiernan el elemento. El ensamblado de los elementos dentro de la región de interés. La solución del sistema de ecuaciones resultantes.

### C. Modelo de elemento finito del generador síncrono de imanes permanentes

Las ecuaciones diferenciales derivadas de las ecuaciones de Maxwell [4] que describen la inducción de la estructura del rotor en las diferentes regiones del generador mostradas en la Figura 1, son las siguientes: Para las regiones del estator y el centro del rotor compuesto por materiales de una alta permeabilidad relativa (región 1 en la Figura 1), la ecuación que gobierna es descrita en (1).

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{H} = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \mathbf{e}_z, \mathbf{A} = A_z \mathbf{e}_z \quad (1)$$

En las regiones donde se encuentran los imanes permanentes y el espacio de separación que existe entre ellos (regiones 2 y 3 en la Figura 1), la ecuación que gobierna es (2).

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0 \mu_r} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right] = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{A} = A_z \mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (2)$$

En las regiones donde se encuentran los conductores y el entrehierro del estator (región 4 en la figura), la ecuación es (3).

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0 \mu_r} (\nabla \times \mathbf{A}) \right] = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{A} = A_z \mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{A}$  es el potencial magnético,  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío,  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa,  $\mathbf{B}_r$  es la densidad de flujo remanente, y  $J_z^e$  es la densidad de corriente,  $\mathbf{H}$  el campo magnético,  $L$  la longitud del rotor, y  $\sigma$  la conductividad eléctrica.

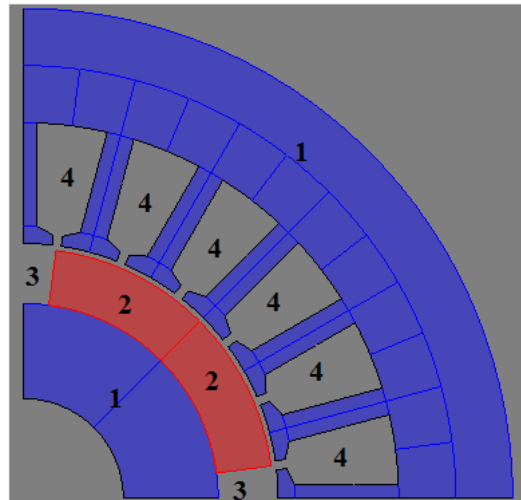


Figura 1. Regiones del generador síncrono de imanes permanentes.

#### D. Ventajas del modelado de elementos finitos en 3D

Debido al rápido avance en métodos computacionales, como el método de los elementos finitos, un gran número de herramientas de software ofrecen un análisis cada vez más detallado de dispositivos electromagnéticos. En este artículo se utiliza la herramienta de Flux 3D. En un análisis de este tipo las limitaciones que presentan métodos en 2D pueden ser las siguientes: la solución del campo magnético depende de la relación del entrehierro con la distancia entre los polos magnéticos que varía con el radio del plano de corte cilíndrico elegido para un análisis en 2D.

El flujo en la franja de las regiones circunferenciales interior y exterior no puede tomarse en cuenta; en la práctica existe una reducción de densidad de flujo en el entre hierro de estas regiones.

Un análisis en 2D puede determinar el flujo mutuo y los enlaces de flujo a lo largo de la longitud radial de los conductores, pero no puede hacer esto para las regiones donde se encuentran los terminales de estos conductores que forman parte de los devanados de las máquinas.

El análisis en 2D no se puede aplicar cuando hay cambios en las propiedades de los materiales en diferentes secciones transversales.

Es por ello que en el trabajo presentado en este artículo se ha optado por realizar un análisis en 3D del generador síncrono de imanes permanentes [5]-[6].

### III. SIMULACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO EN 3D DEL GENERADOR

La geometría completa del modelo del generador síncrono de imanes permanentes en 3D es mostrada en la Figura 2. El generador está compuesto por 4 polos magnéticos de imanes permanentes y se le acopla un circuito equivalente que representa los conductores en los devanados del estator, conectados en estrella. Estos conductores están enrollados en el entrehierro del estator y están representados por bobinas color azul. En la Figura 3 se muestra el circuito equivalente de estos devanados, conectados a una pequeña carga para graficar las corrientes circulantes.

En la Figura 4 se observa la vista lateral del generador síncrono de imanes permanentes con los conductores.

Se simula una disminución del flujo remanente en los imanes permanentes a partir de los 0.3 s; el generador se encuentra girando a velocidad constante de 500 rpm. Se aprecia una disminución de los voltajes y corrientes en los conductores del estator y una disminución de la densidad de campo magnético en la máquina.

