

# Análisis del Generador Síncrono de Imanes Permanentes ante una falla de una fase usando elementos finitos en 2D.

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

**Resumen**— En este artículo se presenta el análisis electromagnético de un generador síncrono de imanes permanentes, el cual es un tipo de dispositivo empleado en sistemas eólicos de generación eléctrica. Se propone un caso de estudio en el cual se disminuye la resistencia de uno de los conductores por fase del estator, este es un tipo de falla común en estos sistemas de generación alterna y que llegan a afectar una eficiente conversión de la energía. Se presentan los resultados obtenidos con el software de elementos finitos Flux 2D, el cual permite conocer con precisión la distribución de los campos magnéticos en la máquina así como su comportamiento después de la falla, lo que puede ser de gran utilidad en el posterior diseño y construcción de este tipo de generadores.

**Temas claves**— Análisis Electromagnético, Elementos Finitos, Generador Síncrono de Imanes Permanentes.

**Abstract**—This paper presents the electromagnetic analysis of a permanent magnet synchronous generator which is a type of device used in wind power generation systems. A case study in which the resistance of one of the phase conductors of the stator decreases, this is a common type of failure in these AC generation systems and they affect the efficient conversion of energy. The results are obtained with the software of finite elements Flux 2D, which allows to know precisely the distribution of magnetic fields on the machine and its behavior after failure, which can be very useful in the subsequent design and construction of this type of generators.

**Keywords**— Electromagnetic Analysis, Finite Elements, Permanent Magnet Synchronous Generator.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el incremento de nuevas tecnologías en el campo de las energías renovables ha adquirido un lugar importante en el área de la investigación y desarrollo de dispositivos que permiten una eficiente conversión de energías tales como la del viento en eléctrica. Estos dispositivos en su mayoría incluyen a las máquinas rotativas, las cuales son empleadas en sistemas de generación eléctrica como son los aerogeneradores, los cuales aprovechan el potencial eólico para convertirlo en

energía eléctrica y suministrarla después de ser enviada a la red de distribución eléctrica.

Uno de los principales tipos de máquinas eléctricas más empleados en sistemas de generación eólica son los generadores síncronos de imanes permanentes, debido a las ventajas que éstos ofrecen sobre otros tipos de generadores eléctricos usados en estos sistemas; algunas de estas ventajas son: no existen devanados presentes en el rotor, por lo cual se reducen las pérdidas eléctricas, implicando una alta eficiencia y al mismo tiempo no requieren de un costoso sistema de enfriamiento. El generador de imanes permanentes puede lograr una mayor densidad de flujo en el entrehierro [1]- [3].

En este artículo se presenta un análisis electromagnético en un generador síncrono de imanes permanentes, para entender el comportamiento de este tipo de dispositivos ante algunas situaciones comunes en los sistemas eléctricos de potencia interconectados con estas fuentes de generación alterna. Actualmente, uno de los métodos más precisos y eficientes para este tipo de estudio en máquinas eléctricas rotativas es el método de elementos finitos, conocido como FEM por sus siglas en inglés. Este método permite conocer la distribución exacta del campo magnético en la máquina a partir de las ecuaciones de Maxwell [4].

La máquina analizada es sometida a una condición de falla, a determinado tiempo de simulación, en una de las fases del estator. El entorno en donde es simulado y caracterizado el generador es en el software de elementos finitos Flux 2D [5]. Se muestran las corrientes transitorias así como los voltajes en las fases del estator a determinado tiempo y velocidad constante del generador; también se presenta el mapeo de la distribución de densidad de campos magnéticos en la máquina.

## II. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Todos los fenómenos de campos electromagnéticos de bajas frecuencias pueden ser descritos por la ecuación de Poisson (o para regiones en vacío la ecuación de Laplace) o la ecuación de difusión. Para campos estáticos, es decir, donde no existen variaciones en el tiempo, se aplica la ecuación de Poisson. Para problemas en donde ocurren corrientes de Eddy se usa la ecuación de difusión. En

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

principio estas ecuaciones diferenciales pueden ser fáciles de resolver, de hecho muchas de las funciones, cuando son substituidas en estas ecuaciones, se convierten en la solución al problema.

