

Simulación electromagnética del encapsulado de un acelerómetro MOEMS para uso en transformadores

Daniel Rivera Rojo, José Mireles Jr. Garcia, Abimael Jiménez Pérez, Ángel Saucedo Carvajal

Electrical and Computer Engineering Department, Autonomous University of Juárez, Del Charro 450, Juárez, Chihuahua, México

Resumen: El monitoreo y diagnóstico de transformadores de potencia es fundamental para garantizar la confiabilidad de los sistemas eléctricos. Se han desarrollado tecnologías que emplean sensores y dispositivos ópticos como solución para aplicaciones de potencia. En este trabajo se presenta un estudio del comportamiento electromagnético del encapsulado de un acelerómetro basado en un sistema micro-opto-electro-mecánico (MOEMS), bajo la influencia de un campo magnético externo generado por un transformador. El desempeño se evaluó mediante simulaciones bidimensionales en ANSYS Maxwell, comparando dos materiales: cobre (Cu) y alúmina (Al_2O_3). El modelo incluyó la simulación de un transformador con una bobina de 80 espiras, corriente de 20 A y frecuencia de 60 Hz. En el encapsulado de cobre, la exposición al campo magnético del transformador generó una densidad de corriente de Eddy de 15.76 A/m^2 y un campo magnético secundario de $0.2 \mu\text{T}$. Con estos parámetros, se cuantificaron la potencia disipada por efecto Joule, la fuerza de Lorentz y la aceleración asociada, obteniéndose valores considerablemente bajos. En contraste, el encapsulado de alúmina no presentó corrientes inducidas ni campos secundarios, lo que indica una interacción electromagnética no apreciable.

Palabras clave: encapsulado, simulación bidimensional, ANSYS Maxwell, alúmina, cobre.

1. Introducción

El monitoreo y el diagnóstico de los transformadores de potencia constituyen actividades fundamentales para garantizar la confiabilidad y la continuidad operativa de los sistemas eléctricos modernos. En las últimas décadas, se han desarrollado múltiples tecnologías de sensado para la medición de parámetros eléctricos, mecánicos y térmicos en estos equipos, entre las que destacan los sistemas inalámbricos, sensores de campo eléctrico basados en sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) y dispositivos ópticos diseñados para operar en entornos de alta tensión [1–3].

Entre estas alternativas, los sensores ópticos destacan por su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, su excelente aislamiento eléctrico y su alta sensibilidad. Diversos estudios han demostrado el potencial de los interferómetros de fibra óptica, las rejillas de Bragg en fibra y los sistemas heterodinos para la

medición precisa de desplazamientos, vibraciones y otros parámetros físicos en condiciones industriales exigentes [4–7]. Estas ventajas han impulsado el desarrollo de sensores basados en sistemas micro-opto-electro-mecánicos (MOEMS), que integran componentes ópticos y MEMS en dispositivos compactos y de alta precisión [8–9].

Los dispositivos MEMS requieren un encapsulado que proporcione protección mecánica, estabilidad ambiental y soporte estructural durante su operación. El encapsulado representa una de las etapas más críticas del proceso de fabricación, ya que influye directamente en la confiabilidad, el desempeño y la vida útil del sensor [10–11]. Recientes investigaciones han explorado el uso de materiales cerámicos y tecnologías HTCC (high-temperature co-fired ceramic) para el encapsulado de sensores MEMS, resaltando sus excelentes propiedades térmicas, estabilidad mecánica y compatibilidad con aplicaciones de alta exigencia [12–13].

Sin embargo, la instalación de estos sensores en transformadores de alta tensión los expone a intensos campos magnéticos alternos. En tales condiciones, los materiales conductores presentes en el encapsulado pueden generar corrientes parásitas (corrientes de Eddy), que pueden provocar pérdidas energéticas, calentamiento por efecto Joule y fuerzas de Lorentz capaces de alterar el comportamiento mecánico de la estructura. Por el contrario, los materiales cerámicos, al poseer baja conductividad eléctrica, minimizan significativamente estos efectos [14].

A pesar del creciente interés en sensores ópticos y tecnologías MOEMS para aplicaciones industriales, la literatura científica se ha centrado principalmente en aspectos de diseño, fabricación, confiabilidad y caracterización mecánica. Hasta el momento de la presente investigación, se ha observado una escasez de estudios que realicen evaluaciones de la influencia de los campos magnéticos intensos sobre el comportamiento electromagnético del material de encapsulado de sensores MEMS [15].