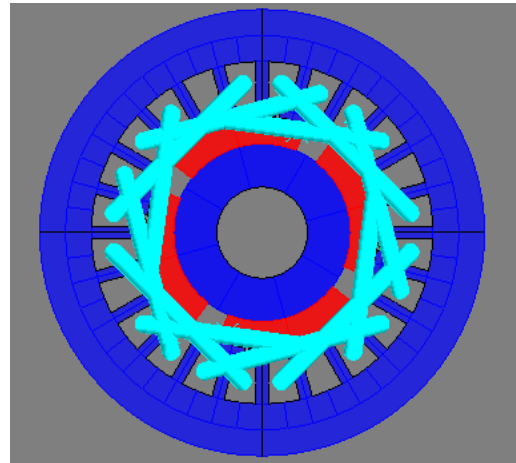


Figura 2. Geometría completa del generador síncrono de imanes permanentes.

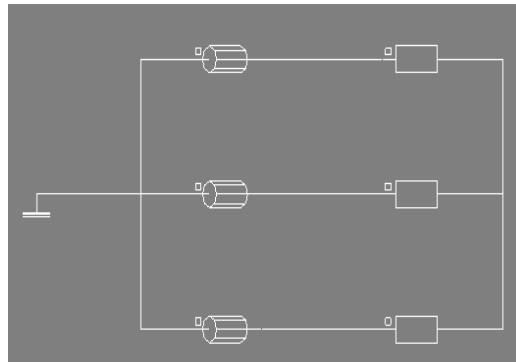


Figura 3. Circuito equivalente de los conductores en el estator.

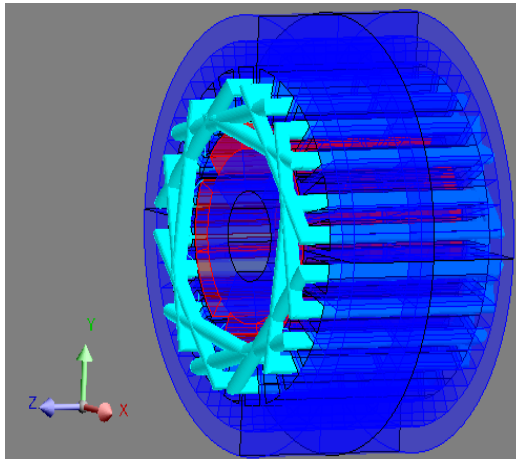


Figura 4. Vista lateral de la geometría del generador síncrono de imanes permanentes con los conductores en el estator.

La discretización del modelo en elementos se aprecia en la Figura 5. En esta figura aparece el mallado de una cuarta parte de la máquina aprovechando la condición de periodicidad que ofrece la geometría del generador al poseer una simetría; esto reduce considerablemente el tiempo de cómputo, ya que sólo es analizada esa parte de la geometría total y el resultado al ser simétrico es el mismo para las otras partes de la máquina. El mallado consta de 16119 nodos, 3532 elementos lineales, 18282 elementos de superficie y 30367 elementos de volumen, el mallado es de primer orden.

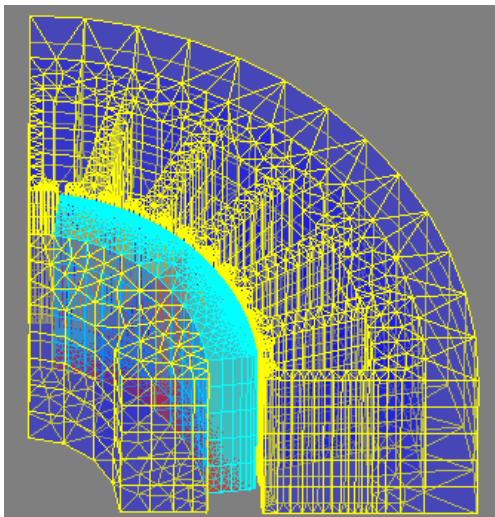


Figura 5. Mallado de la cuarta parte de la geometría total del generador en 3D

La densidad de campos magnéticos antes y después de la disminución de flujo remanente de los imanes se visualiza en las Figuras 6 y 7. En las tablas I y II se representa la magnitud de la densidad de flujo, respectivamente, apreciándose una clara disminución de la distribución del flujo magnético en la máquina después de los 0.3 s, que es cuando sucede la disminución de flujo remanente en los imanes permanentes. Mientras que en las Figuras 8, 9 y 10 se aprecia el comportamiento de las variables eléctricas como voltajes y corrientes en conductores, así como el par electromagnético respectivamente.