La dificultad consiste en que para una ecuación diferencial que tiene una solución única, se deben satisfacer condiciones de contorno. La mayoría de los dispositivos, tales como máquinas rotativas, tienen límites muy complicados. Además, estos dispositivos utilizan materiales que pueden ser anisotrópicos y no lineales. Fuentes como la densidad de corriente usualmente se distribuyen por superficies de los contornos de las máquinas.

La ventaja de métodos numéricos como el método de elementos finitos es que puede ser usado en formas arbitrarias, condiciones frontera arbitrarias y complicadas fuentes de distribución en las máquinas.

#### A. Descripción del método.

Para aplicar el método de elementos finitos se divide el espacio de interés en pequeñas pero finas regiones llamadas elementos, los cuales cubren completamente el espacio pero no lo sobrepasan. Adicionalmente, se requiere que ninguno de estos elementos traspase una frontera del material; las cantidades desconocidas pueden ser descritas por una simple función. Los polinomios se escogen porque las formulaciones implican diferenciación e integración de estas funciones. El orden del polinomio determina el orden del elemento [6].

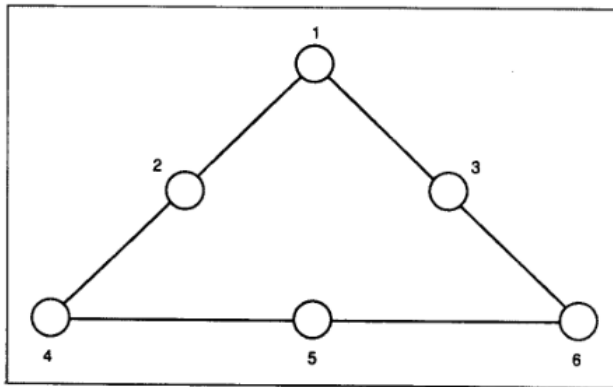


Figura 1. Elemento triangular de segundo orden.

En el análisis de la geometría del generador de imanes permanentes empleada en este artículo se utilizan elementos triangulares de segundo orden, como el de la Figura 1. Esto significa que para el cálculo de potencial, éste variará cuadráticamente en cada dirección.

#### B. Procedimiento de Análisis.

El procedimiento para analizar un dispositivo

electromagnético, como el generador de imanes permanentes, mediante el método de elementos finitos se puede dividir en tres pasos principales, los cuales se describen en la Figura 2.

