

Simulación electromagnética del modelo de validación TEAM 7 usando la formulación T, phi-phi

J. M. Díaz-Chacón^{1*}, J. A. Beltrán-Pérez¹, C. Amaro-Hernández¹, A. Navarro-Valle¹,
P. F. Rosales-Escobedo¹

Resumen— En este artículo se presenta una simulación electromagnética del modelo de validación TEAM 7 mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) en Tres Dimensiones (3D). Para llevar a cabo esta simulación se implementa la formulación magnetodinámica T, phi-phi (potencial eléctrico vectorial - potencial magnético escalar reducido) usando el software libre GetDP. En este artículo también se muestra brevemente, la derivación de la formulación T, phi-phi. Para la generación de la malla del modelo se utiliza el software libre Gmsh. Esta malla se discretiza usando elementos tetraédricos de primer orden. Finalmente, se desarrolla un análisis comparativo entre la solución obtenida de la simulación y los datos experimentales, recabados de la literatura eléctrica. Los resultados de esta simulación muestran similitudes en tendencia de comportamiento, con respecto a los datos experimentales de referencia. Además, el uso óptimo de los recursos computacionales en esta simulación se privilegia puesto que, comparado con la formulación A,V-A (potencial magnético vectorial y potencial eléctrico escalar), la cantidad de memoria de cómputo requerida y el tiempo de resolución se reducen de manera considerable. Esta simulación puede ser utilizada como plataforma de aprendizaje para simular otros modelos de validación en 3D en estado estacionario de baja frecuencia.

Palabras claves—Formulación magnetodinámica, Método de los Elementos Finitos, modelo de validación.

Abstract— This article presents an electromagnetic simulation of the TEAM 7 validation model by applying the Finite Element Method (FEM) in Three Dimensions (3D). To carry out this simulation, the T, phi-phi magnetodynamic formulation (electric vector potential - scalar magnetic potential) is implemented using the free software GetDP. In this article, the derivation of the T, phi-phi formulation is also briefly described. For the generation of the model mesh, the free software Gmsh is used. This mesh is discretized using first order tetrahedral elements. Finally, a comparative analysis is developed between the solution obtained from the simulation and the experimental data, collected from the electrical literature. The results from this simulation show similarities in behavior trend, with respect to the experimental reference data. Furthermore, the optimal use of computational resources is privileged in this simulation since, compared to the A, V-A formulation (magnetic vector potential and electric scalar potential), the amount of computing memory required

and the resolution time are considerably reduced. This simulation may be used as a learning platform to simulate other 3D low-frequency, steady-state benchmark models.

Keywords— Benchmark model, Finite Element Method, magnetodynamic formulation.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de varias décadas, la aplicación de métodos numéricos para el desarrollo de diseños eficientes de diversas máquinas eléctricas ha evolucionado considerablemente. En el ámbito industrial, la implementación de metodologías numéricas innovadoras ha mejorado el desarrollo de nuevos productos comerciales. Con la finalidad de optimizar los insumos y tiempos de manufactura, empleados en la creación de prototipos, las industrias fabricantes de máquinas eléctricas desarrollan simulaciones para modelar equipos eléctricos tales como transformadores, motores y generadores.

Hoy en día, una de las técnicas numéricas más utilizadas para la simulación computacional de diversos fenómenos físicos es el Método de los Elementos Finitos (MEF). En electromagnetismo, las ecuaciones diferenciales de Maxwell se utilizan para describir el comportamiento de los equipos eléctricos, antes mencionados. En el área eléctrica, el modelado electromagnético en bajas frecuencias es comúnmente utilizado para el análisis y diseño de equipos eléctricos industriales, alimentados por fuentes de corriente alterna [1]-[6]. En este ámbito, generalmente se emplea software comercial con un alto grado de confiabilidad. La principal desventaja en el uso de este tipo de software es el costo económico que conlleva la adquisición de licencias. Por otra parte, existe una gran variedad de software libre que permite la aplicación del MEF en electromagnetismo de manera directa. GetDP es uno de los softwares utilizados en la implementación del MEF. GetDP fue creado hace varias décadas por C. Geuzaine y P. Dular, y se utiliza para implementar una gran variedad de formulaciones matemáticas del MEF de diversos fenómenos físicos. De manera predominante, GetDP se ha aplicado en investigaciones relacionadas con el electromagnetismo [7].

