

Sinergias entre topologías novedosas, manufactura aditiva y nuevos materiales en el diseño óptimo de máquinas eléctricas

Synergies between novel topologies, additive manufacturing, and new materials in the optimal design of electric machines

Dr. C Maykop Pérez Martínez*

<maykoperez@udec.cl>

<https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

M. Sc. Luis René Brizuela Bringuez**

<luisbrizuela2025@udec.cl>

<https://orcid.org/0009-0008-8852-1017>

Ing. M. Sc. Josnier Ramos Guardarrama***

<josnier@electrica.cujae.edu.cu>

<https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

*, ** Universidad de Concepción, Chile y *** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sistemática de los avances más relevantes en tres áreas fundamentales: (i) las topologías novedosas de motores eléctricos, con foco en motores industriales como los de inducción, reluctancia sincrónica e imanes permanentes; (ii) la aplicación de la manufactura aditiva en la construcción de componentes magnéticos, bobinados y sistemas de enfriamiento integrados; y (iii) el desarrollo de nuevos materiales magnéticos, aislantes y térmicos para mejorar la eficiencia, densidad de potencia y fiabilidad, en trabajos publicados entre 2019 y 2025, analizando tendencias, resultados experimentales, limitaciones y perspectivas futuras. Se discuten las oportunidades de integrar estas tres líneas de investigación para lograr diseños de máquinas eléctricas más sustentables y de alto desempeño.

Palabras claves: motores eléctricos, manufactura aditiva, eficiencia energética.

ABSTRACT

This article presents a systematic literature review of the most relevant advances in three fundamental areas: (i) novel topologies of electric motors, focusing on industrial electric motors such as induction motors, synchronous reluctance motors, and permanent magnet motors; (ii) the application of additive manufacturing in the construction of magnetic components, windings, and integrated cooling systems; and (iii) the development and application of new magnetic, insulating, and thermal materials that enhance the efficiency, power density, and reliability of electric motors, published between 2019 and 2025, analyzing trends, experimental results, limitations, and future perspectives. The opportunities for integrating these three lines of research towards a more sustainable and high-performance design in electric machines are discussed.

Keywords: electric motors, additive manufacturing, energy efficiency.



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo de nuevas técnicas aplicadas al diseño, construcción y prueba de motores eléctricos ha experimentado un notable crecimiento, impulsado principalmente por la transición hacia la electromovilidad, la aviación eléctrica y la automatización industrial para exigir ahora máquinas con prestaciones muy superiores: mayor densidad de par y potencia, eficiencia optimizada en un rango operativo amplio y una reducción significativa de peso y volumen, sin comprometer su fiabilidad ^{1, 2}.

En este escenario, las máquinas eléctricas, que son el motor de la sociedad moderna, han adquirido un papel determinante. Como señalan los autores de las referencias ^{3, 4}, las máquinas eléctricas son responsables de la mayor parte del consumo y la producción de energía eléctrica, por lo que la demanda de diseños más eficientes, compactos y confiables es cada vez más necesario. Esta exigencia es particularmente crítica en aplicaciones de alto rendimiento, como los vehículos eléctricos, la propulsión marina y la aeronáutica, donde los motores deben operar de forma fiable en entornos con altas temperaturas y vibraciones, manteniéndose dentro de límites estrictos de peso y volumen.

En este sentido, se afirma en la obra investigativa de la referencia ^{5, 6, 7} que, los métodos de fabricación convencionales, aunque bien establecidos, presentan limitaciones inherentes para satisfacer estas demandas. La producción tradicional de componentes, como los núcleos magnéticos mediante apilamiento de laminaciones, implica procesos de corte y estampado que generan un alto desperdicio de material, introducen anisotropías y elevan los costos, especialmente para geometrías delgadas o complejas. Históricamente, estas restricciones han limitado la filosofía de diseño. Además, integrar sistemas de enfriamiento complejos y componentes con propiedades diversas (magnéticos, electrónicos, estructurales) representa un reto a considerar para fabricar máquinas eléctricas completamente funcionales.

