Mundo Fesc E-ISSN 2216-0353 P-ISSN 2216-0388P-ISSN 2216-0388 **Artículo Original**

Avances en estrategias de control de motores en vehículos eléctricos: revisión sistemática 2021-2025 y análisis comparativo

Advances in Control Strategies for Electric Motors in Electric Vehicles: Systematic Review 2021-2025 and Comparative Analysis

Recibido:11 de septiembre de 2025

Aprobado:18 de diciembre de 2025

Forma de citar: L. F. . González Archila, E. A. Caicedo Peñaranda, and J. L. . Díaz Rodríguez, "Avances en estrategias de control de motores en vehículos eléctricos: revisión sistemática 2021-2025 y análisis comparativo", Mundo Fesc, vol. 16, no. 34, pp. 313-337 Jan. 2026, doi: 10.61799/2216-0388.2030.

Luis Felipe González Archila

Ingeniero Eléctrico
luis.gonzalez2@unipamplona.edu.co
Orcid: 0000-0002-5284-3814
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Edison Andrés Caicedo Peñaranda

Magíster en Controles Industriales
edison.caicedo@unipamplona.edu.co
Orcid: 0000-0003-4557-1061
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

Jorge Luis Díaz Rodríguez

Magíster en Automática
jdiazcu@unipamplona.edu.co
Orcid: 0000-0001-7661-8665
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia.

*Autor para correspondencia:
luis.gonzalez2@unipamplona.edu.co

© 2026. Fundación de Estudios Superiores Comfanorte.

Avances en estrategias de control de motores en vehículos eléctricos: revisión sistemática 2021-2025 y análisis comparativo

Resumen

Antecedentes: La movilidad eléctrica ha impulsado el desarrollo de motores eléctricos más eficientes y confiables para aplicaciones vehiculares. En este contexto, tecnologías como el motor de inducción, el motor síncrono de imanes permanentes y el motor sin escobillas de corriente continua han evolucionado junto con nuevas estrategias de control y convertidores de potencia. Sin embargo, persisten desafíos asociados a variaciones de carga, condiciones dinámicas exigentes y requerimientos de eficiencia energética. **Objetivo:** Analizar de manera sistemática los avances recientes en estrategias de control aplicadas a motores eléctricos en vehículos eléctricos durante el periodo 2021-2025, identificando tendencias, ventajas comparativas y brechas de investigación. **Métodos:** Se realiza una revisión sistemática exhaustiva de literatura en la base de datos Scopus, siguiendo la metodología Prisma. Se efectúa un análisis bibliométrico inicial y posteriormente una evaluación comparativa cualitativa y cuantitativa de ciento cincuenta estudios seleccionados, considerando criterios de desempeño, complejidad de implementación, eficiencia y adaptabilidad a condiciones dinámicas. **Resultados:** Los resultados evidencian que el control vectorial se mantiene como la técnica más equilibrada entre precisión, eficiencia y viabilidad industrial. Las estrategias predictivas, inteligentes e híbridas muestran mayor desempeño dinámico y eficiencia energética, aunque presentan mayores costos y complejidad. El desempeño global depende de la integración efectiva entre motor, convertidor de potencia y sistema de control, así como del uso de nuevos materiales semiconductores. **Conclusión:** La evolución conjunta de motores, convertidores y estrategias de control es determinante para optimizar la movilidad eléctrica. Las técnicas avanzadas representan el futuro del sector, aunque su adopción masiva requiere reducir costos y complejidad computacional.

Palabras clave: accionamiento eléctrico, convertidor de potencia, estrategias de control, motor de inducción, movilidad eléctrica, semiconductores.

Advances in Control Strategies for Electric Motors in Electric Vehicles: Systematic Review 2021-2025 and Comparative Analysis

Abstract

Background: Electric mobility has driven the development of more efficient and reliable electric motors for vehicle applications. Technologies such as the induction motor, the permanent magnet synchronous motor, and the brushless direct current motor have evolved alongside new control strategies and power converters. Nevertheless, challenges remain related to load variations, demanding dynamic conditions, and energy efficiency requirements. **Objective:** To systematically analyze recent advances in control strategies applied to electric motors in electric vehicles from 2021 to 2025, identifying research trends, comparative advantages, and existing gaps. **Methods:** A systematic literature review was conducted using the Scopus database following the Prisma methodology. An initial bibliometric analysis was performed, followed by a qualitative and quantitative comparative evaluation of one hundred fifty selected studies, considering performance, implementation complexity, efficiency, and adaptability to dynamic conditions. **Results:** Findings indicate that vector control remains the most balanced technique in terms of precision, efficiency, and industrial feasibility. Predictive, intelligent, and hybrid strategies demonstrate superior dynamic performance and higher energy efficiency, although they involve greater cost and computational complexity. Overall system performance strongly depends on the effective integration of the motor, power converter, and control system, as well as on the adoption of advanced semiconductor materials. **Conclusions:** The joint evolution of motors, converters, and control strategies is essential to optimize electric mobility systems. Advanced control techniques represent the technological direction of the sector, yet their large-scale implementation requires reductions in cost and computational demand.

Keywords: electric drives, electric mobility, control strategies, induction motor, power converter, semiconductors.

Introducción

La movilidad eléctrica se ha consolidado como solución tecnológica para la sustitución de vehículos a combustión. En este contexto, los motores eléctricos con un amplio uso en las aplicaciones domésticas, industriales, agrícolas entre lo que se destacan las tecnologías como el motor de inducción (IM), el motor síncrono de imanes permanente (PMSM) y el motor brushless de corriente continua (BLDC)[1], [2]. Los motores eléctricos presentan características particulares en términos de eficiencia, costos, densidad de potencia y la complejidad del control [3].

El desempeño de los motores eléctricos depende de múltiples factores como es el diseño electromecánico, la aplicación, la temperatura de funcionamiento y la estrategia de control implementada capaz de responder a las condiciones dinámicas de los motores eléctricos. No obstante, esta variabilidad representa un reto científico debido a las particularidades y exigencias de los procesos cambiantes y comportamientos no lineales, que demandan la creación o adaptación en las estrategias de control [4].