El presente trabajo aborda esta brecha mediante el análisis del comportamiento electromagnético del encapsulado de un acelerómetro MOEMS expuesto a campos magnéticos generados por transformadores de potencia. Se comparan dos materiales de encapsulado: cobre y alúmina (Al_2O_3). El estudio se realiza mediante simulaciones de elemento finito en dos dimensiones, utilizando el software ANSYS

Maxwell, con el fin de evaluar la distribución del campo magnético, las corrientes de Eddy inducidas, la potencia disipada por efecto Joule y las fuerzas de Lorentz en cada configuración.

2. Metodología

2.1 Principios del método de simulación

El software ANSYS Maxwell [16] transforma las ecuaciones diferenciales de Maxwell, que describen el comportamiento del campo electromagnético, en un sistema de ecuaciones algebraicas que puede resolverse numéricamente. El sistema de las Ecuaciones de Maxwell, expresadas en unidades del sistema internacional son [17]:

Ley de Ampère

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

Ley de Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Ley de Gauss para campo eléctrico

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Ley de Gauss para magnetismo

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

donde $\mathbf{B}$ es el campo magnético en Teslas (T), μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío en Tm/A, $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente en A/m², ϵ_0 es la permitividad del vacío en F/m, $\mathbf{E}$ es el campo eléctrico en N/C, t es el tiempo en s y ρ es la densidad de carga volumétrica en C/m³.

Primeramente, se define una región finita del espacio y se realiza su discretización, dividiendo la geometría bidimensional del modelo en pequeños triángulos denominados elementos finitos. Esto crea una malla donde cada elemento está conectado a sus vecinos mediante puntos llamados nodos. Posteriormente, las ecuaciones de Maxwell se aproximan mediante interpolación en cada elemento finito. Esto permite expresar el campo electromagnético desconocido

en términos de valores nodales. Finalmente, cada ecuación diferencial se convierte en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales para cada elemento finito formando un sistema matricial de la forma:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (5)$$

donde $\mathbf{K}$ es la matriz de coeficientes que depende de las propiedades y de la geometría del material, $\mathbf{u}$ es el vector de incógnitas que representa los valores del campo magnético en los nodos y $\mathbf{f}$ es un vector que contiene las fuentes del campo como ρ y $\mathbf{J}$. En la Ecuación (5), ANSYS Maxwell incorpora las condiciones de frontera apropiadas, como condiciones Neumann que dejan la matriz sin cambios o condiciones de Dirichlet que eliminan filas y columnas de nodos de frontera donde ya se conocen los componentes de la solución. Además, se definen las condiciones iniciales, las cuales son necesarias para problemas transitorios o dependientes del tiempo.

Una vez ensamblado el sistema de ecuaciones lineales, ANSYS Maxwell lo resuelve utilizando métodos matriciales como descomposición LU o Cholesky [18]. Después de obtener los valores nodales del campo magnético, el software calcula otras magnitudes importantes como el campo eléctrico, la fuerza de Lorentz, el torque o pérdida por corrientes de Eddy.

Para analizar la interacción entre el encapsulado y el campo magnético $\mathbf{B}$, es necesario considerar dos relaciones físicas fundamentales. La primera es la fuerza de Lorentz que es generada por corrientes inducidas en presencia de un campo magnético alternante, la cual está definida como [19]:

$$\mathbf{F} = \int (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (6)$$

donde dV es el elemento infinitesimal de volumen. La segunda es la potencia disipada por efecto Joule (calentamiento) debido a corrientes de Eddy definida por [19]:

$$P = \int (\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) dV = \int \left(\frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} \right) dV \quad (7)$$

la permeabilidad magnética relativa del aire y del aceite utilizado en un transformador es la misma [20]. La Figura 3(b) muestra un acercamiento al modelo bidimensional del encapsulado de la Figura 1(a). Debido a la limitación de 2000 triángulos y con el objetivo de minimizar el costo computacional, no se desarrolló un modelo tridimensional. Sin embargo, se preservan las características geométricas esenciales para el análisis de la interacción entre el campo magnético y el encapsulado. El volumen total del encapsulado fue de $1.52 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, el cual fue calculado con las dimensiones de la Figura 1.