En este escenario surge la necesidad de profundizar: ¿cómo pueden las sinergias entre topologías novedosas, la manufactura aditiva (MA) y el desarrollo de nuevos materiales superar las barreras de los métodos convencionales para desarrollar la próxima generación de máquinas eléctricas de alto rendimiento?

En correspondencia se plantea por las referencias ^{8, 9, 10, 11, 12, 13, 14}, la manufactura aditiva emerge como una tecnología que ofrece libertad de diseño, permitiendo fabricar componentes con geometrías complejas y adaptar las propiedades de los materiales a nivel microestructural. Esta

capacidad es fundamental para crear topologías innovadoras que optimicen el rendimiento, reduzcan el peso y mejoren la gestión térmica de formas antes inimaginables.

La novedad de esta revisión radica en su perspectiva holística y multidisciplinaria. En lugar de centrarse en mejoras incrementales en componentes individuales, se analiza cómo la convergencia de estas tres áreas de investigación puede redefinir radicalmente el diseño y la fabricación de máquinas eléctricas. Por ejemplo, se asegura^{15, 16}, la MA no solo permite fabricar componentes con propiedades mejoradas, sino que también facilita la implementación de topologías optimizadas, mientras que los nuevos materiales ofrecen características electromagnéticas y térmicas superiores.

El objetivo principal de este artículo es realizar un análisis crítico y sistemático de los avances en topologías novedosas, manufactura aditiva y nuevos materiales, evaluando su impacto individual y colectivo en el desempeño de los tres tipos de motores industriales más utilizados: de inducción (MI), de reluctancia sincrónica (SyRM) y de imanes permanentes (IPM). Como objetivo secundario, se busca identificar las limitaciones actuales y proponer futuras líneas de investigación que aceleren esta transición. Constituye un material bibliográfico para la educación tecnológica de los estudiantes de ramas técnicas.

DESARROLLO

Esta revisión se llevó a cabo siguiendo una metodología sistemática para garantizar exhaustividad, relevancia y objetividad. Se centró en identificar, evaluar y sintetizar la literatura científica más significativa publicada entre los años 2019 y 2025, abarcando artículos de revistas indexadas y actas de conferencias internacionales destacadas.

El proceso se dividió en cuatro fases principales:

1. **Planificación y definición de criterios:** Se establecieron preguntas guía: ¿Cómo han evolucionado las topologías de MI, SyRM y IPM? ¿Qué aplicaciones de la MA demuestran mayor impacto en el rendimiento? ¿Qué nuevos materiales ofrecen las mejoras más prometedoras? ¿Existe una sinergia demostrada entre estas tres áreas?
2. **Búsqueda y recopilación:** La búsqueda se realizó en bases de datos principales como Scopus, Web of Science e IEEE Xplore. La estrategia se estructuró en torno a tres ejes temáticos interconectados:
 - **Topologías novedosas:** Términos clave: "novel motor topologies", "electric machine design optimization", "multiphase motors", "axial-flux motors", "switched reluctance motors (SRM)", "interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM)", "induction motors (IM)", "brushless

DC motors (BLDC)", "segmented stator/rotor", "variable flux", "hybrid excitation". El objetivo fue comprender cómo las modificaciones geométricas impactan el rendimiento electromagnético y mecánico.