En la movilidad eléctrica la gestión del control energético y la precisión del control aplicado en los motores posibilita la adaptación de la velocidad y torque [5], reflejados en la respuesta del vehículo con la responsabilidad de vida humanas. Donde existen estrategias de control clásico y avanzado adaptadas a las demandas operativas, aumentando la eficiencia y vida útil [6], [7]. La evolución en la programación de estrategias de control de motores eléctricos han acompañado el desarrollo de nuevas generaciones de convertidores de potencia, con disponibilidad de componentes electrónicos de gran escala, avances en el campo del procesamiento digital y reducción de costos por el aumento de las capacidades computacionales y competición en el mercado [8], permitiendo implementar algoritmos de control en plataformas costo reducido, sin perder la capacidad de controlar las dinámicas complejas que vienen dadas por los motores.

Su uso aumentará con el crecimiento de la movilidad eléctrica en las ciudades capitales, donde la sustitución de los motores de combustión genera la reducción de costos en el mantenimiento y aumenta la fiabilidad siendo el principal reto el sobredimensionamiento para adaptarse a la variación de las condiciones geográficas. A raíz de estos contextos han surgido ramas de investigación orientadas a la consecución de estrategias de control que promuevan adaptabilidad a las variaciones operativas [9], [10].

El propósito de las estrategias de control no es únicamente mejorar el rendimiento, sino también tener en cuenta aspectos como los costos, la facilidad de implementación y la divulgación de las nuevas metodologías [11]. Este punto resulta especialmente relevante en países en desarrollo, donde las tecnologías en auge pueden impulsar el desarrollo industrial, pero cuentan con limitaciones de infraestructura que dificultan su adopción masiva [12]. Por ello, es necesario que las soluciones de control sean eficientes, económicas y viables para su implementación con restricciones tecnológicas, además de contar con la flexibilidad idónea para ajustase a las condiciones propias de geográficas y climáticas de cada región o contar con la transferencia tecnológica que lo permita.

Las nuevas tendencias en inteligencia artificial (IA) y los algoritmos de aprendizaje contribuyen a los métodos de control de motores eléctricos en la respuesta a las condiciones dinámicas[13], [14]. Dicha tendencia permite organizar estructuras de control adaptativas, que son capaces de variar el comportamiento en función de las características sin exceder los límites físicos del sistema [15]. Su habilidad de aprendizaje se encuentra unida a sus propiedades de respuesta a otros estados de trabajo, lo que resulta de vital relevancia en el contexto de los vehículos eléctricos y la automatización industrial, donde la adaptabilidad y la flexibilidad son clave [16], [17].

Por otro lado, el empleo de medios de simulación y modelado han facilitado la integración de los métodos de control avanzados. En esta línea, los digital Twins o gemelos digitales se han convertido en un medio relevante para el desarrollo tecnológico [18], [19], con la emulación de etapas de operación y control posibilitando la transferencia tecnológica. En dicha línea, esta técnica ha tenido una influencia considerable en la reducción de costos y riesgos en el desarrollo experimental de nuevas tecnologías [20], [21].

Aunque los estudios previos identifican oportunidades de mejora en eficiencia y sostenibilidad de las estrategias de control emergentes [22], la evolución de los métodos clásicos [23], al igual que las adaptaciones aplicadas a los motores eléctricos [24]. Sin embargo, la literatura presenta una división entre las estrategias de control, el diseño de los sistemas de control y su aplicación en la movilidad eléctrica. Aunque los estudios realizados anteriormente abordan e identificando las oportunidades de mejora del control desde la perspectiva de la eficiencia, sostenibilidad y escalable en la industria [25], estos enfoques no articulan de manera integrada en aplicaciones de movilidad caracterizadas por grandes fluctuaciones de carga. En consecuencia, continúa siendo necesaria de una revisión de las nuevas tendencias en el área de la movilidad eléctrica. En este contexto, el presente artículo desarrolla una revisión sistemática de las tendencias y brechas de investigación que oriente el desarrollo futuro de las técnicas de control en sistemas de movilidad eléctrica.

Materiales y métodos

En el presente trabajo se realizó una revisión literaria estructurada sobre las estrategias de control aplicadas en motores de eléctricos empleados en vehículos eléctricos, abarcando los motores de inducción (IM), motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) y motores brushless de corriente continua (BLDC). La revisión se organizó en dos fases: 1) Fase de revisión bibliométrica y 2) Fase de evaluación comparativa de las técnicas de control con base en criterios de desempeño e implementación.

La revisión de información se realizó en la base de datos SCOPUS en diciembre de 2025, seleccionada por su amplia cobertura en el área de ingeniería.

Se consideró el periodo 2021- 2025 en todos los idiomas disponibles y se limitaron los resultados a Artículos (ar), artículos de revisión (re), conferencia de revisión (cp), capítulo de libro (ch) y libros (bk). Para caracterizar el panorama del campo, se utilizó las siguientes palabras clave "induction motor", "PMSM motor" y "BLDC motor", obteniendo respectivamente 7.958 documentos, 5.627 documentos y 1.139 documentos en el periodo de análisis. Este conjunto empleado en la caracterización bibliométrica obtuvo un total de 14.724 documentos, la búsqueda se llevó a cabo por medio de la estrategia de búsqueda presentada en la Tabla I.

Tabla I Resultados del proceso de búsqueda y filtrado bibliográfico.

Tegnología	Filtros aplicados	Resultados totales	Resultados en el periodo 2021-2025
Induction motor	Ar, re, cp, ch y bk	40.108 documentos	7.958 documentos
PMSM motor	Ar, re, cp, ch y bk	10.247 documentos	5.627 documentos
BLDC motor	Ar, re, cp, ch y bk	2.915 documentos	1.139 documentos

Los documentos empleados en el análisis bibliométrico mediante las herramientas VOSviewer y Bibliometrix, permitiendo visibilizar los temas predominantes de investigación vinculados a motores de inducción, electrónica de potencia y aplicaciones industriales y de movilidad eléctrica. La representación gráfica del panorama global obtenido se presenta en la Figura 1.