Se evaluaron dos configuraciones de encapsulado. La primera corresponde a la estructura original en cobre, utilizada como referencia debido a su elevada conductividad eléctrica y su susceptibilidad a la generación de corrientes de Eddy. La segunda corresponde a una estructura basada en alúmina, material ampliamente utilizado en aplicaciones electrónicas debido a sus propiedades dieléctricas y elevada estabilidad térmica [12, 13]. Las características electromagnéticas de cada material fueron asignadas conforme se ilustra en el diagrama de la Figura 2, haciendo uso de la base de datos integrada en ANSYS Maxwell.

2.3 Parámetros de simulación

Para reproducir condiciones representativas de operación en transformadores de potencia, el campo magnético fue generado con una bobina excitada por corriente alterna (ver Figura 3). Como se muestra en la Figura 2, se estableció una corriente de 20 A, una frecuencia de operación de 60 Hz y un devanado compuesto por 80 espiras. El encapsulado fue ubicado a una distancia de 35 cm respecto a la fuente de excitación. Los parámetros de operación fueron optimizados mediante un proceso iterativo hasta alcanzar un valor aproximado del campo de 1.6 T. Este valor representa la condición típica, previa a la saturación magnética del acero al silicio utilizado en transformadores [21, 22]. La generación del campo magnético se fundamenta en la Ley de Ampère (Ecuación 1), mientras que la inducción de corrientes parásitas en materiales conductores se describe mediante la Ley de Faraday (Ecuación 2).

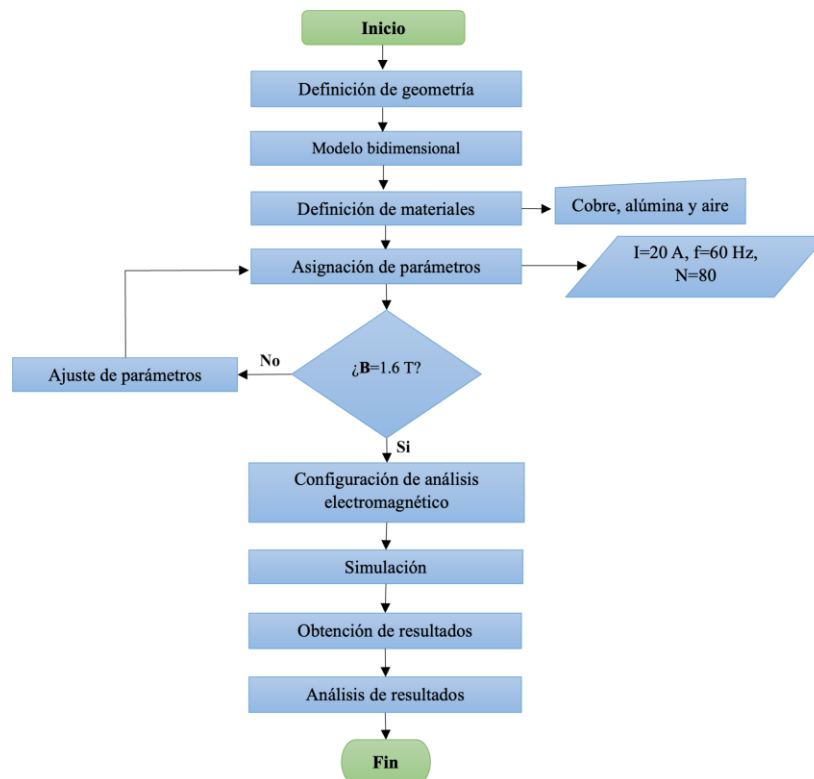


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de simulación del encapsulado en ANSYS.

Para representar adecuadamente un entorno abierto, se empleó una condición de contorno tipo Balloon en las fronteras externas del dominio de simulación [23] Esta condición permite que las líneas de flujo magnético se propaguen naturalmente fuera de la región analizada, reduciendo efectos artificiales asociados a fronteras finitas. Para equilibrar la precisión y eficiencia de la solución, el modelo se subdividió en regiones mediante una malla adaptativa automática con refinamiento local en las regiones próximas a la bobina y al encapsulado como se observa en la Figura 4. La implementación de esta estrategia permitió una captura más precisa de los gradientes del campo y la distribución de corrientes inducidas. Asimismo, esta estrategia se alinea con el procedimiento descrito en [24], donde se utilizó refinamiento adaptativo basado en estimadores de error local. Este enfoque concentra la solución numérica en las regiones de mayor relevancia, evitando así un incremento innecesario en el número de elementos en todo el dominio.