- **Manufactura aditiva:** Términos clave: "additive manufacturing electric motors", "3D printing magnetic components", "additively manufactured windings", "AM cooling systems", "laser powder bed fusion (L-PBF)", "selective laser melting (SLM)", "binder jetting", "fused deposition modeling (FDM)", "multi-material printing". Buscamos evidencia de cómo la MA facilita geometrías complejas, reduce desperdicios y permite prototipado rápido.
 - **Nuevos materiales:** Términos clave: "soft magnetic materials (SMM)", "hard magnetic materials", "soft magnetic composites (SMC)", "high-silicon steel", "rare-earth-free magnets", "thermal management materials", "electrically insulating materials", "phase change materials (PCM)", "carbon nanotubes (CNT)". La búsqueda se enfocó en materiales con propiedades mejoradas para alta frecuencia, reducción de pérdidas y disipación de calor.
3. **Selección y evaluación:** Los resultados se filtraron mediante criterios de inclusión/exclusión. Se incluyeron publicaciones en inglés con contribuciones originales en diseño, materiales o fabricación para máquinas eléctricas rotativas. Se excluyeron artículos que solo abordaban convertidores de potencia, sistemas de control no ligados al diseño de la máquina, o motores lineales no relacionados. Los artículos se evaluaron críticamente basados en su originalidad, rigor metodológico y relevancia.
 4. **Síntesis y mapeo:** La información cualitativa y cuantitativa de los artículos seleccionados fue extraída y categorizada en las tres áreas temáticas. Este proceso permitió identificar tendencias, relaciones y oportunidad de investigación.

Resultados de la revisión bibliográfica

Como ya se ha mencionado y de acuerdo con los autores^{17, 18 (17,18)}, el diseño de máquinas eléctricas (ME) está experimentando una transformación impulsada por la necesidad de lograr mayor eficiencia, densidad de potencia y fiabilidad, especialmente en el contexto de la electrificación del transporte y las aplicaciones industriales. En esta sección, analizamos los hallazgos más importantes de la revisión, examinando cómo los avances en topologías, manufactura aditiva (MA) y nuevos materiales se interrelacionan y afectan el desarrollo de los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), motores de reluctancia conmutada (SRM) y motores de inducción (MI).

Avances generales y relevancia

De acuerdo con^{19, 20}, los esfuerzos de investigación se centran cada vez más en optimizar el rendimiento de las ME mediante un diseño multidisciplinar y una optimización a nivel de sistema. Esto implica considerar simultáneamente aspectos electromagnéticos, térmicos y mecánicos, así como la integración con la electrónica de potencia y los sistemas de control^{21, 22}. La alta densidad de potencia, la eficiencia mejorada y la reducción del ruido son métricas importantes que, además de contribuir a un rendimiento superior, permiten una mayor sostenibilidad y un menor impacto ambiental. La integración de nuevas tecnologías de fabricación, materiales innovadores y topologías avanzadas facilita la creación de soluciones más compactas y ligeras que resulta en un uso más eficiente de los recursos.

La influencia de la manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) ha revolucionado la fabricación de componentes al permitir producirlos directamente desde un modelo digital (CAD), sin necesidad de herramientas ni moldes, y crear geometrías complejas antes imposibles. Esto ha elevado la MA de ser una tecnología para prototipado rápido a convertirse en una solución de fabricación completa, lo cual se destaca por reducir el desperdicio de material y ofrecer una adecuada flexibilidad de diseño^(6,13,14).

En el contexto de las máquinas eléctricas, la MA ofrece amplio espectro de posibilidades, como, por ejemplo:

- **Núcleos magnéticos a medida:** Permite crear microestructuras y propiedades personalizadas. Un ejemplo son las aleaciones de Fe-Si (como FeSi6.5 o FeSi6.7), que resultan frágiles y difíciles de procesar con métodos tradicionales. Además, posibilita controlar su resistividad eléctrica y propiedades magnéticas para minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault^{7, 23, 24, 25}.
- **Bobinados optimizados:** Facilita la creación de bobinados con geometrías complejas que minimizan las pérdidas por corriente alterna (AC) y mejoran significativamente la disipación térmica⁽¹⁰⁾.
- **Imanes permanentes complejos:** Permite la fabricación de imanes con formas y geometrías optimizadas, aunque aún se requiere magnetización postfabricación^(7, 23).
- **Gestión térmica integrada:** Posibilita el diseño e implementación de sistemas avanzados, como disipadores de calor e intercambiadores integrados directamente en la estructura del motor. Esto incluye el uso de canales de enfriamiento integrados, materiales de cambio de

fase (PCM) y guías de calor fabricadas aditivamente para optimizar la transferencia de calor (12, 26).