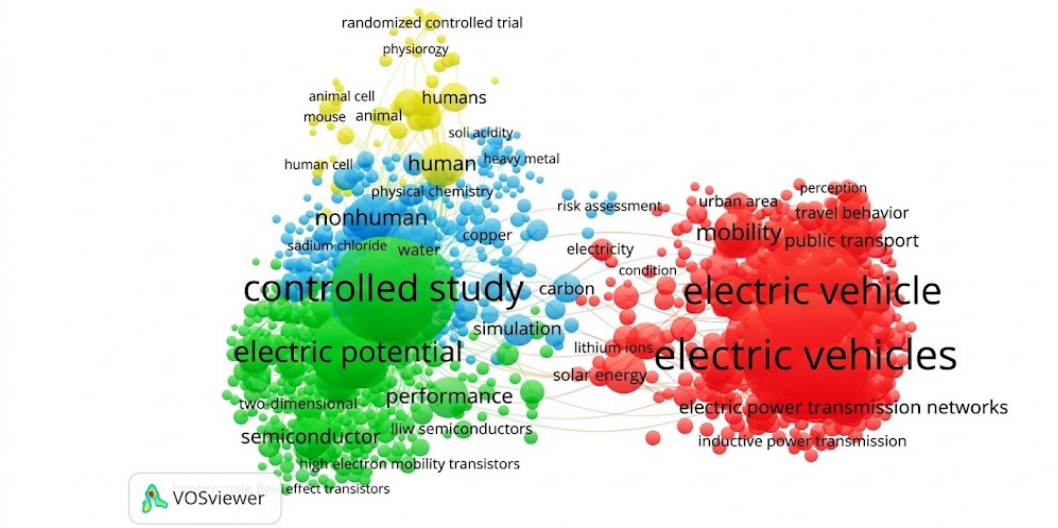


Figura 1 Análisis de Coocurrencia Fuente: elaboración propia con VOSviewer.

A partir del panorama global identificado, se delimitó el análisis al contexto especifico de los vehículos eléctricos, con el fin de enfocar la búsqueda de la información en aplicaciones de los motores eléctricos dentro de sistemas de tracción vehicular. En consecuencia, se estructuraron nuevas cadenas de búsqueda orientadas a delimitar el campo de estudio hacia configuraciones del conjunto del convertidor motor implementadas en vehículos eléctricos y posteriormente, hacia las distintas estrategias de control.

Posteriormente, con el propósito de clasificar las investigaciones según las estrategias de control y los convertidores de potencia, se formularon las ecuaciones de búsqueda específica para segmentar el campo de estudio. Las ecuaciones empleadas contemplan las restricciones definidas en cuanto al periodo 2021 al 2025 y los tipos de documentos (ar, re, cp, ch y bk). Los resultados de la búsqueda se presentan en la Tabla II.

Tabla II Resultados de búsqueda por combinación de términos (2021–2025)

N°	Términos de búsqueda	Registros totales	Registros en 2021-2025
B1	induction motor AND vector control	9.367 documentos	1.774 documentos
B2	induction motor AND vector control AND direct torque control	2.033 documentos	395 documentos
B3	induction motor AND control strategies AND Electric vehicle	637 documentos	243 documentos
B5	induction motor AND control strategies AND electric mobility	19 documentos	14 documentos
B6	PMSM motor AND vector control	4.965 documentos	2.098 documentos
B7	PMSM motor AND power converter	1.051 documentos	372 documentos
B8	PMSM motor AND control strategies AND Electric vehicle	692 documentos	391 documentos
B9	PMSM motor AND vector control AND direct torque control	801 documentos	246 documentos
B10	BLDC motor AND power converter	1.069 documentos	490 documentos
B11	BLDC motor AND control strategies AND Electric vehicle	222 documentos	124 documentos
B12	BLDC motor AND vector control	313 documentos	113 documentos
B13	BLDC motor AND vector control AND direct torque control	103 documentos	36 documentos
B14	BLDC motor AND induction motor AND PMSM motor AND Electric vehicle	18 documentos	15 documentos
B15	power converter AND mobility	1.704 documentos	921 documentos
B16	power converter AND Electric vehicle	16.789 documentos	8.325 documentos

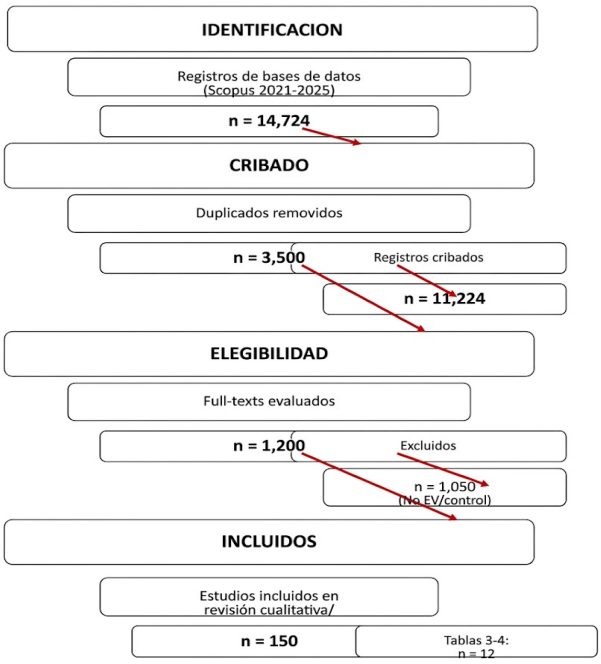


Figura 2. Diagrama PRISMA de selección de estudios para revisión sistemática de estrategias de control de motores eléctricos en vehículos eléctricos (Scopus, 2021-2025). n total inicial = 14.724 documentos.

La Figura 2 muestra el diagrama PRISMA de selección de estudios para revisión sistemática de estrategias de control de motores eléctricos en vehículos eléctricos. El proceso de selección de estudios para esta revisión sistemática siguió las directrices de la metodología PRISMA 2020, iniciando con 14.724 registros identificados en Scopus (2021-2025) a partir de las cadenas de búsqueda detalladas en las Tabla I y Tabla II. Tras eliminar 3.500 duplicados, se cribaron 11.224 títulos y resúmenes, evaluándose posteriormente 1.200 textos completos, de los cuales se excluyeron 1.050 por no cumplir criterios de elegibilidad (aplicaciones no-EV o fuera de estrategias de control). Finalmente, se incluyeron 150 estudios en el análisis cualitativo que se muestran en la Tabla III y Tabla IV, garantizando representatividad de tendencias recientes en control de motores IM, PMSM y BLDC para movilidad eléctrica.

El conjunto de 150 estudios incluidos en el análisis cualitativo comprende artículos de investigación, trabajos experimentales, estudios basados en simulación y revisiones técnicas. Las búsquedas realizadas permitieron identificar tendencias de investigación en los últimos cinco años en el ámbito de los vehículos eléctricos, las estrategias de control de motores eléctricos y convertidores de potencia. Para empezar, se presenta las búsquedas B1 a B5 se enfocan a los motores de inducción combinados con estrategias de control. Sin embargo, el número de investigaciones en las aplicaciones en vehículos eléctricos se reduce.