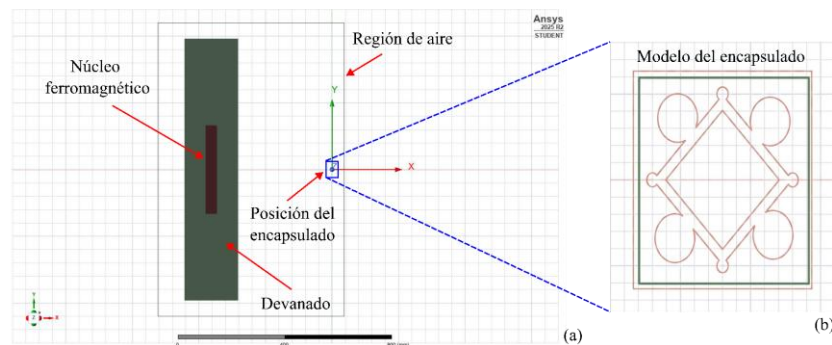


Figura 3. Modelo bidimensional empleado en la simulación de ANSYS Maxwell. (a) Modelo de la bobina de excitación (devanado y núcleo y región de aire); (b) Acercamiento al modelo del encapsulado.

Las simulaciones fueron realizadas utilizando el solucionador AC Magnetic (Eddy Current) [16]. Como resultado se obtuvieron los mapas de distribución del campo magnético y la densidad de corrientes de Eddy. Estos parámetros fueron empleados para comparar el desempeño de ambos encapsulados bajo condiciones idénticas de excitación electromagnética.

3. Resultados

En esta sección se presentan y discuten los principales resultados del estudio electromagnético de ambos encapsulados. La distribución del campo magnético mostró una concentración del flujo magnético en la región correspondiente al devanado y al núcleo magnético, comportamiento consistente con la configuración de excitación empleada. La Figura 5 muestra la distribución del campo cuando se utiliza el encapsulado de alúmina, para la cual se observa una intensidad aproximada de 1.642 T en la región de la bobina.

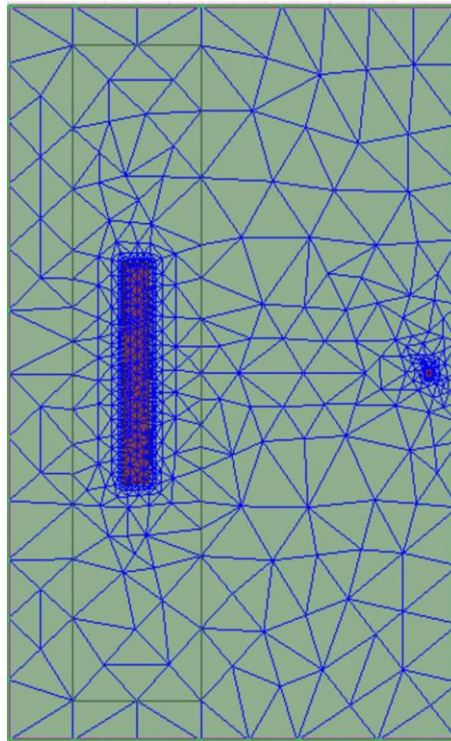


Figura 4. Estrategia de mallado para una discretización más fina en las regiones cercanas a la bobina y al encapsulado para capturar con mayor precisión los gradientes del campo electromagnético.

Cuando el encapsulado fue modelado con cobre, la distribución del campo magnético del transformador permaneció prácticamente sin cambios. Sin embargo, en el encapsulado de cobre se generó un campo magnético secundario, debido a las corrientes de Eddy, de baja magnitud y opuesto al campo magnético del transformador como se observa en la Figura 6.

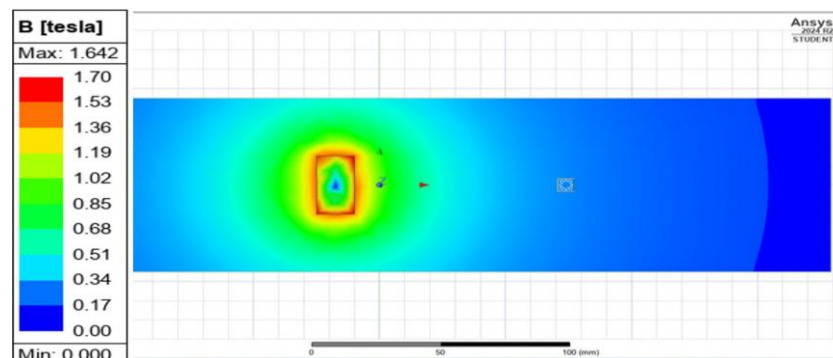


Figura 5. Distribución del campo magnético para el encapsulado de alúmina.