Es importante señalar que la MA aún enfrenta retos para su producción a gran escala, como la velocidad de fabricación, la capacidad de trabajar con múltiples materiales de forma simultánea y la necesidad de postprocesamiento para alcanzar la calidad y densidad requeridas. La caracterización de los materiales fabricados aditivamente es fundamental, ya que sus propiedades son altamente sensibles a parámetros del proceso como la temperatura y la velocidad de impresión. Un control riguroso y pruebas exhaustivas son esenciales para garantizar la consistencia y fiabilidad de los componentes, lo que a su vez abre oportunidades para innovar en el diseño de motores.

El impacto de los nuevos materiales

El desarrollo de materiales avanzados es fundamental para la próxima generación de máquinas eléctricas. Estos materiales ofrecen propiedades mejoradas, como mayor conductividad eléctrica y térmica. También permiten una reducción significativa en el peso y el tamaño de los componentes, aspecto fundamental para aplicaciones como los PMSM y SRM donde la eficiencia y la densidad de potencia son esenciales.

La investigación en materiales compuestos y nanomateriales está conduciendo a soluciones más robustas y duraderas, capaces de soportar condiciones operativas extremas. Su incorporación mejora el rendimiento y contribuye a la sostenibilidad al permitir motores más eficientes con menor impacto ambiental^{27, 28, 29}. Los avances más significativos se dan en:

- **Materiales magnéticos blandos:** Se emplean en los núcleos de las máquinas. Aleaciones de Fe-Si con alto contenido de silicio (como FeSi6.5) ofrecen propiedades magnéticas excepcionales, incluida una magnetostricción cercana a cero, pero su fragilidad las hace difíciles de fabricar tradicionalmente, un problema que la MA puede solucionar. Los compuestos magnéticos blandos (SMC) son prometedores para diseños con flujo 3D, gracias a su isotropía magnética y térmica, así como sus muy bajas pérdidas por Foucault. Los materiales amorfos y nanocristalinos también se investigan por su rendimiento a altas frecuencias^{18, 30, 31}.
- **Materiales magnéticos duros (Imanes Permanentes):** La reducción de la dependencia de tierras raras (REE) es un objetivo prioritario. Se exploran alternativas como imanes libres de REE y ferritas. La MA permite fabricar imanes con geometrías complejas, como los imanes de Nd-Fe-B unidos a polímeros (NdFeB-PPS) imprimibles en 3D^(21, 32).

- **Materiales aislantes y térmicos:** Imprescindibles para mantener la eficiencia, durabilidad y seguridad. Polímeros tradicionales como epoxis o siliconas suelen tener baja conductividad térmica. Los avances han llevado al desarrollo de polímeros con rellenos de alta conductividad como nitruro de boro (BN) o nanopulvos de diamante, que mejoran la disipación de calor sin comprometer la resistencia dieléctrica. Integrar estos materiales con diseños habilitados por MA permite soluciones de enfriamiento radicalmente más eficientes ^(11,19, 34, 33).

Crítica y comparación de tipos de motores eléctricos

Los avances en topologías, MA y nuevos materiales han influido de manera diferente en el desarrollo de los PMSM, SRM y MI.

Motores Síncronos de Imanes Permanentes (PMSM)

Los PMSM son la tecnología predominante en vehículos eléctricos debido a su alta densidad de potencia y eficiencia [27]. La investigación se ha centrado en optimizar la topología del rotor (configuraciones "V", "U") para mejorar el par, reducir pérdidas y evitar la desmagnetización. La introducción de ranuras o puentes magnéticos es una alternativa al sesgado tradicional para reducir la ondulación de par. Los motores de flujo axial (AFPM) con estatores sin ranuras y rotores con arreglo *Halbach* son ejemplos de topologías que maximizan la densidad de potencia ^(4,20, 34, 35).