¹ Universidad Autónoma de Baja California, Av. Álvaro Obregón s/n, Nueva, C.P. 21100, Mexicali, Baja California., México.
*(juan.mauricio.diaz.chacon@uabc.edu.mx)

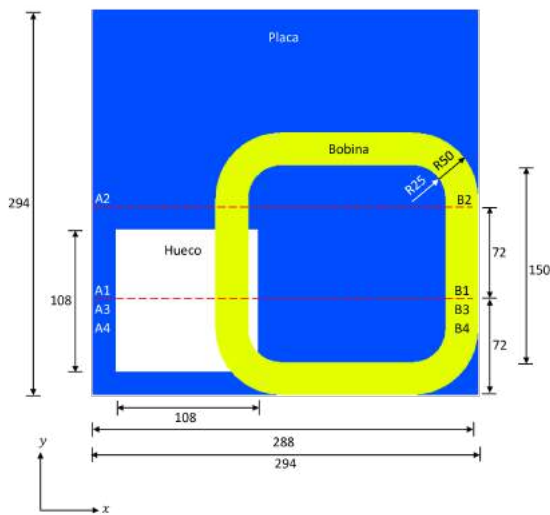


Figura 1. Vista del plano xy del modelo TEAM 7.

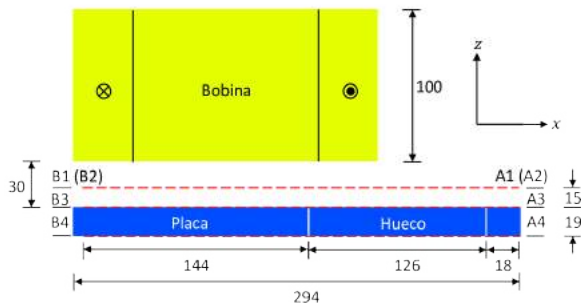


Figura 2. Vista del plano xz del modelo TEAM 7.

A su vez, los mismos autores del software GetDP han creado el software libre Gmsh, el cual es un generador de mallas de elementos finitos que también, se emplea para desplegar resultados de post-procesamiento [8]. En este trabajo se pretende simular el modelo de validación TEAM 7 (por sus siglas en inglés Testing Electromagnetic Analysis Methods) mediante la implementación de la formulación magnetodinámica T, phi-phi. Este modelo consiste de una bobina excitada con una fuente sinusoidal de baja frecuencia, capaz de inducir un campo magnético en una placa de aluminio con un hueco [9]-[10]. En este trabajo sólo se presentan los resultados de la simulación de este modelo a una frecuencia de 200 Hz.

II. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO DE VALIDACIÓN TEAM 7

El MEF se conforma de tres etapas básicas: preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento. En la etapa de pre-procesamiento se lleva a cabo la descripción y caracterización del modelo, donde a su vez, se incorporan las características físicas y condiciones de frontera del mismo. En la etapa de procesamiento se realiza la solución del sistema de ecuaciones, consecuencia de la implementación de la formulación electromagnética.

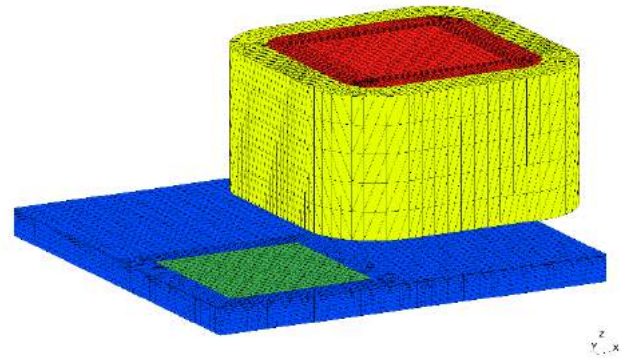


Figura 3. Malla del modelo TEAM 7, realizada con Gmsh.

Finalmente, en la etapa de post-procesamiento se llevan a cabo la obtención de los resultados numéricos del modelo para su posterior análisis e interpretación.