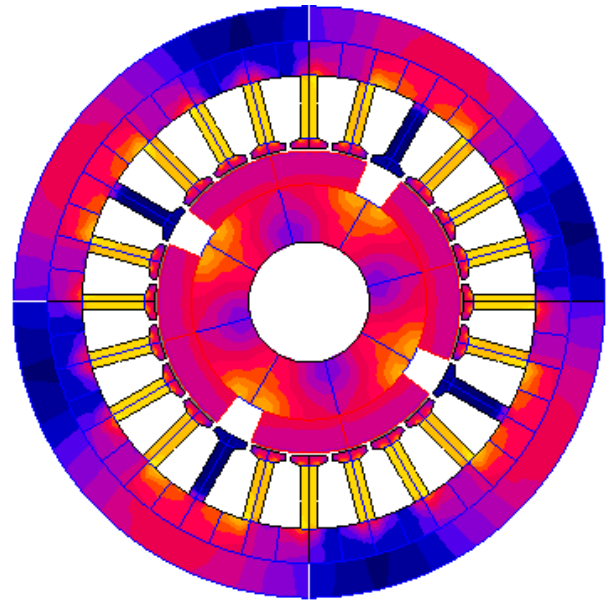


Figura 6. Densidad de flujo distribuido en el generador a los 0.29 s.

TABLA I  
MAGNITUD DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO

ISOVAL_NO_VACUUM	
953.085E-3	
897.133E-3	
841.182E-3	
785.230E-3	
729.279E-3	
673.328E-3	
617.376E-3	
561.425E-3	
505.474E-3	
449.522E-3	
393.571E-3	
337.620E-3	
281.668E-3	
225.717E-3	
169.765E-3	
113.814E-3	
57.863E-3	
1.911E-3	

Magnetic flux density / Vector in T

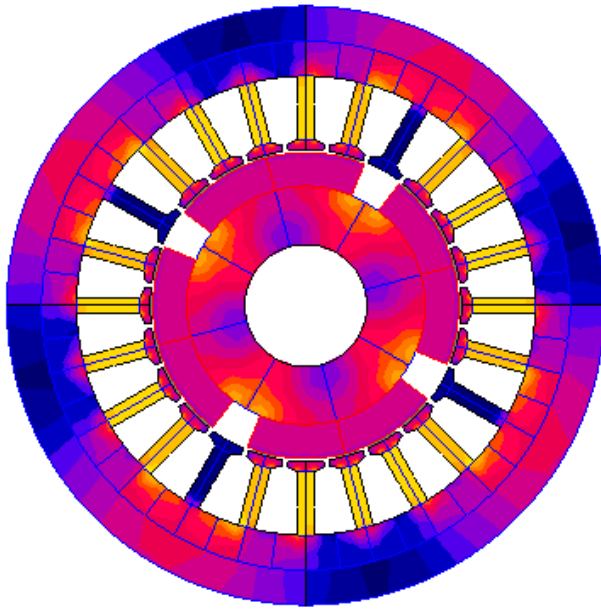


Figura 7. Densidad de flujo distribuido en el generador a los 0.5 s.

TABLA II  
MAGNITUD DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO

ISOVAL NO VACUUM
741.092E-3
697.583E-3
654.073E-3
610.564E-3
567.055E-3
523.546E-3
480.036E-3
436.527E-3
393.018E-3
349.508E-3
305.999E-3
262.490E-3
218.980E-3
175.471E-3
131.962E-3
88.452E-3
44.943E-3
1.434E-3

Magnetic flux density / Vector in T

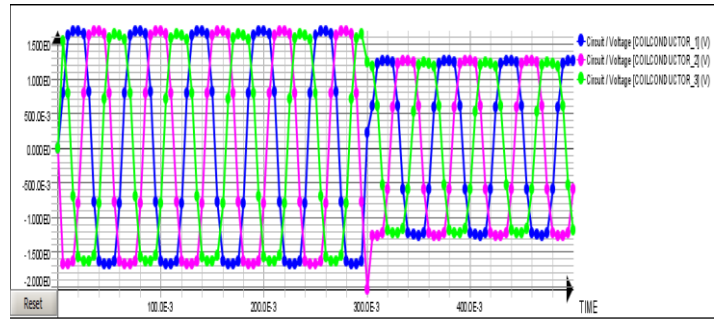


Figura 8. Voltajes en los conductores.