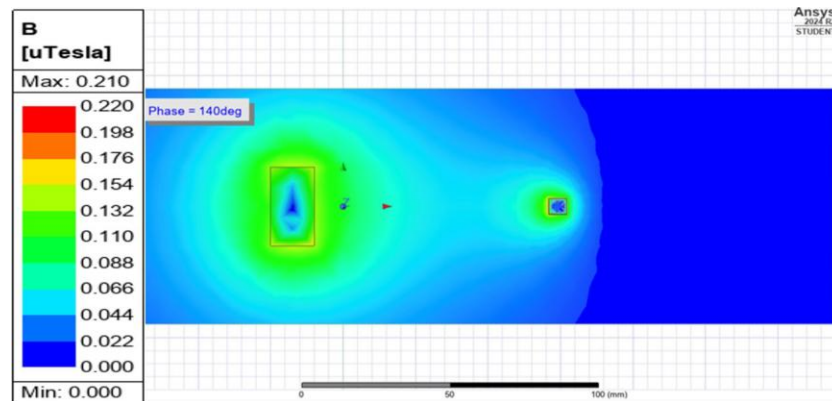


Figura 6. Distribución de B en el encapsulado de cobre.

En la Figura 7 se muestra la comparación entre los dos encapsulados donde es clara la generación del campo magnético secundario en el encapsulado de cobre a diferencia del encapsulado con alúmina, debido a que no se presentaron corrientes inducidas significativas, lo cual se atribuye a sus características dieléctricas. Estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura para materiales cerámicos utilizados en encapsulados de MEMS y MOEMS para aplicaciones en ambientes electromagnéticos exigentes [12].

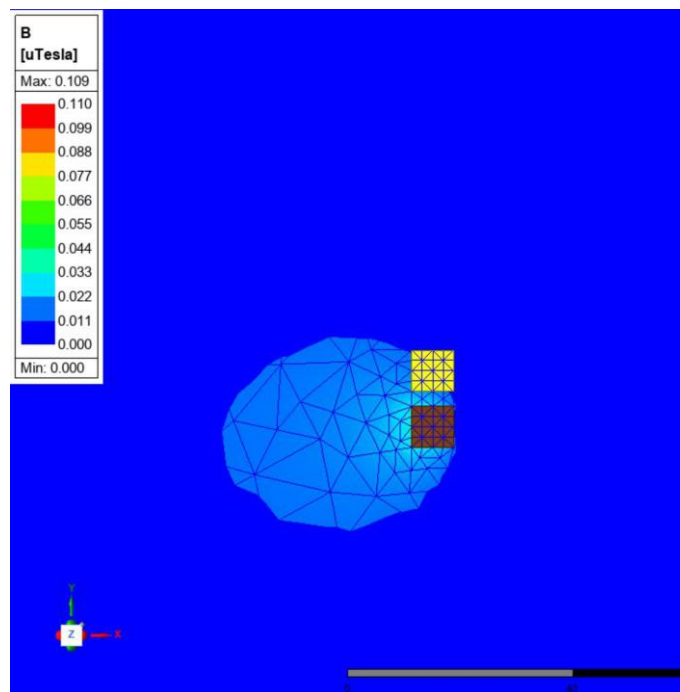


Figura 7. Comparación de la distribución del B en los dos encapsulados.

La alúmina ofrece excelentes propiedades para la miniaturización y una alta compatibilidad con procesos cerámicos de alta temperatura, tales como el HTCC. Sin embargo, su principal limitación radica en el bajo nivel de apantallamiento frente a interferencias electromagnéticas, por lo que se recomienda la incorporación de capas conductoras intermedias para alcanzar un mejor rendimiento en la atenuación de interferencias electromagnéticas [14].