Adicionalmente, el motor PMSM presenta un mayor volumen de publicaciones reciente en aplicaciones de movilidad eléctrica como se presentan en las búsquedas B6 a B9, la búsqueda B8 evidencia una fuerte investigación en el área de los vehículos eléctricos en combinación con estrategias de control vectorial dando una gran acogida a los motores PMSM presenta una gran acogida por sus aplicaciones [26].

Por su parte, los motores BLDC presentan un menor número de publicaciones respecto a las otras tecnologías. Esta menor se asocia por su uso en aplicaciones en baja potencia [27]. Finalmente, las búsquedas asociadas a los convertidores de potencia B15 y B16 presenta una gran acogida en la investigación por su transversalidad en múltiples aplicaciones y en especial las relacionadas con los vehículos eléctricos.

Resultados y discusiones

Los resultados obtenidos en la revisión bibliométrica del campo posibilitan identificar tendencias de investigación del desarrollo de estrategias de control aplicada en los vehículos eléctricos. El análisis bibliométrico evidencia una alta concentración de investigación en las estrategias de control integradas con la electrónica de potencia en motores eléctricos.

Técnicas de control de motores eléctricos en vehículos eléctricos

El control de motores eléctricos ha evolucionado de manera significativa, impulsado por la necesidad de mayor precisión, eficiencia y adaptabilidad frente a variaciones de carga. Inicialmente desarrolladas para aplicaciones industriales, estas estrategias han sido adaptadas en aplicaciones de movilidad eléctrica, donde las exigencias operativas incluyen variaciones del torque y cambios de velocidad. A continuación, se discuten los aspectos relevantes de las técnicas de mayor utilización industrial, permitiendo establecer su adecuación en distintas aplicaciones de movilidad eléctrica [28].

1.Control Escalar

El control escalar es ampliamente utilizado para las aplicaciones donde se necesita variabilidad en velocidades cercanas a la nominal, destacándose su simplicidad y economía. Esta técnica se aplica preservando la relación entre el voltaje y la frecuencia (V/Hz) para evitar el debilitamiento del flujo [29], lo que genera debilitamiento del torque en bajas y altas velocidades, adicionalmente la dinámica del sistema es lenta y no considera las interacciones complejas que tienen lugar entre las variables del motor, ni es adecuado para aplicaciones que requieren de un control preciso de la velocidad y el par. Por ello, su implementación en aplicaciones de vehículos eléctricos es restringida en comparación a otras técnicas. El esquema general de esta técnica se presenta en la Figura 3.

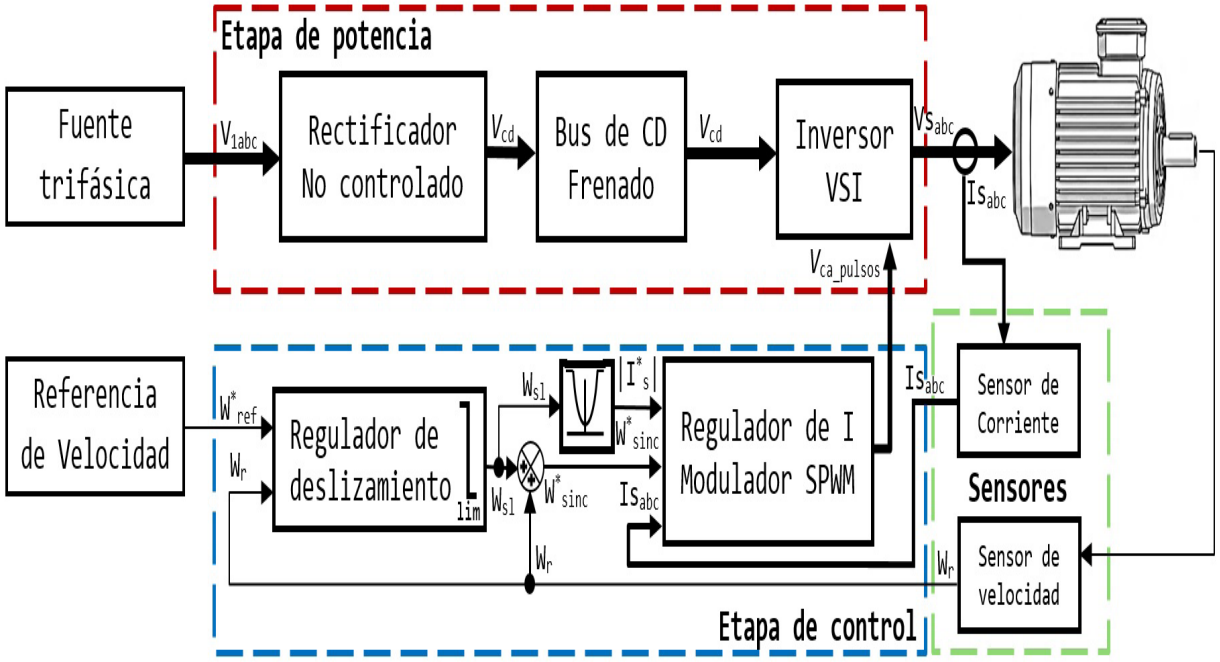


Figura 3 Diagrama de bloques del control escalar con inversor de voltaje del motor.

2.Control vectorial por campo orientado

El control vectorial por campo orientado mejora la condición del control escalar al permitir el desacoplamiento entre el flujo y el par, logrando alta precisión de la velocidad y del par, incluso en condiciones dinámicas [30]. Su implementación requiere el uso de sensores, además de capacidad de procesamiento al ejecutar las transformaciones matemáticas y algoritmos de control con un tiempo de respuesta mínimo. El esquema de bloque del control vectorial por campo orientado se presenta en la Figura 4.