A continuación, se describen brevemente las tres etapas realizadas para simular el modelo de validación TEAM 7 usando la formulación T, phi-phi.

A. Pre-procesamiento: geometría, mallado e incorporación de características físicas del modelo TEAM 7

En primer lugar, para simular el modelo TEAM 7 se requiere crear la geometría y malla del mismo. Esta geometría, dada en milímetros, se muestra en las Figuras 1 y 2, mientras que la malla de elementos tetraédricos de primer orden se presenta en la Figura 3, donde se ha excluido el aire exterior. Esta malla se realizó utilizando el software Gmsh. Posteriormente, se necesitan incorporar las características físicas del modelo. En la Tabla I se muestran las características físicas utilizadas en la simulación del modelo TEAM 7.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MODELO TEAM 7 [x]

Propiedad física	Magnitud
Conductividad eléctrica de la placa (S/m)	3.5×10^7
Conductividad eléctrica del hueco (S/m)	1.0
Corriente de excitación en la bobina (Amp. Vuelt.)	2742
Permeabilidad magnética (aire, placa, hueco y bobina)	μ_0

B. Procesamiento: desarrollo de la formulación magnetodinámica T, phi-phi y resolución del sistemas de ecuaciones global del modelo TEAM 7

Mediante el uso del software GetDP se pueden implementar y resolver las ecuaciones discretas de la formulación T, phi-phi. En este software las ecuaciones del fenómeno electromagnético se deben plantear en su forma débil, es decir, las ecuaciones obtenidas vienen a ser de orden menor

(primer orden). El desarrollo del código en el software GetDP se basa en la descripción matemática de la forma débil del modelo bajo estudio. Esto facilita la implementación de los modelos del MEF en este software libre. Por tal motivo, en esta sección se deducen las ecuaciones discretas de la formulación T, phi-phi que se han implementado en el software GetDP.

A partir de las ecuaciones de Maxwell es posible derivar la formulación T, phi-phi [11]-[23]. Basado en lo anterior, se establece que la ley de Ampere está dada por:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (1)$$

A partir de esta ecuación se puede definir a \vec{H} en el dominio de interés como:

$$\vec{H} = \vec{T} + \vec{T}_0 - \nabla\phi \quad (2)$$

donde \vec{T} es el potencial eléctrico vectorial desconocido que debe incluirse en la formulación para la determinación de las corrientes inducidas en los materiales conductores y \vec{T}_0 es el potencial eléctrico vectorial conocido tanto en la bobina (región amarilla de la Figura 3) como en la región interna de la misma (región roja de la Figura 3). ϕ representa el potencial magnético escalar reducido.

Por lo tanto, si sustituye (2) en (1), se tiene que:

$$\nabla \times (\vec{T} + \vec{T}_0 - \nabla\phi) = \vec{j}_e + \vec{j}_0 \quad (3)$$

donde \vec{j}_0 es la densidad de corriente conocida en la bobina y \vec{j}_e es la densidad de corriente inducida en las regiones conductoras. Si se considera la región de fuente, Ω_{T_0} , se establece lo siguiente:

$$\nabla \times \vec{T}_0 = \vec{j}_0 \text{ en } \Omega_{T_0} \quad (4)$$

Por otra parte, si sólo se considera la región conductora, la ecuación de la ley de Ampere es asumida como:

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{j}_e \text{ en } \Omega_c \quad (5)$$

o bien:

$$\frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{T} = \vec{E} \text{ en } \Omega_c \quad (6)$$

Ahora bien, si se emplea también la ecuación de la ley de Faraday en el dominio de la frecuencia se asume que:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \text{ en } \Omega_c \quad (7)$$

donde:

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla\phi \text{ en } \Omega_c \quad (8)$$

Por lo tanto, se puede definir (7) en la región conductora de la siguiente manera:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{T} \right) + j\omega\mu\vec{T} - j\omega\mu\nabla\phi = 0 \text{ en } \Omega_c \quad (9)$$

A su vez, se emplea la ecuación de continuidad en el dominio de interés, en función de los potenciales eléctricos vectoriales y del potencial magnético escalar reducido como:

$$\nabla \cdot (\mu\vec{T} - \mu\nabla\phi) = -\nabla \cdot (\mu\vec{T}_0) \quad (10)$$