La Figura 8 muestra la distribución de la densidad de corriente inducida para el encapsulado de cobre donde se observa un valor máximo de 15.76 A/m^2 , resultado consistente con la Ley de Lenz [19]. Esta propiedad se aprovecha, de manera benéfica, en el diseño de transistores de potencia mediante el uso de un encapsulado externo de cobre, el cual reduce drásticamente la radiación magnética del transistor gracias a la generación de corrientes de Eddy [25]. En la Tabla 1 se enlistan los principales parámetros obtenidos en la simulación del encapsulado de cobre.

Los resultados de las Figuras 5 a 8 se obtuvieron empleando la malla mostrada en la Figura 4, optimizada mediante refinamiento adaptativo y estimación del error. Este se definió a partir de dos indicadores: el error de energía, que cuantifica la variación local de energía, generada por los campos calculados, en cada elemento finito respecto a la iteración precedente; y el delta de energía, que mide el cambio en la energía total acumulada en el modelo con relación a la iteración anterior. El refinamiento adaptativo se prolongó hasta que la razón entre ambos errores alcanzó su valor mínimo de 4.89 %, en un lapso de 10 s y con una malla de 1,933 elementos, dentro del límite de 2,000 establecido en la versión estudiantil de ANSYS Maxwell.

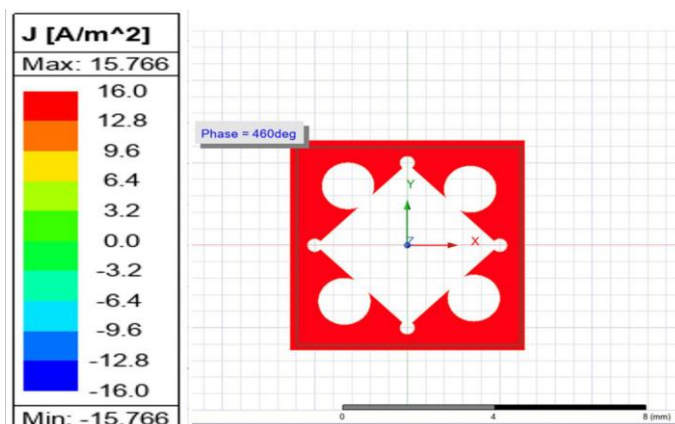


Figura 8. Mapa de color de la densidad de corriente inducida en el encapsulado de cobre.

Tabla 1. Resultados de simulación del encapsulado de cobre.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad de corriente inducida	$\mathbf{J}$	15.76	A/m^2
Magnitud del campo magnético en el encapsulado	$\mathbf{B}$	2.1×10^{-7}	T
Conductividad eléctrica del cobre	σ	5.8×10^7	S/m
Volumen del encapsulado	V	1.52×10^{-7}	m^3
Masa del encapsulado	m	1.36×10^{-3}	kg
Frecuencia de operación	f	60	Hz

Considerando únicamente la contribución de las componentes perpendiculares de los vectores involucrados en la Ecuación (6), la magnitud de la fuerza de Lorentz se calcula usando $F = JBV$. junto con los resultados de la Tabla 1. A partir de esta relación y utilizando los valores de la Tabla 1, se calculó la fuerza de Lorentz. Por otro lado, ANSYS determina $\mathbf{E}$ al resolver la Ecuación (2) y si la densidad de corriente es $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, entonces $\mathbf{E} = \mathbf{J}/\sigma$.

Al sustituir en la Ecuación (7) y suponiendo que las magnitudes son constantes en el volumen de integración, la integral se reduce a $P = \mathbf{J}^2 V / \sigma$. Esta expresión permitió determinar la potencia disipada por efecto Joule debido a las corrientes de Eddy. Finalmente, la magnitud de la aceleración teórica máxima se obtuvo mediante la segunda ley de Newton: $a = F/m$. En la Tabla 2 se muestran los valores calculados de los parámetros, los cuales son muy pequeños para el caso del encapsulado de cobre y nulos para el encapsulado de alúmina. El valor de P fue validado mediante la integración numérica de la densidad de pérdida volumétrica en W/m^3 dentro del volumen del encapsulado utilizando ANSYS.