La MA permite fabricar rotores con estructuras complejas que integran imanes con alta precisión espacial, ajustando la distribución del campo magnético para minimizar la ondulación de par y el par de arrastre o *cogging torque* en idioma inglés. También se ha demostrado la viabilidad de imprimir núcleos de estator de Fe-3Si, aunque esto puede introducir defectos y requerir postmecanizado ⁽²⁵⁾. La experimentación con compuestos de imanes y polímeros mejora las propiedades mecánicas y permite crear formas complejas que maximizan la densidad de flujo y reducen el peso. Paralelamente, los nuevos materiales aislantes y térmicos son fundamentales para disipar el calor eficientemente y mantener la vida útil del motor.

Motores de reluctancia conmutada (SRM)

Los SRM son conocidos por su fiabilidad, robustez y ausencia de imanes permanentes, lo que reduce la dependencia de las tierras raras. Sin embargo, sus principales desventajas son una menor densidad de potencia, mayor ondulación de par y ruido acústico ⁽¹³⁾.

Para reducir estos problemas, se han propuesto modificaciones topológicas como la optimización de la forma de los polos del rotor y estator, el uso de rotores segmentados, o una distribución no

uniforme del entrehierro. Los diseños de doble estator y excitación híbrida también se exploran para aumentar el par y reducir la ondulación ^{24, 35}.

La MA resulta fundamental para los SRM. Al no contener imanes en el rotor, se simplifica enormemente su fabricación y optimización topológica. Se ha demostrado que es viable fabricar y probar rotores de Fe-5.0%Si para SRM mediante MA, mostrando un rendimiento comparable al de las máquinas convencionales, aunque con mayores pérdidas por Foucault debido a la estructura no laminada ⁽²⁶⁾. Los compuestos magnéticos blandos (SMC por sus siglas en inglés) son ideales para los núcleos de SRM, ya que su isotropía magnética puede explotarse en diseños con flujo 3D, y su baja pérdida por Foucault es beneficiosa para alta frecuencia. Aleaciones magnéticas blandas con alta saturación, como el HIPERCO® 50, permiten incrementar la densidad de par.

Motores de Inducción

Los motores de inducción (MI) se distinguen por su robustez, simplicidad operativa y confiabilidad, cualidades que explican su amplia adopción en entornos industriales y de transporte. Si bien es cierto que su evolución no ha sido tan disruptiva como en los motores de reluctancia (SRM) o los de imanes permanentes (PMSM), los MI no han quedado al margen de la innovación tecnológica. De hecho, están siendo notablemente beneficiados por los avances en nuevos materiales y, especialmente, por las oportunidades que ofrece la manufactura aditiva.

Las topologías novedosas se enfocan en optimizar la eficiencia y reducir las pérdidas, especialmente mediante el diseño de núcleos que limiten las corrientes de Foucault. Los motores de inducción de flujo axial (AFIM), con configuraciones de doble estator, son una tecnología a considerar para aplicaciones como los vehículos eléctricos.

La manufactura aditiva, como se ha mencionado, ha abierto un campo prometedor al permitir la producción de núcleos magnéticos de estator y rotor totalmente impresos en 3D. Estos prototipos, aunque inicialmente presentan eficiencias inferiores respecto a los motores convencionales debido a limitaciones en el aislamiento, constituyen un punto de partida valioso. La MA facilita la creación de geometrías intrincadas, imposibles de fabricar con métodos tradicionales, lo que favorece tanto la reducción de pérdidas como una distribución más uniforme del flujo magnético ⁽²⁸⁾.