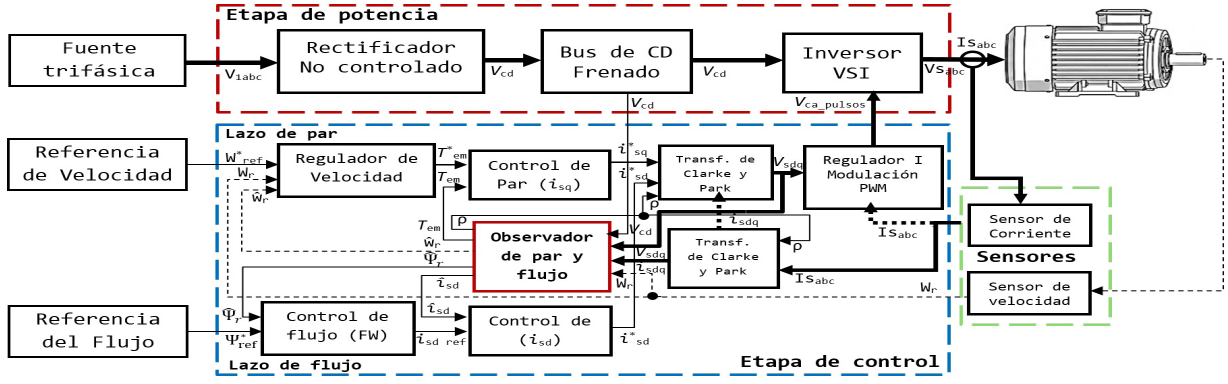


Figura 4 Diagrama de bloques del control vectorial por campo orientado directo.

3.Control directo del par

Otra estrategia de control vectorial orientada a mejorar el grado de control del par en los motores de inducción es el control directo del par (DTC) [32], el cual controla el flujo y el par mediante la variación del voltaje del inversor [33], como se presenta en el diagrama de bloques de la Figura 5. Aunque ofrece una respuesta rápida, puede generar oscilaciones de par y flujo, lo que limita su uso en aplicaciones que requieren un control extremadamente suave. El detalle de estos métodos se encuentra directamente relacionado con la dependencia de parámetros eléctricos para la estimación de flujo y par.

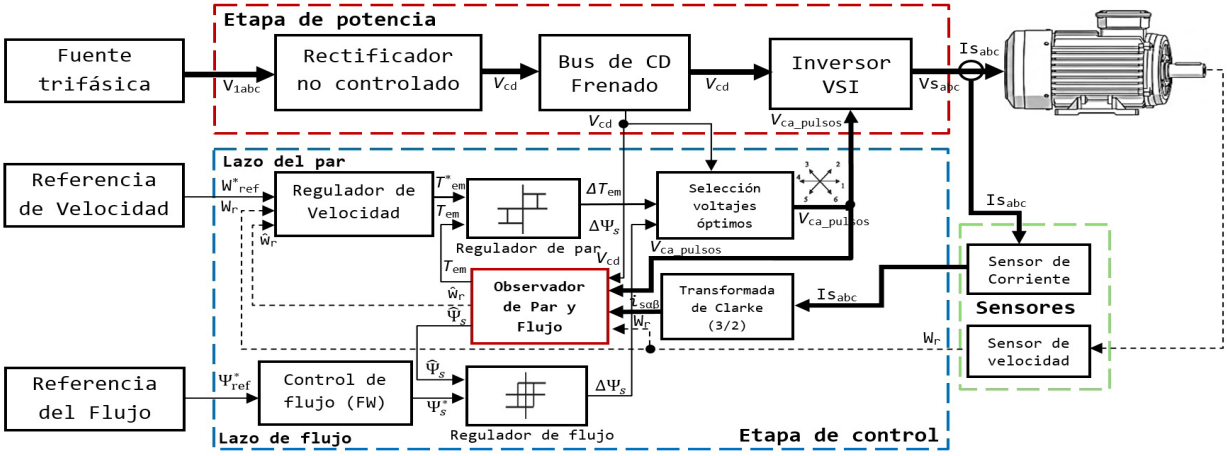


Figura 5 Diagrama de bloques del control directo del par del motor.

Con el fin de minimizar de la parametrización eléctrica y agregar el componente de adaptabilidad existen estrategias de control fundamentadas en redes neuronales o lógica difusa, que proporciona modificaciones acorde información de la operación del sistema [35], no obstante, su implementación requiere procesos adecuados en su parametrización, entrenamiento y validación, lo que incrementa la complejidad de diseño.

Otra técnica relevante es el control predictivo por modelo de referencia (MPC), el cual emplea el modelo matemático del motor para inferir su comportamiento y optimizar las señales de control en función de restricciones operativas [36]. Esta estrategia ofrece respuestas con exactitud y acordes a restricciones [37], sin embargo, implica elevada complejidad computacional elevada y el alto costo de implementación [38].

Las técnicas híbridas combinan múltiples enfoques de control integrando sus ventajas operativas [15], por ejemplo, la integración del control vectorial con estrategias de inteligencia artificial permite combinar y extraer lo mejor de los dos métodos [39], [40]. En general, las estrategias de control pueden clasificarse según su complejidad de implementación, requerimiento computacional y la capacidad de afrontar la dinámica del motor. La comparación de estas técnicas en función de su respuesta, demanda de procesamiento y aplicabilidad en movilidad eléctrica se presenta en la Tabla III [26], [27].

Tabla III Evaluación comparativa de técnicas de control para motores eléctricos en sistemas de tracción eléctrica.

Técnica	Complejidad	Sensores	Respuesta	Capacidad de Procesamiento	Eficiencia energética	Adaptabilidad a las cargas	Recomendado para vehículos eléctricos
1. Control Escalar. (V/Hz).	baja	Opcional	Moderada	baja	Media	baja	Limitada en su respuesta sólo se recomienda en pequeñas aplicaciones.
2. Control Vectorial por Campo Orientado. (FOC).	Media	Según la topología sensor de corriente, velocidad y/o posición	Alta	Media	Alta	Alta	Adecuada para implementar en aplicaciones de vehículos eléctricos.
3. Control Directo de Par. (DTC).	Alta	Corriente y estimación del flujo	Alta	Medio – alto	Media	Media	Adecuada aun así con un costo alto.
4. Control predictivo por modelo (MPC).	Muy alta	Corrientes, tensiones y velocidad	Alta	Alta	Alta	Alta	Adecuada para realizar las estimaciones con un costo alto de implementación.
5. Control Inteligente.	Alta	Corriente, voltaje y velocidad	Alta	Alta	Alta	Alta	Principalmente utilizada en el control de carga de las baterías en los vehículos eléctricos.
6. Técnica Híbrida.	Alta	Voltaje, corriente, señales de control	Alta	Muy alta (requiere tiempo de respuesta alta)	Alta	Muy alta	Recomendada para implementación en aplicaciones de alto impacto y esfuerzo.