Si se aplica el método de Galerkin a las ecuaciones establecidas en (9) y (10), se pueden obtener las ecuaciones discretas del MEF. Las formas débiles de (9) y (10), establecidas para la obtención de la formulación T, phi-phi son:

$$\int_{\Omega_c} \frac{1}{\sigma} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{T}) d\Omega + \int_{\Omega_c} j\omega\mu\vec{W} \cdot \vec{T} d\Omega - \int_{\Omega_c} j\omega\mu\vec{W} \cdot \nabla\phi d\Omega = 0 \quad (11)$$

y

$$-\int_{\Omega_c} j\omega\mu\nabla N \cdot \vec{T} d\Omega + \int_{\Omega_n + \Omega_c} j\omega\mu\nabla N \cdot \nabla\phi d\Omega = \int_{\Omega_{T_0}} j\omega\mu\nabla N \cdot \vec{T}_0 d\Omega \quad (12)$$

donde \vec{W} es la función de forma de un elemento de arista mientras que N representa la función de forma de un elemento nodal.

Se puede observar en la formulación T, phi-phi que el potencial magnético escalar reducido puede ser descrito en todo el dominio, $\Omega_n + \Omega_c$, mientras que el potencial eléctrico vectorial, \vec{T} , sólo es utilizado en el dominio conductor, Ω_c , para la determinación de las corrientes inducidas. Por otro lado, en este artículo \vec{T}_0 se ha obtenido de manera analítica utilizando ecuaciones similares a las propuestas en [24] en la región Ω_{T_0} : interior de bobina (color rojo, Figura 3) y bobina (color amarillo, Figura 3). Cabe mencionar que la solución del sistemas de ecuaciones resultante de esta formulación es singular. Por tal motivo se debe utilizar un método iterativo para obtener la solución del modelo o bien, se puede utilizar la norma de Coulomb para establecer una solución única [25]-[26]. Sin embargo, esto puede afectar la confiabilidad de los resultados. En este trabajo se ha empleado la estrategia de solución presentada

en [27] donde un solver directo es capaz de generar la solución de un sistema de ecuaciones singular, de manera satisfactoria, sin necesidad de aplicar una norma de solución.

C. Post-procesamiento: resultados obtenidos de la simulación del modelo TEAM 7

En la Tabla II se muestran las líneas utilizadas para la obtención de los resultados, correspondientes a las variables de interés del modelo de validación TEAM 7. Las variables deseadas son la componente en el eje z de la densidad de flujo magnético, B_z , y la componente en el eje y de la densidad de corriente inducida, J_y . Estas líneas también se indican, en color rojo, en las Figuras 1 y 2.

TABLA II
LÍNEAS DE VARIABLES FÍSICAS A OBTENER DEL MODELO TEAM 7 Y SUS CORRESPONDIENTES LÍNEAS

Variable física	Línea de medición
$B_z (T)$	A1-B1
	A2-B2
$J_y (A/m^2)$	A3-B3
	A4-B4

Para llevar a cabo la simulación del modelo TEAM 7, se utilizó una laptop MacBook Pro 13-inch 2020 con Procesador 2 GHz Quad-Core Intel Core i5, 16 Gb 3733 MHz LPDDR4X RAM.

En las Figuras 4-7 se presentan los resultados obtenidos de la simulación, en comparación con los datos proporcionados por la referencia [9]. Se puede observar que los resultados se aproximan, de manera aceptable, a las mediciones experimentales, dadas por la referencia.

En las Figuras 8 y 9 se muestran tanto la magnitud como la parte real de la distribución de la densidad de corriente inducida en la placa, obtenida de la simulación del modelo TEAM 7, respectivamente. Se puede visualizar la ubicación donde la densidad de corriente es nula. Además, se pueden apreciar los puntos donde se presenta la mayor densidad de corriente inducida.

Finalmente, una comparación se realiza empleando la formulación A,V-A para la solución del modelo TEAM 7, la cual permite visualizar el nivel de reducción de recursos de cómputo en la formulación T, phi-phi.