Finalmente, la incorporación de nuevos materiales representa otra línea estratégica de mejora. Los compuestos magnéticos blandos aplicados a los núcleos permiten reducir notablemente las pérdidas por corrientes de Foucault. Complementariamente, la MA facilita la exploración de microestructuras

innovadoras que optimizan las propiedades magnéticas, ofreciendo una mayor adaptabilidad a distintos escenarios de diseño.

En conjunto, estos avances muestran que los motores de inducción, a pesar de ser una tecnología madura, siguen siendo objeto de innovación continua. La sinergia entre diseños optimizados, materiales avanzados y técnicas de manufactura emergentes garantiza que los MI mantengan su relevancia tecnológica en el marco de la electrificación y la transición hacia sistemas más eficientes y sostenibles.

CONCLUSIONES

La electrificación global y la búsqueda incansable de eficiencia energética están impulsando una auténtica revolución en el diseño y fabricación de máquinas eléctricas. En este panorama, la convergencia de tres líneas de investigación como topologías novedosas, manufactura aditiva y nuevos materiales, se consolida como el eje fundamental para desarrollar la próxima generación de motores: más potentes, eficientes y sostenibles.

La manufactura aditiva no solo permite producir componentes con geometrías complejas e intrínsecamente más eficientes, como rotores optimizados o sistemas de enfriamiento integrados, sino que también facilita la integración de materiales avanzados, como aceros de alto silicio, compuestos magnéticos blandos, aislantes térmicos, que difícilmente podrían procesarse mediante técnicas convencionales.

De esta sinergia surgen avances en diferentes tecnologías. En los SRM, los rotores optimizados mediante MA y el uso de SMC permiten reducir pérdidas, ondulación de par y ruido. Los PMSM se benefician del diseño de imanes impresos en 3D con geometrías optimizadas, junto con nuevos materiales térmicos que mejoran la disipación de calor para alcanzar densidades de potencia superiores. Finalmente, los MI encuentran en la MA la oportunidad de incorporar núcleos con geometrías complejas que reducen pérdidas y optimizan la distribución del flujo magnético, algo prácticamente inalcanzable con métodos tradicionales.

Un aspecto importante de la MA es su capacidad para acelerar el ciclo de diseño y verificación, permitiendo el prototipado rápido de nuevas topologías y la evaluación experimental de nuevos materiales. Esto reduce el tiempo de comercialización de innovaciones y abre el camino hacia soluciones más competitivas.

A pesar de los avances, persisten desafíos que definen posibles líneas de investigación:

- Incrementar la velocidad de fabricación y desarrollar tecnologías multimaterial para procesar diferentes materiales en un mismo componente.
- Mejorar las propiedades de los imanes permanentes fabricados aditivamente, optimizando su densidad energética mediante técnicas de alineación postproceso.
- Profundizar en la caracterización de materiales bajo condiciones reales de operación, considerando campos vectoriales 2D/3D, estrés mecánico y efectos térmicos.
- Impulsar la optimización de diseño asistida por IA y aprendizaje automático, para integrar fenómenos multifísicos y reducir la complejidad del modelado.
- Promover estrategias sostenibles, incluyendo el desarrollo de alternativas libres de tierras raras, el reciclaje de materiales críticos y la exploración de nanomateriales como los CNT para bobinados.

La integración sinérgica de topologías novedosas, manufactura aditiva y nuevos materiales es una vía necesaria para superar las limitaciones de los métodos convencionales y materializar la próxima generación de máquinas eléctricas de alto rendimiento que demandan la industria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 Abdollahi ME, Zahid A, Vaks N, Bilgin B. Switched Reluctance Motor Design for a Light Sport Aircraft Application. *Machines*. 2023;11(3):362. <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/362>

2 Abdollahi ME, Vaks N, Bilgin B. A Multi-objective Optimization Framework for the Design of a High Power-Density Switched Reluctance Motor. En: 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC) Anaheim, CA, USA: IEEE; 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9813774/>