Del análisis comparativo de la Tabla III se observa que el control escalar presenta limitaciones en la implementación en aplicaciones de vehículos eléctricos dado a su baja respuesta dinámica y reducida adaptabilidad a variaciones de carga. El control vectorial por campo orientado se ha consolidado como una de las técnicas con mayor adaptabilidad e implementación industrial por su adaptación, precisión y eficiencia. Por su parte, el control directo del par presenta mejor respuesta, aun así, es sensible a la estimación de parámetro y posible rizado en el par. Por otro lado, la técnica de control predictivo por modelo de referencia y las estrategias inteligentes presentan una mejor adaptación, pero presentan un alto costo de implementación y capacidad computacional. Finalmente, las técnicas hibridas emergen como alternativa para aplicaciones de movilidad eléctrica por el alto impacto al combinar precisión y adaptabilidad.

Tabla IV: Comparación cuantitativa de técnicas de control en EVs (datos simulados/experimentales 2021-2025).

Técnica	Rizado del par	Eficiencia	Costo Relativo	Aplicación EV
Escalar	15 – 25%	85 – 90%	Bajo	Micro movilidad
FOC	5 – 10%	92 – 95%	Medio	Tesla Model S IM
DTC	10 – 20%	90 – 93%	Alto	Prototipos HEV
MPC	3 – 8%	94 – 97%	Muy alto	BEV Premium
Inteligente	4 – 9%	93 – 96%	Alto	Batería V2G
Híbrida	< 5%	> 95%	Muy alto	Futuros FCEV

La Tabla IV complementa el análisis cualitativo de la Tabla III al presentar métricas cuantitativas específicas de rendimiento en aplicaciones reales de vehículos eléctricos (2021-2025), destacando que el control vectorial logra un balance óptimo con rizado del par (ripple de torque) de 5-10% y eficiencia del 92-95% a costo medio (ej. Tesla Model S con IM), mientras que técnicas avanzadas como MPC e híbridas superan el 94% de eficiencia y reducen el rizado por debajo del 8%, aunque a costos muy altos que limitan su adopción masiva en BEV emergentes. Por contraste, el control escalar queda restringido a micro-movilidad por su bajo rendimiento (rizado: 15-25% y eficiencia: 85-90%).

Convertidores de potencia para los motores eléctricos en movilidad eléctrica

El comportamiento de los motores eléctricos en movilidad eléctrica va más allá de las estrategias aplicadas directamente al motor; su desempeño depende en gran medida de una interacción efectiva con los convertidores de potencia [41]. Los convertidores CA/DC y CD/CA garantizan la gestión adecuada del flujo eléctrico y las señales de control requeridas en el funcionamiento del motor [42]. La integración entre el controlador y los convertidores resulta decisiva para mejorar el rendimiento y la adaptabilidad de los motores de inducción a los cambios operativos [43].

Los avances en convertidores CA/CA se orientan a la generación de un bus de corriente continua (CD) estable que proporcione las condiciones adecuadas para el inversor [44], [45]. La elección entre rectificadores semicontrolados de media onda, de onda completa depende de los requerimientos del sistema, tales como eficiencia energética, la calidad de la energía y el costo de la instalación. Los convertidores CD/CA o inversores, son clave para el control de la velocidad y el par del motor, al transformar la corriente directa en corriente alterna con la frecuencia y amplitud deseadas [46]. La evolución de estos dispositivos ha sido notable, pasando por los primeros inversores de onda cuadrada y onda sinusoidal hasta los más modernos de modulación por ancho de pulso (PWM), dando un control más preciso del voltaje con menores pérdidas y reducidas distorsiones armónicas [47], [48].

En aplicaciones de movilidad eléctrica, el inversor opera en estrecha sincronización con estrategias de control, que aprovecha su capacidad de conmutación para responder a la dinámica del motor [49], [50]. La integración efectiva entre el motor y el convertidor es esencial para la respuesta del sistema, ya que la sincronización precisa de las señales de control permite la reducción de pérdidas asociadas. En aplicaciones de movilidad eléctrica, esta interacción resulta decisiva para garantizar la respuesta dinámica adecuada ante el cambio de condiciones de operación [51]. Así mismo, la eficiencia energética constituye un elemento determinante a la hora de diseñar los sistemas, dado que las pérdidas disminuyen el rendimiento del motor.

Por ello, se hace necesario identificar componentes de electrónica de potencia a base de carburo de silicio (SiC) o nitruro de galio (GaN), los materiales permiten operar a altas fr cuencias con menores pérdidas, favoreciendo la eficiencia y densidad de potencia. Complementariamente, estrategias de modulación PWM y control inteligente buscan optimizar la operación de los convertidores y a reforzar la sostenibilidad del sistema [52]. La incorpor ción de la inteligencia artificial (IA) en los sistemas convertidor- motor ha ampliado las posibilidades de optimizar su rendimiento, permitiendo mediante algoritmos de aprendizaje automático la predicción y ajuste adaptativo de las variables del control [53].

Sin embargo, estos avances alcanzados aún presentan retos importantes, tales como la complejidad del tiempo de procesamiento del hardware, la demanda de dispositivos más-compactos y livianos. No obstante, la convergencia de tecnologías emergentes, materiales semiconductores y la electrónica de potencia apuntan a mejoras en el desempeño, confiabilidad e integración con sistemas de monitoreo [54]. En este contexto, la investigación y el desarrollo continuos en este campson esenciales para abordar los desafíos energéticos y tecnológicos en las aplicaciones de movilidad eléctrica.

Aplicaciones de los motores enfoque movilidad

Gracias a su robustez, eficiencia y su reducido mantenimiento, los motores de inducción se han consolidado como tecnología confiable en el sector industrial y los últimos años si investigado su uso en aplicaciones de vehículos eléctricos [55], [56]. Su estructura constructiva sin imanes permanentes suprime el uso de imanes permanentes que son creados a partir de tierras raras, esta es una ventaja frente a los motores PMSM, especialmente en la implementación de sistemas industriales. No obstante, los motores PMSM destacan en la industria por su potencia y eficiencia en operación [57], por esta razón las dos tecnologías de motores se encuentran implementadas en aplicaciones de vehículos eléctricos (EV).