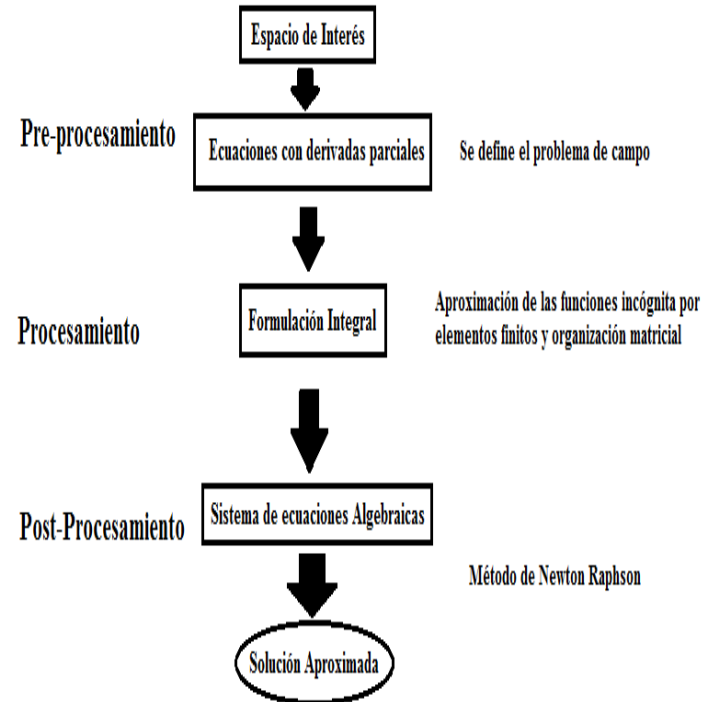


Figura 2. Diagrama de Flujo del procedimiento de análisis

### III. MODELO EN ELEMENTO FINITO DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

El modelo basado en el método de elementos finitos cubre algunos inconvenientes que presenta el modelo analítico al no representar fenómenos detallados como los campos magnéticos inducidos en el estator y la saturación magnética del material del que se compone la máquina. Como se mencionó con anterioridad, el método de los elementos finitos permite, a través de las ecuaciones de Maxwell, conocer la distribución exacta de los campos magnéticos en la máquina.

El vector de potencial magnético  $A$  es una función potencial la cual puede construir una condición frontera fácilmente, esto puede hacer posible la obtención de la densidad de campo magnético  $B$ , el vector de potencial magnético es usado para calcular el campo electromagnético en dos dimensiones.

La forma diferencial de la ecuación de Maxwell está dada por:

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v + \nabla \times H_c \quad (1)$$

donde  $A$  es el vector de potencial magnético,  $J_s$  es la densidad de corriente,  $H_c$  es la fuerza de coercitividad del imán permanente,  $v$  es la velocidad del objeto en movimiento y  $\sigma$  la conductividad eléctrica [7].

El modelo analizado en 2D es un generador de imanes permanentes de 10 polos salientes con imanes de ferrita, Figura 3; está modelado en el software comercial Flux 2D, el cual se basa en el método de elementos finitos y además hace uso de la condición frontera de periodicidad para analizar únicamente una fracción del generador, equivalente a un polo magnético de la geometría.

El campo electromagnético continuo se transforma a un sistema discreto mediante un mallado compuesto por 17160 nodos y 5720 elementos de segundo orden, como se muestra en la Figura 4. El módulo transitorio del software puede calcular la fuerza contra electromotriz, el flujo magnético y el par de la máquina.

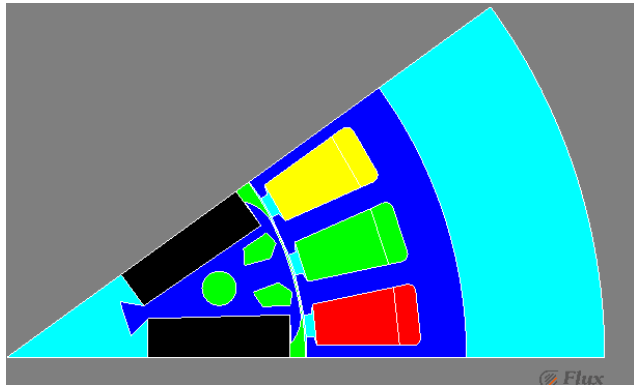


Figura 3. Geometría del generador de imanes permanentes equivalente a un polo de la geometría total de la máquina.

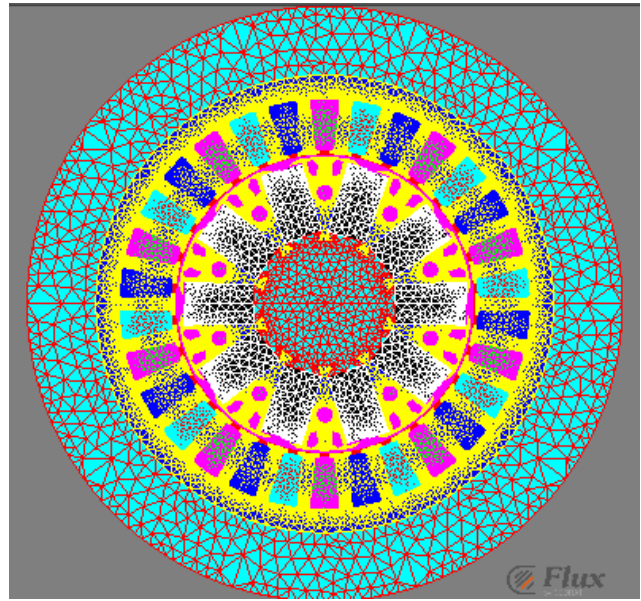


Figura 4. Mallado de la geometría completa del generador de imanes permanentes.