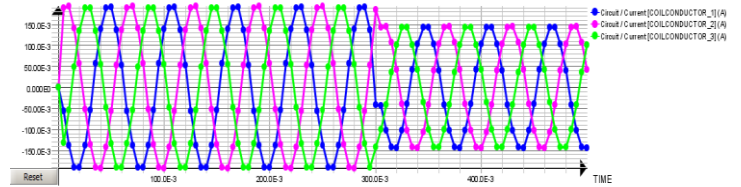


Figura 9. Corrientes en los conductores.

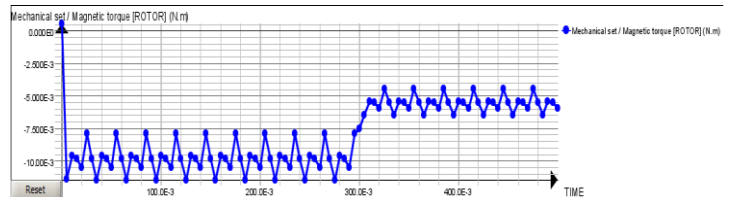


Figura 10. Par electromagnético.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el análisis electromagnético de un generador síncrono de imanes permanentes en 3D, se simuló un caso de estudio en el cual, operando a velocidad constante los imanes permanentes en el rotor, estos sufrieron una disminución en el flujo remanente a partir de los 0.3 s de simulación. Se visualiza en los resultados obtenidos una disminución en las variables eléctricas en los conductores del estator del generador, esto debido a que el flujo magnético en la máquina no es el mismo, perjudicando las tensiones inducidas en los conductores y el par electromagnético, es por ello que es importante tener en consideración las protecciones de este tipo de generadores eléctricos ya sea ante una falla transitoria en una de las fases del estator o el incremento de temperatura, que perjudiquen las propiedades de los imanes, disminuyendo en este caso, su flujo remanente necesario para una eficiente conversión de la energía.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de la Laguna, CONACYT, CEMIE-Eólico, IIE, TNM y PRODEP, por el apoyo financiero brindado.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] M. N. O. Sadiku, "A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems," *IEEE Trans. Education*, vol. 32, no. 2, pp.85-93, 1989.
- [2] S. J. Salon, "Finite element analysis of electric machinery," *IEEE Trans. Computer Applications in Power*, vol. 3, no. 2, pp. 29-32, April 1990.
- [3] Flux 2D/3D manual de usuario. 2014.
- [4] K. Hameyer and R. Belmans, *Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*, UK: WITPRESS, 2001.
- [5] T.F. Chan, *Member, IEEE*, Weimin Wang, and L.L. Lai, "Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D Finite-Element Analysis," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 25, No. 3, September 2010.
- [6] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. 2014.

#### VII. BIOGRAFÍA



**J. González** Nació en Torreón, Coahuila de Zaragoza, México, el 31 de Marzo de 1992. Ingeniero Eléctrico egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila de Zaragoza, México en 2013. Actualmente estudia la maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Su área de interés es el análisis de máquinas eléctricas.

El Ing. González participó en el tercer congreso nacional de electromecánica y electrónica, CONAEE 2014, con el artículo

"Monitoreo de Potencia Eléctrica y Temperatura en un Módulo Fotovoltaico Usando Labview y Arduino".



**C. Hernández** Nació en Oaxaca, Oax. El 7 de

de Octubre de 1968. Ingeniera en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Morelos, en Cuernavaca, Morelos, México en 1990. Maestra en Ciencias en Fundamentos de Tecnología de la Información Avanzada por el Imperial College of Science Technology and Medicine, en Londres, Inglaterra en 1995. Doctora en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coah, México, en 2007.

Ella laboró en el Departamento de Simulación del Instituto de Investigaciones Eléctricas de 1991 al 2000. Actualmente trabaja en el Instituto Tecnológico de la Laguna, en Torreón, Coah., México. Sus Áreas de interés son inteligencia artificial y optimización global aplicada a máquinas eléctricas.

Dra. Hernández. SNI Nivel I, Perfil Deseable PROMEP, IEEE Member.



**M. A. Arjona** Nació en Santa María, Tepic, Nayarit, México; el 13 de Junio de 1966. Ingeniero Eléctrico egresado del Instituto Tecnológico de Durango en 1988. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de la Laguna en 1990. Obtuvo el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica por el Imperial College of Science, Technology and Medicine en Londres, Inglaterra en 1996.

Él actualmente forma parte de la planta académica del Posgrado en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coah., México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas eléctricas y energías renovables.

El Dr. Arjona es reconocido por el sistema nacional de investigadores desde el año de 1992. En el año 2008 le otorgan la distinción de investigador nacional nivel II, gracias a los trabajos de investigación. Además, pertenece a la IEEE como senior member del año 2008 a la fecha.