TABLA III
TABLA COMPARATIVA DE DESEMPEÑO DE AMBAS FORMULACIONES MAGNETODINÁMICAS

Formulación	Tiempo de solución (s)	Número de incógnitas
T, phi-phi	86.3239	164,597
A,V-A	228.943	348,436

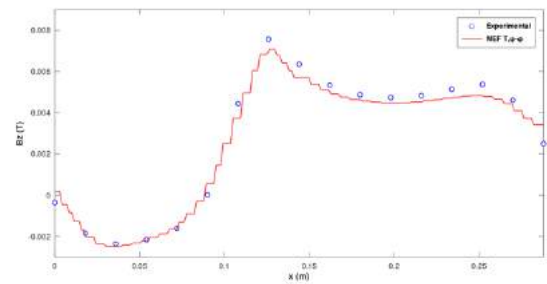


Figura 4. Componente en el eje z de la densidad de flujo en la línea A1-B1.

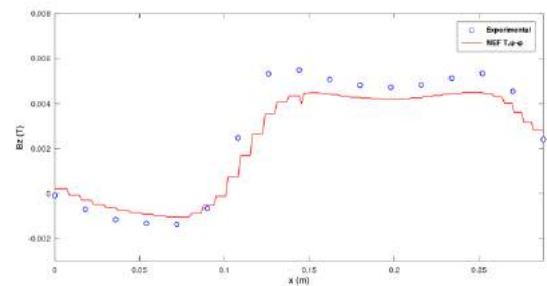


Figura 5. Componente en el eje z de la densidad de flujo magnético en la línea A2-B2.

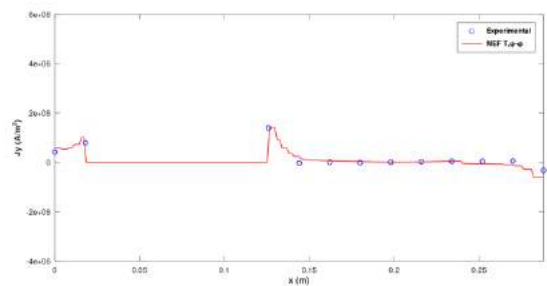


Figura 6. Componente en el eje y de la densidad de corriente inducida en la línea A3-B3.

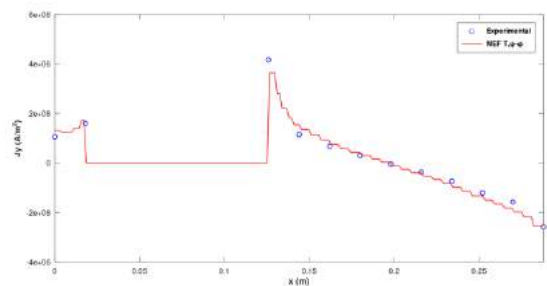


Figura 7. Componente en el eje y de la densidad de corriente inducida en la línea A4-B4.

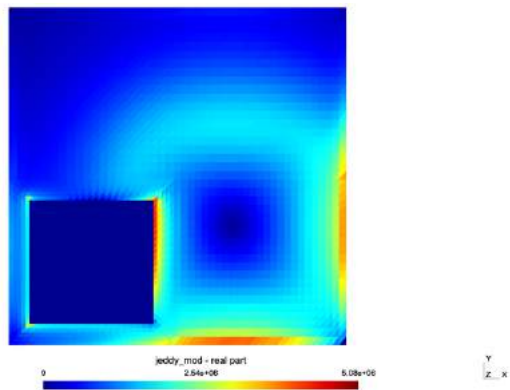


Figura 8. Magnitud de la densidad de corriente eléctrica inducida en la placa.

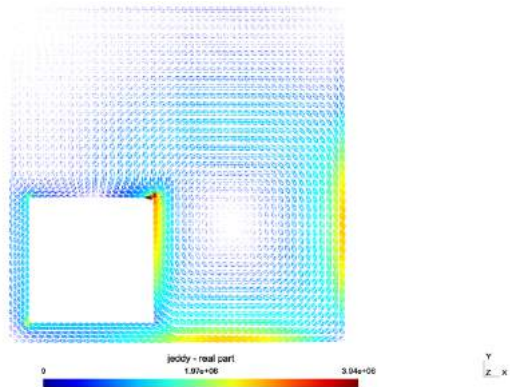


Figura 9. Parte real de la distribución de la densidad de corriente eléctrica inducida en la placa.