#### IV. SIMULACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITO DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

La geometría del modelo del generador síncrono de imanes permanentes en 2D mostrada en la Figura 3, es acoplada a las fases del estator mediante el circuito equivalente mostrado en la Figura 5. Se simula una falla en uno de los devanados del estator a los 0.3 segundos de simulación, mientras éste se encuentra girando a una velocidad constante de 2600 rpm. La falla, como se muestra en la Figura 6, es obtenida debido a una disminución en el número de vueltas y la resistencia en el conductor de la fase 1 del estator.

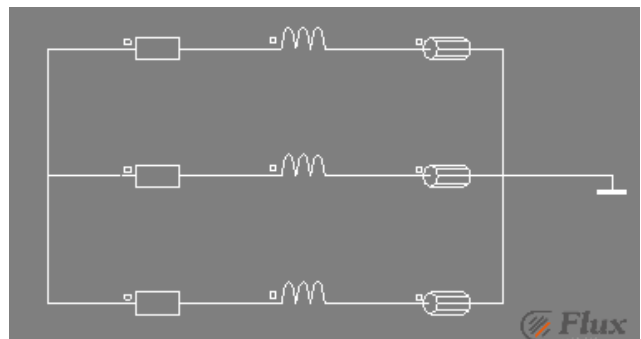


Figura 5. Circuito equivalente del estator del generador de imanes permanentes.

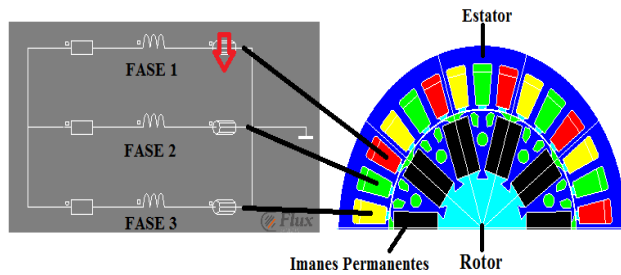


Figura 6. Circuito equivalente con la falla en la fase 1 del estator.

### V. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se presentan los resultados obtenidos en los voltajes y corrientes en los conductores del estator en las figuras 7 y 8 respectivamente, el par electromagnético en la Figura 9 así como la distribución del campo magnético, Figura 10, en la máquina durante la falla.

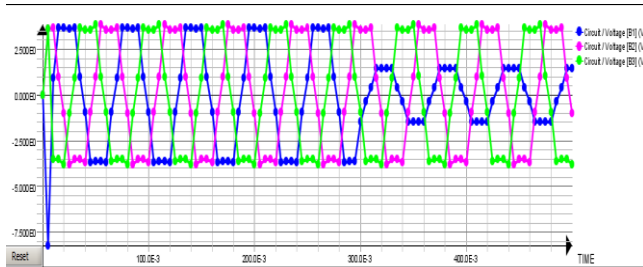


Figura 7. Voltajes en los conductores.

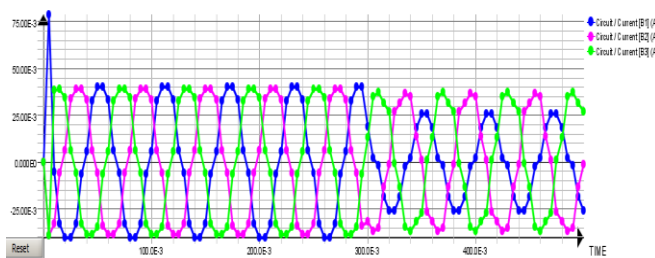


Figura 8. Corrientes en los conductores.