Tabla 2. Parámetros electromagnéticos calculados para el encapsulado de cobre.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia disipada por corrientes de Eddy	6.5×10^{-13}	W
Fuerza de Lorentz	5×10^{-13}	N
Aceleración teórica máxima	3.7×10^{-10}	m/s^2

Bajo las condiciones de simulación establecidas, los efectos térmicos derivados de la potencia disipada, así como los efectos mecánicos asociados a las corrientes de Eddy, pueden considerarse prácticamente insignificantes. Estos hallazgos son consistentes con los resultados presentados en [26], donde se establece que para una frecuencia de 100 Hz la potencia disipada por efecto Joule es despreciable en tubos de cobre ubicados en proximidad a motores eléctricos. No obstante, para una frecuencia de 1000 Hz, la potencia disipada alcanzó los 10 W. Cabe destacar que existe una relación entre la frecuencia, el espesor del material conductor y la intensidad del campo magnético, la cual determinará la magnitud del efecto de las corrientes de Eddy en un material conductor dado.

De acuerdo con los resultados obtenidos, resulta evidente que la principal diferencia entre ambos materiales, desde la perspectiva de la compatibilidad electromagnética, se manifiesta en la generación de campos magnéticos secundarios originados por las corrientes de Eddy. Sin embargo, no se debe a la generación de calor por disipación de potencia ni a la inducción de movimientos mecánicos significativos. En consecuencia, el material de alúmina constituye una alternativa viable, debido a su constante dieléctrica y corrientes de Eddy inexistentes, para el encapsulado de un sensor MOEMS en la detección de vibraciones en transformadores de potencia. Sin embargo, el encapsulado de cobre presentó valores tan reducidos de potencia disipada, fuerza de Lorentz y aceleración que no generan efectos térmicos ni fuerzas mecánicas apreciables.

4. Conclusiones

En el presente estudio, mediante simulaciones en ANSYS Maxwell, se comparó el comportamiento de encapsulados de cobre y alúmina para un acelerómetro MOEMS bajo la influencia de un campo magnético externo generado por un transformador de potencia. Los resultados muestran que el encapsulado de cobre interactúa con el campo magnético del transformador, generando corrientes de Eddy y un campo magnético secundario. En cambio, el encapsulado de alúmina no presenta corrientes inducidas. Esto se debe a la baja conductividad eléctrica y las propiedades dieléctricas que lo caracterizan, lo que sugiere una ventaja bajo las condiciones simuladas en entornos de campos magnéticos intensos.

La evaluación analítica de los efectos inducidos en el cobre arroja valores del orden de 6.5×10^{-13} W, 5×10^{-13} N y 3.7×10^{-10} m/s² para la potencia disipada

por efecto Joule, fuerza de Lorentz y aceleración máxima, respectivamente. Dichas magnitudes indican que, pese a existir interacción magnética, los efectos térmicos y mecánicos resultan despreciables bajo las condiciones estudiadas.

Como trabajo futuro, se recomiendan simulaciones tridimensionales, considerar la tapa del encapsulado en el modelo e integrar fenómenos electromagnéticos, térmicos y mecánicos en diferentes materiales y configuraciones geométricas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHT) a través del proyecto MADTEC-2025-M-721 de Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado. Asimismo, el apoyo recibido a través de la beca de posgrado (6535c48a0ca83a5621ef7af6).

Referencias

1. S. Xu et al., "Transformer monitoring with electromagnetic energy transmission and wireless Sensing," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1606, Mar. 2024, doi:10.3390/s24051606
2. X. Zhu et al., "Non-invasive voltage measurement device based on MEMS electric field sensor and applications," *Electronics*, vol. 14, no. 11, p. 2140, May 2025, doi:10.3390/electronics14112140
3. M. B. Asl, I. Fofana, and F. Meghnefi, "Review of various sensor technologies in monitoring the condition of power transformers," *Energies*, vol. 17, no. 14, p. 3533, Jul. 2024, doi:10.3390/en17143533
4. H. C. Seat, E. Ouisse, E. Morteau, and V. Métivier, "Vibration displacement measurements based on a polarimetric extrinsic fibre Fabry Perot interferometer," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 710–716, Apr. 2003, doi:10.1088/0957-0233/14/6/302
5. M. Guo, H.-Y. Zhou, C. Shi, Y.-B. Li, Q. Zhang, and C.-R. Li, "Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 2788–2795, Apr. 2018, doi:10.1109/jsen.2018.2803056
6. S. Korposh, S. W. James, S. Lee, and R. P. Tatam, "Tapered optical fibre sensors: current trends and future Perspectives," *Sensors*, vol. 19, no. 10, p. 2294, May 2019, doi:10.3390/s19102294
7. T. D. Nguyen, M. Higuchi, T. T. Vu, D. Wei, and M. Aketagawa, "10-pm-order mechanical displacement measurements using heterodyne interferometry," *Applied Optics*, vol. 59, no. 27, p. 8478, Sep. 2020, doi:10.1364/ao.400682
8. J. Mireles, Á. Saucedo, A. J. Pérez, M. Ramos, and R. González-Landaeta, "Design and development of a MOEMS accelerometer using SOI technology," *Micromachines*, vol. 14, no. 1, p. 231, Jan. 2023, doi:10.3390/mi14010231
9. S. Holmström, U. Baran, and H. Ürey, "MEMS laser scanners: A review," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 259–275, Apr. 2014, doi:10.1109/jmems.2013.2295470