III. CONCLUSIÓN

En este artículo se realizó la simulación del modelo de validación internacional TEAM 7 usando el software libre GetDP. Esta simulación se basa en la implementación de la formulación discreta T, phi-phi en dicho software. Los resultados obtenidos de esta simulación se aproximan a las mediciones presentadas en la literatura. Con esto se demuestra la confiabilidad del software GetDP para el desarrollo de simulaciones electromagnéticas en 3D en bajas frecuencias y en estado estable, mediante el uso de elementos tetraédricos de primer orden. Esta simulación se puede utilizar como plataforma para la solución de otros modelos magnetodinámicos en estado estable de dispositivos electromagnéticos tales como transformadores, generadores y motores eléctricos.

IV. REFERENCIAS

[1] Bastos, J. P. A., & Sadowski, N. (2013). *Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling*. CRC Press.
 [2] H., H. S. R. (1995). *Finite Elements, Electromagnetics and Design*. Elsevier.

[3] Biro, O., & Preis, K. (1990). "Finite element analysis of 3-D eddy currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26(2), pp. 418-423.
 [4] Biro, O., Preis, K., & Renhart, W. (1989). "Finite element analysis of 3D multiply connected eddy current problems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25(5), pp. 3-5.
 [5] Biro, O., Preis, K., Renhart, W., Richter, K. R., & Vrisk, G. (1990). "Performance of different vector potential formulations in solving multiply connected 3-d eddy current problems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26(2), pp. 438-441.
 [6] Renhart, W., H. Stogner, & Preis, K. (1988). "Calculation of 3D eddy current problems by finite element method using either an electric or a magnetic vector potential," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24(1), pp. 122-125.
 [7] Dular, P., Geuzaine, C., Henrotte, F., & Legros, W. (1998). "A general environment for the treatment of discrete problems and its application to the finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5), 3395-3398.
 [8] Geuzaine, C., & Remacle, J. (2009). "Gmsh: a 3-d finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331.
 [9] Kovács, G., & Kuczmann, M. (2011). "Solution of the TEAM workshop problem No. 7 by the finite element method," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87(3), pp. 99-102.
 [10] Kuczmann, M., & Ivanyy, A. (2008). *The Finite Element Method in Magnetics*. Akadémiai Kiadó.
 [11] Bíró, Oszkár. (1999). "Edge element formulations of eddy current problems," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 169(3-4), pp. 391-405.
 [12] Bouillault, F., Ren, Z., & Razek, A. (1990). "Calculation of 3d eddy current problems by a hybrid T-Ω method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26(2), pp. 478-481.
 [13] Hollaus, K., & Bíró, O. (2005). "Comparison of tetrahedral edge finite-elements using different potential formulations," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41(5), pp. 1676-1679.
 [14] Nakata, T., N. Takahashi, K. Fujiwara, T. I. (1990). "Effects of permeability of magnetic materials on errors of the T-Omega," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26(2), pp. 698-701.
 [15] Nakata, T., Takahashi, N., Fujiwara, K., Imai, T., & Muramatsu, K. (1991). "Comparison of various methods of analysis and finite elements in 3-d magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 27(5), pp. 4073-4076.
 [16] Nakata, T., Takahashi, N., Fujiwara, K., & Okada, Y. (1988). "Improvements of the T-Omega method for 3-D eddy current analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24(1), pp. 94-97.
 [17] Nakata, T., Takahashi, N., Fujiwara, K., & Shiraki, Y. (1990). "Comparison of different finite elements for 3-d eddy current analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26(2), pp. 434-437.
 [18] Preston, T. W., & Reece, A. B. J. (1982). "Solution of 3-dimensional eddy current problems: the T-Ω method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 18(2), pp. 486-491.
 [19] Ren, Z. (2002). "T-Ω formulation for eddy-current problems in multiply connected regions," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38(2), pp. 557-560.
 [20] Ren, Z., & Ida, N. (2000). "Solving 3D eddy current problems using second order nodal and edge elements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 746-750.
 [21] Ren, Z., & Razek, A. (1996). "Computation of 3-D electromagnetic field using differential forms based elements and dual formulations," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 9(1-2), pp. 81-98.
 [22] Ren, Z., & Razek, A. (2000). "Comparison of some 3D eddy current formulations in dual systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36(1), pp. 751-755.
 [23] Webb, J. P., & Forghani, B. (1993). "Hierarchal scalar and vector tetrahedra," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29(2), pp. 1495-1498.
 [24] Biro, O., Preis, K., Vrisk, G., Richter, K. R., & Tícar, I. (1993). "Computation of 3-D magnetostatic fields using a reduced scalar