3 Abhijith V, Hossain MJ, Lei G, A S P. Performance Improvement of Switched Reluctance Motor Using Hybrid Excitation Method Without Permanent Magnets. En: 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Gyeongju, Korea, Republic of: IEEE; 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9634295/>

4 Abhijith V, Hossain MJ, Lei G, Sreelekha PA, Kadam SB. Hybrid Topologies of Non-Permanent Magnet-Excited Switched-Reluctance Motors With High Torque Capability For Electric Vehicle Applications. En: 2023 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC) Sydney, Australia: IEEE; 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10458487/>

5 Zhang M, Yuan M, Jiang J. A Comprehensive Review of the Multiphase Motor Drive Topologies for High-Power Electric Vehicle: Current Status, Research Challenges, and Future Trends. *IEEE Trans Transp Electrific*. 2025; 11(1):3631-54. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10637454>

6 Wrobel R, Mecrow B. A Comprehensive Review of Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines. *IEEE Trans Energy Convers* junio de 2020; 35(2):1054-64. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8952785/>

7 Chaudhary V, Mantri SA, Ramanujan RV, Banerjee R. Additive manufacturing of magnetic materials. *Progress in Materials Science*. 2020; 114:100688. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642520300529>

8 Lamichhane TN, Sethuraman L, Dalagan A, Wang H, Keller J, Paranthaman MP. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—a review. *Materials Today Physics*. 2020;15:100255. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542529320300791>

9 Ziegler M, Schäfer P, Wieprecht N, Franke J, Kühl A. Investigation of Insulation Layers on Additive Manufactured Electrical Steel Laminations in Electric Motors. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*. 2023; 30(5):2344-52. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10081051/>

10 Wu F, EL-Refaie AM. Toward Additively Manufactured Electrical Machines: Opportunities and Challenges. *IEEE Trans on Ind Applicat*. 2020; 56(2):1306-20. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8935446/>

11 Goll D, Schuller D, Martinek G, Kunert T, Schurr J, Sinz C, et al. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Additive Manufacturing*. 2019; 27:428-39. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860418310467>

12 Tiismus H, Kallaste A, Vaimann T, Rassõlkin A. State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines. *Additive Manufacturing*. 2022; 55:102778. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860422001828>

13 Naseer MU, Kallaste A, Asad B, Vaimann T, Rassõlkin A. A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines. *Energies*. 2021;14(7):1940. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1940>

14 Sarap M, Kallaste A, Shams Ghahfarokhi P, Tiismus H, Vaimann T. Utilization of Additive Manufacturing in the Thermal Design of Electrical Machines: A Review. *Machines*. 2022;10(4):251. <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/4/251>

15 Gmyrek Z. Optimal Electric Motor Designs of Light Electric Vehicles: A Review. *Energies*. 2024; 17(14):3462. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3462>

16 Guo Y, Ba X, Liu L, Lu H, Lei G, Yin W, et al. A Review of Electric Motors with Soft Magnetic Composite Cores for Electric Drives. *Energies*. 2023;16(4):2053. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/2053>

17 Yao Z, Saadon Y, Mandel R, Patrick McCluskey F. Cooling of Integrated Electric Motors. En: 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) Orlando, FL, USA: IEEE; 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9190262/>