En el ámbito de la movilidad eléctrica se distinguen cuatro tipos de vehículos como se presentan en la Figura 6 donde vehículo eléctrico de batería (BEV), vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV), vehículo eléctrico enchufable (HEV) y vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV), cada uno de estos vehículos presenta una tecnología de propulsión elegida a los requerimientos de diseño. En este contexto, los motores de inducción han tenido una aplicación relevante en vehículos eléctricos (EV), destacándose por su robustez y desempeño en condiciones de operación dinámica [58], [59]. En contraste con los motores síncronos de imanes permanentes, se presenta una acogida mayor en las aplicaciones de vehículos eléctricos por su eficiencia en operación [60], aun así, presenta grandes desafíos en su operación por su sensibilidad térmica y las pérdidas en los imanes permanentes [61], [62]. Asimismo, la integración con convertidores de potencia y el control vectorial mejora las condiciones de operación, como ha demostrado Tesla en sus primeros modelos [63].

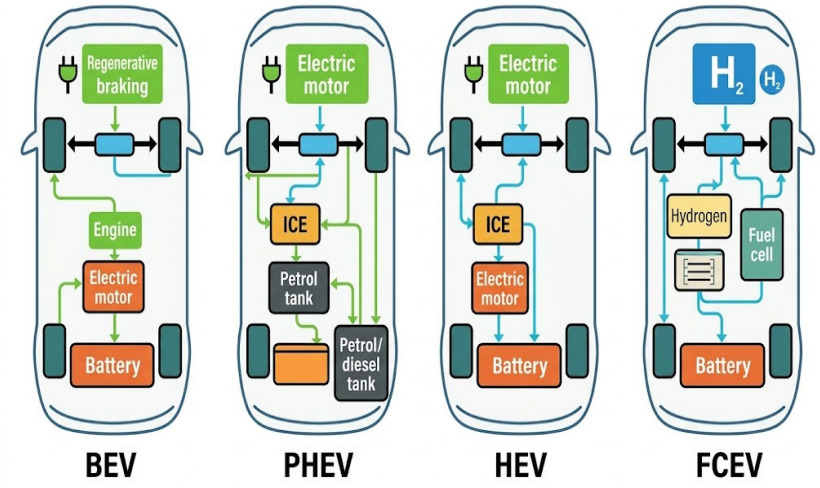


Figura 6 Comparativo de vehículos eléctricos Fuente: adaptación artículo [45].

La movilidad eléctrica puede clasificarse según el tipo de tecnología presente, como se muestra en la Figura 7, la fuente de energía utilizada y el esquema de almacenamiento con el que funciona, entre los distintos tipos de vehículos eléctricos se presentan patinetas, bicicletas, motos [64], vehículos pequeños y vehículos de carga. Las investigaciones recientes en técnicas de control aplicadas a motores de inducción se han orientado a mejorar la respuesta a las variaciones de la carga y condiciones dinámicas de operación [65], [66]. Estas estrategias buscan mitigar pérdidas operacionales y mejorando el desempeño en su respuesta dinámica [67], estas estrategia se complementan con nuevos diseños constructivos adaptado a la necesidad de los vehículos eléctricos por ejemplo los motores BLDC son utilizados en aplicaciones de baja potencia como patinetas eléctricas, bicicletas eléctricas y segways [68].



Figura 7 Matriz comparativa de tecnologías según tipo de vehículo eléctrico.

Los avances constructivos en los motores BLDC ha permitido que los motores puedan presidir del uso de tierras raras en la construcción a partir de materiales sustitutos mejorando los costos de adquisición e implementación [69]. Además, las estrategias de control vectorial y control directo del par han demostrado mejoras en su implementación cuando combina convertidores basados en semiconductores de banda ancha, como son el (SiC y GaN) [70], [71].

Paralelamente, la investigación aplicada ha impulsado la incorporación de técnicas de control híbridas [72], incluyendo algoritmos genéticos y métodos de aprendizaje automático, orientadas a optimizar el diseño del motor de inducción y sus componentes, favoreciendo configuraciones más ligeras y adaptables a las condiciones constructivas de los vehículos [73]. En estudios recientes integran nuevos diseños de motores eléctricos junto con topologías de frenado regenerativo en los vehículos eléctricos, permitiendo la recuperación de una fracción de la energía al desplazarse en pendientes descendentes [74]. De manera complementaria, el desarrollo de prototipos de nueva generación se ha prestado gran atención en la gestión térmica mediante el uso de aceites dieléctricos, nanofluidos y sistemas de refrigeración por aire, con el objeto de mejorar la disipación térmica de los componentes electrónicos del vehículo [75].

Los futuros trabajos investigativos deben orientarse al desarrollo de nuevas topologías de convertidores potencia, a la reducción de tamaño, la optimización de las implementaciones para lograr una adaptación a diversas condiciones térmicas. Estas líneas de investigación permitirán consolidar los avances tecnológicos y fortalecer los criterios para la selección de los motores en aplicaciones de movilidad eléctrica.

Conclusiones

Para las aplicaciones de movilidad el uso de motores eléctricos representa una ventaja competitiva, sobre todo con el desarrollo de vehículos eléctricos, principalmente por su adaptabilidad y respuesta a las condiciones de operación dinámicas. El motor tipo PMSM se destaca por su robustez, su desempeño energético y su alto par desarrollado. El motor de inducción mantiene su robustez, bajo su mantenimiento y la ausencia de imanes permanentes, y el motor BLDC, destaca por su adopción en aplicaciones de baja potencia principalmente en aplicaciones de micro-movilidad como patinetas y motocicletas eléctricas.

La revisión de las publicaciones de los años 2021 a 2025 confirma que el desempeño de los motores eléctricos en aplicaciones de vehículos eléctricos depende de la evolución conjunta de los motores eléctricos, las estrategias de control y la electrónica de potencia. Sin embargo, la respuesta dinámica, la eficiencia energética y la adaptabilidad dependen de la respuesta y de las pérdidas presente en los convertidores de potencia. Adicionalmente, su efectividad está condicionada a la disponibilidad de los sensores y a la capacidad de los dispositivos semiconductores para respoder la operación del motor. Incluso hay que tener en cuenta el auge de semiconductores de banda ancha (SiC y GaN) los cuales se presentan como facilitadores tecnológicos consolidados por su respuesta y bajas pérdidas en operación.

En aplicaciones de los motores PMSM, se identifican aspectos críticos en la gestión térmica y en la necesidad de mantenimiento frecuente de los imanes permanentes, que afectan la confiabilidad del sistema convertidor-motor operando en condiciones dinámicas severas. En consecuencia, los avances en la refrigeración, el monitoreo y la simulación presentan la oportunidad de mejorar el diseño, aumentando la vida útil y el desempeño del sistema de tracción en vehículos eléctricos.