- potential,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29(2), pp. 1329-1332.
- [25] Kikuchi, F. (1989). “Mixed formulations for finite element analysis of magnetostatic and electrostatic problems,” *Japan Journal of Applied Mathematics*, vol. 6(2), pp. 209-221.
- [26] Zhao, Y., & Fu, W. N. (2017b). “A novel Coulomb-gauged magnetic vector potential formulation for 3-D eddy-current field analysis using edge elements,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53(6), pp. 2-5.
- [27] Tang, Z., Zhao, Y., & Ren, Z. (2019). “Auto-gauging of vector potential by parallel sparse direct solvers - numerical observations,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55(6), pp. 1-5.

V. BIOGRAFÍA



Díaz Chacón Juan Mauricio nació en Torreón, Coah., México en 1983. Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico en 2006 por parte del Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coah., México, y los grados de Maestro y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Ingeniería de Potencia, en 2010 y 2013, respectivamente, por parte de la misma Institución. Él actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B. C., México. Sus áreas principales de interés son la aplicación de técnicas numéricas computacionales en el modelado y análisis de máquinas eléctricas, especialmente transformadores. El Dr. Díaz cuenta con el perfil deseable PRODEP.



Beltrán Pérez José Ángel nació en Guaymas, Sonora, México en 1996. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en 2019 por parte de la Universidad Autónoma de Baja California en la ciudad de Mexicali, B. C., México. Él actualmente cursa la maestría en Ciencias de la Ingeniería en la misma institución. Sus áreas de interés son el diseño de instalaciones eléctricas en baja tensión, el modelado numérico de máquinas eléctricas y el desarrollo de software con paralelismo en lenguaje de programación C++.



Amaro Hernández César nació en Mexicali, B. C., México en 1965. Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Electricista por parte de la Universidad Autónoma de Baja California en 1989 en la ciudad de Mexicali, B. C., México. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Electrónica en el área de instrumentación y control en 2002 y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el área de instrumentación y metrología en 2009, ambos dentro de la mencionada Institución. Él actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Sus áreas de interés son el análisis de circuitos eléctricos, instrumentación y control, y la adquisición y procesamiento de datos. El Dr. Amaro cuenta con el perfil deseable PRODEP.



Navarro Valle Alberto nació en Culiacán, Sinaloa, México en 1963. Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Electricista en 1986 por parte de la Universidad Autónoma de Baja California en la ciudad de Mexicali, B. C., México. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en Procesos Industriales, en 2008, por parte de la misma Institución, y el grado de Doctor en Educación, en 2015, por parte del Centro Universitario de Tijuana, en Mexicali, B. C., México. Él actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B. C., México. Sus áreas principales de interés son los procesos industriales aplicados a la ingeniería eléctrica y el desarrollo en los estudiantes de competencias profesionales y académicas. El Dr. Navarro cuenta con el perfil deseable PRODEP.



Rosales Escobedo Pedro Francisco, nació en Ensenada, B.C., México en 1985. Obtuvo el grado de Ingeniero Eléctrico por parte de la Universidad Autónoma de Baja California, en Mexicali, B.C., México en 2007. Posteriormente obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería por parte del Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Baja California, en Mexicali B. C., México en 2014. Él actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo y Coordinador de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Cuenta con más de 10 años de experiencia industrial en las áreas de energías renovables, sistemas de generación eólica e instalaciones eléctricas. Sus áreas de interés son las energías renovables, eólica y Sistemas Eléctricos de Potencia. El Dr. Rosales es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, así como también es miembro del Consejo Técnico del EGEL en Ingeniería Eléctrica. El Dr. Rosales cuenta también con el perfil deseable PRODEP.