- 18 Salman Sarfraz M, Hong H, Su Kim S. Lightweight thermoplastic coated soft magnetic composites (SMC) and application for high-efficiency brushless DC motors. *Composite Structures*. 2023;320:117195. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822323005391>
- 19 Kulan MC, Sahin S, Baker NJ. An Overview of Modern Thermo-Conductive Materials for Heat Extraction in Electrical Machines. *IEEE Access*. 2020;8:212114-29. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9268160/>
- 20 Cheng Y, Ding L, Zhao T, Cui S. Design and Optimization of Electric Vehicle Traction Motor Considering Rotor Topology and Manufacturing Uncertainty. *IEEE Trans Ind Electron*. 2024; 71(5):5034-44. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10163993/>
- 21 Guo Y, Liu L, Ba X, Lu H, Lei G, Yin W, et al. Designing High-Power-Density Electric Motors for Electric Vehicles with Advanced Magnetic Materials. *WEVJ*. 2023;14(4):114. <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/4/114>
- 22 Masoumi M, Bilgin B. Comparative Study on the Radial Force and Acoustic Noise Harmonics of an Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drive. *IEEE Access*. 2024;12:49937-46. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10491245/>
- 23 Lucchini F, Torchio R, Bianchi N. A Survey on the Sustainability of Traditional and Emerging Materials for Next-Generation EV Motors. *Energies*. 2024;17(23):5861. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/5861>
- 24 Lamichhane TN, Wang H, Chinnasamy C, Sethuraman L, List FA, Nandwana P. An Additively Manufactured Fe-3Si Stator for a High-Performance Electrical Motor. *Applied Sciences*. 2025;15(4):1706. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1706>
- 25 Michieletto D, Alberti L, Zanini F, Carmignato S. Electromagnetic Characterization of Silicon–Iron Additively Manufactured Cores for Electric Machines. *Energies*. 2024;17(3):650. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/3/650>
- 26 Tiismus H, Kallaste A, Naseer MU, Vaimann T, Rassolkin A. Design and Performance of Laser Additively Manufactured Core Induction Motor. *IEEE Access*. 2022;10:50137-52. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9770783/>
- 27 Wang X, Li B, Gerada D, Huang K, Stone I, Worrall S, et al. A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars. *Applied Thermal Engineering*. 2022;201:117758. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431121011820>
- 28 Tikadar A, Johnston D, Kumar N, Joshi Y, Kumar S. Comparison of electro-thermal performance of advanced cooling techniques for electric vehicle motors. *Applied Thermal Engineering*. 2021;183:116182. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431120336620>
- 29 Rom CL, Smaha RW, O'Donnell S, Dugu S, Bauers SR. Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors. *MRS Bulletin*. 2024; 49(7):738-50. <https://link.springer.com/10.1557/s43577-024-00743-4>

30 Silveyra JM, Ferrara E, Huber DL, Monson TC. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world. *Science*. 2018; 362(6413):eaao0195.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao0195>

31 Krings A, Boglietti A, Cavagnino A, Sprague S. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. *IEEE Trans Ind Electron*. 2017;64(3):2405-14.
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7577727/>

32 Lamarre JM, Ibrahim M, Pelletier R, Vatandoost H, Bernier F. Permanent magnets with embedded phase changing material for electric motor thermal management. *Journal of Applied Physics*. 2024;136(17):174901. <https://pubs.aip.org/jap/article/136/17/174901/3319078/Permanent-magnets-with-embedded-phase-changing>

33 Sripada S, Davis CS, Marconnet AM. Thermal Characterization of Contemporary Electrical Insulation Materials. En: 2024 23rd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) Aurora, CO, USA: IEEE; 2024.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10709544/>

34 Mousavi-aghdam SR. Design and analysis of a novel topology for slotless brushless DC (BLDC) motors with enhanced torque and efficiency. *IET Electric Power Appl*. 2021;15(3):284-98.
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/elp2.12020>

35 Agamloh E, Von Jouanne A, Yokochi A. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines*. 2020; 8(2):20. <https://www.mdpi.com/2075-1702/8/2/20>

Recibido: 28 de junio de 2025

Aceptado: 12 de noviembre de 2025

El (los) autor(es) de este artículo declara(n) que:

Este trabajo es original e inédito, no ha sido enviado a otra revista o soporte para su publicación.

Está(n) conforme(s) con las prácticas de comunicación de Ciencia Abierta.

Ha(n) participado en la organización, diseño y realización, así como en la interpretación de los resultados.

Luego de la revisión del trabajo, su publicación en la revista *Pedagogía Profesional*.

NO HAY NINGUN CONFLICTO DE INTERÉS con otras personas o entidades