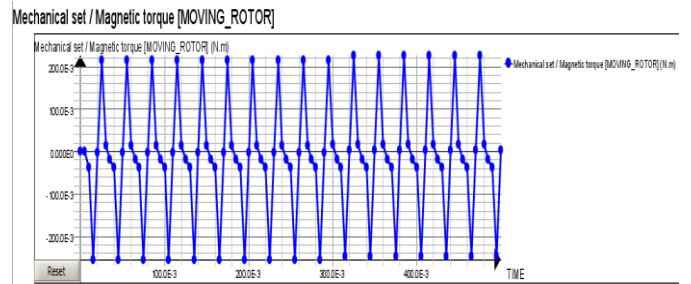


Figura 9. Par electromagnético.

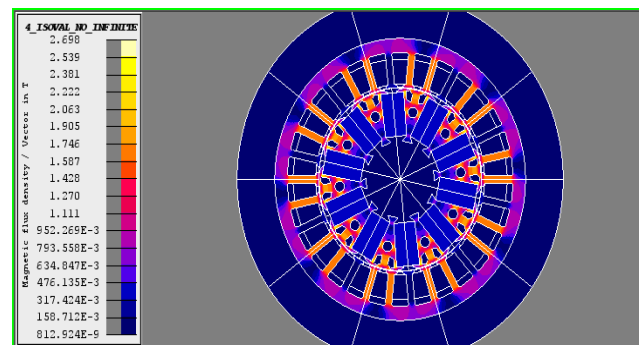


Figura 10. Distribución del campo magnético en el generador a los 0.5 segundos.

### VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló el análisis electromagnético de un generador síncrono de imanes permanentes el cual fue sometido a una falla empleando un modelo axisimétrico en 2D usando el paquete comercial de elementos finitos Flux. Para la simulación de la falla se consideró la disminución de la resistencia del conductor de una de las fases así como su número de vueltas. En los resultados se pudo observar una clara disminución y desbalance en las señales de voltajes y corrientes en la fase en donde ocurrió la falla. Este tipo de análisis empleando el método de elementos finitos puede ser útil en el diseño óptimo de estos dispositivos empleados en aerogeneradores, sometiendo a diversos modelos a diferentes condiciones de operación y situaciones comunes en los sistemas de generación con una gran precisión antes de su construcción y sin la necesidad de gastar en prototipos reales para las pruebas ya que la simulación mediante este método permite obtener resultados muy cercanos a los obtenidos en la realidad.

## VII. AGRADECIMIENTOS

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

## VIII. REFERENCIAS

- [1] O. Ojo and J.Cox, "Investigation into the performance characteristics of an interior permanent magnet generator including saturation effects," in Proc. 31st IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 1996, pp.533-540.
- [2] E. Spooner and A. C. Williamson, "Direct Coupled, Permanent-Magnet Generators for Wind Turbine Applications," IEE Proceedings, Part B, Vol. 143, No. 1, pp. 1-8, January 1996.
- [3] H. Li and Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," IET Renewable Power Generation, 2008, vol. 2, No. 2, pp. 123-138
- [4] K. Hameyer and R. Belmans, Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices, UK: WITPRESS, 2001.
- [5] Flux 2D/3D, Manual de usuario. 2014
- [6] S. J. Salon, "Finite element analysis of electric machinery," IEEE Trans. Computer Applications in Power, vol. 3, no. 2, pp. 29-32, April 1990.
- [7] G. Duan, H. Wang, H. Guo, G. Gu, "Direct Drive Permanent Magnet Wind Design and Electromagnetic Field Finite Element Analysis," IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 20, no.3, June 2010.

## IX. BIOGRAFÍA



**Jesús González Domínguez** 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.