10. H. van Heeren, A. El-Fataty, L. Paschalidou, et al., "Industrial packaging and assembly infrastructure for MOEMS," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 4, no. 4, p. 041701, Oct. 2005, doi:10.1117/1.2121367
11. J. Kähler, A. Stranz, A. Waag, et al., "Packaging of MEMS and MOEMS for harsh environments," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 11, no. 2, p. 021202, May 2012, doi:10.1117/1.JMM.11.2.021202
12. A. Schubring and Y. Fujita, "Ceramic package solutions for MEMS sensors," 2007 32nd *IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, San Jose, CA, USA, 2007, pp. 268-272, doi:10.1109/IEMT.2007.4417075
13. K. Murthy, "HTCC approach for packaging MEMS accelerometer sensors and associated ROIC," *International Journal of Advanced Research*, vol. 6, no. 7, pp. 537-552, 2018, doi:10.21474/ijar01/7395
14. G. Sang et al., "Ni@CNTs/Al₂O₃ ceramic composites with Interfacial solder strengthen the segregated network for high toughness and excellent electromagnetic interference shielding," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 14, no. 3, pp. 4443-4455, Jan. 2022, doi:10.1021/acsami.1c21630
15. J. Gao, J. Xia, Y. Lu et al., "Current research status of micro-electro-mechanical systems (MEMS) packaging process equipment," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2026, doi:10.1007/s12541-026-01501-z
16. ANSYS Inc., "ANSYS maxwell getting started," Release 2020 R2, 2020. [Online]. Available: https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2021/07/MAXW_GS_2020R2_EN_LE01.pdf
17. F. Assous and I. Raichik, "A finite element method to solve the Maxwell equations in three-dimensional singular geometry," in 2023 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Prague, Czech Republic, 2023, pp. 263-271, doi:10.1109/PIERS59004.2023.10221413
18. P. Božek, Y. Nikitin, and T. Krenický, "Methods, models, algorithms for diagnostics of mechatronic systems," *Diagnostics of Mechatronic Systems, Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 345, Springer, Cham, 2021, doi:10.1007/978-3-030-67055-9_2
19. D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 5th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
20. Z. Li, T. Li, Y. Guo, and S. Wang, "Research on electromagnetic-thermal-mechanical multiphysics coupling simulation analysis of converter transformers," *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, Apr. 2026
21. A. E. Fitzgerald, *Electric machinery*, 5th ed. London: McGraw Hill, 1992
22. I. Daut, S. Hasan, and S. Taib, "Magnetizing current, harmonic content and power factor as the indicators of transformer core saturation," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 1, no. 4, pp. 304-307, Jan. 2013, doi:10.7763/jocet.2013.v1.69
23. ANSYS Inc., "Balloon," ANSYS Help, 2024 [Online]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v242/en/Subsystems/Maxwell/Content/Balloon.htm>
24. P. González-Casanova, J. A. Muñoz-Gómez, and G. Rodríguez-Gómez, "Node adaptive domain decomposition method by radial basis functions," *Numer. Methods Partial Differential Eq.*, vol. 25, pp. 1482-1501, 2009, doi:10.1002/num.20410

- 25.D. Chen, S. Shao, S. Ding, H. Zhao, Y. Du, and R. Zhang, "Using eddy current effect to mitigate near-field magnetic radiation in SiC-MOSFETs half-bridge," *Electronics*, vol. 15, no. 11, Art. no. 2329, 2026, doi:10.3390/electronics15112329
- 26.M. N. F. Ibrahim and P. Sergeant, "Prediction of eddy current losses in cooling tubes of direct cooled windings in electric machines," *Mathematics*, vol. 7, no. 11, Art. no. 1096, 2019, doi:10.3390/math7111096