Aunque persisten desafíos asociados a la complejidad computacional, los costos de implementación tecnológica y la gestión térmica, los motores de inducción y BLDC prosiguen su adaptación e integración con la electrónica de potencia y las técnicas de procesamiento inteligente, lo que permite alcanzar una mejor respuesta dinámica y una mayor eficiencia energética, complementadas conprogramas de mantenimiento preventivo.

Desde una perspectiva económica, la implementación de las diversas técnicas de control en los sistemas de tracción de los vehículos eléctricos presenta ventajas en términos de desempeño y eficiencia. No obstante, su adopción en el contexto de los países en desarrollo aún presenta limitaciones asociadas a los costos de implementación y a la necesidad de software y hardware especializado. A pesar de ello, la evolución de la electrónica de potencia y la reducción de costos de los semiconductores permiten proyectar una viabilidad a mediano plazo, especialmente en aplicaciones con optimización energética y de la respuesta dinámica.

Asimismo, la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y los algoritmos de aprendizaje automático ha impactado el control de motores eléctricos y ha abierto nuevas líneas de investigación que se orientan a mejorar la operación del conjunto convertidor-motor, en las que se incluyen las pérdidas y los modelos térmicos que sean adaptables y escalables a nuevas generaciones de vehículos eléctricos.

Agradecimientos

Al apoyo de Minciencias Colombia y la Universidad de Pamplona, en el marco de la Convocatoria 890.

Referencias

[1] J. W. Jeong, J. Lee, J. Lee, J. Cha, and K. Lee, "Comparison of energy consumption between hybrid and electric vehicles under real-world driving conditions," J. Power Sources, vol. 618, Oct. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235190.

[2] K. Dąbała and M. P. Kazmierkowski, "Converter-Fed Electric Vehicle (Car) Drives - A Critical Review," Przegląd Elektrotechniczny, vol. 1, no. 9, pp. 3–14, Sep. 2019, doi: https://doi.org/10.15199/48.2019.09.01.

[3] C. Goli, M. Manjrekar, S. Essakiappan, P. Sahu, and N. Shah, "Landscaping and review of traction motors for electric vehicle applications," IEEE Transportation Electrification Conference & Expo, Jun. 2021, pp. 162–168. doi: https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490129.

[4] Y. Cheng, L. Ding, T. Zhao, and S. Cui, "Design and Optimization of Electric Vehicle Traction Motor Considering Rotor Topology and Manufacturing Uncertainty," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 5, pp. 5034–5044, May 2024, doi: https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3288195.

[5] A. Kalhor, J. Dykas, K. Rodak, and A. Grajcar, "Materials and constructional design for electric vehicles: A review," Advances in Science and Technology Research Journal, vol. 19, no. 1, pp. 178–196, 2025, doi: https://doi.org/10.12913/22998624/195457.

[6] A. Kharki, Z. Boulghasoul, L. Taaj, and A. Elbacha, "A New Intelligent Control Strategy of Combined Vector Control and Direct Torque Control for Dynamic Performance Improvement of Induction Motor Drive," Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 17, no. 5, pp. 2829–2847, Apr. 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s42835-022-01086-3.

[7]P. Thirugnanam, "Advances, New Perspective and Applications in Induction Motors," in Induction Motors - Recent Advances, New Perspectives and Applications, IntechOpen, 2023. doi: https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.1001583.

[8] A. Aib, D. E. Khodja, and S. Chakroune, "Field programmable gate array hardware in the loop validation of fuzzy direct torque control for induction machine drive," Electrical Engineering and Electromechanics, vol. 2023, no. 3, pp. 28–35, 2023, doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.04.

[9] S. Cai, J. L. Kirtley, and C. Lee, "Critical Review of Direct-Drive Electrical Machine Systems for Electric and Hybrid Electric Vehicles," IEEE transactions on energy conversion, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3197351.

[10]N. Panossian, M. Muratori, B. Palmintier, A. Meintz, T. Lipman, and K. Moffat, "Challenges and Opportunities of Integrating Electric Vehicles in Electricity Distribution Systems," Jun. 01, 2022, Springer Nature. doi: https://doi.org/10.1007/s40518-022-00201-2.

[11]C. Liu, K. Chau, C. Lee, and Z. Song, "A Critical Review of Advanced Electric Machines and Control Strategies for Electric Vehicles," IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3041417.

[12]D. Ferreira, F. Marino, I. Sauer, H. Tatizawa, A. Traça, and A. Gakiya, "A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020," Energies (Basel)., vol. 15, no. 6, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/en15062002.

[13] G. Agrawal, H. Mohan, and M. Pathak, "Improved Speed Sensorless Control of Induction Motor Drive Using Artificial Neural Network," 2nd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/PARC52418.2022.9726692.

[14] M. U. Sardar et al., "Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques," Aug. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/en16155628.

[15] T. Penthala and S. Kaliaperumal, "Predictive control of induction motors using cascaded artificial neural network," Electrical Engineering, vol. 106, no. 3, pp. 2985–3000, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-023-02122-9.

[16] A. Routray, N. Sivakumar, N. Suresh, and G. Dhiman, "Model Reference Adaptive System Based Sensor less Vector Control of Induction Motor Using Fuzzy PID Controller," in IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies, 2022. doi: https://doi.org/10.1109/GlobConPT57482.2022.9938226.

[17] N. Prabhu, R. Thirumalaivasan, and B. Ashok, "Critical Review on Torque Ripple Sources and Mitigation Control Strategies of BLDC Motors in Electric Vehicle Applications," 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3324419.

[18] B. Harakuni, B. Divatar, N. Gurram, S. Sheth, R. Khaded, and N. Pattar, "Parameter Estimation and Vector Control of Induction Motor using Sciamble Workbench," 7th International conference for Convergence in Technology IEEE, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/I2CT54291.2022.9824245.

[19] K. A. Makinde et al., "Simulation based testing and performance investigation of induction motor drives using matlab simulink," SN Appl. Sci., vol. 5, no. 3, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/s42452-023-05296-w.

[20] A. Bhaumik and S. Das, "Virtual voltage vector based predictive current control of speed sensorless induction motor drives," ISA Trans., vol. 133, pp. 495–504, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.07.007.

[21] M. Monadi, M. Nabipour, F. Akbari-Behbahani, and E. Pouresmaeil, "Speed Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors in Electric Vehicle Applications Toward Sustainable Energy Mobility: A Review," 2024, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3450199.

[22] N. V. Quan and M. T. Long, "Sensorless sliding mode control method for a three-phase induction motor," Electrical Engineering, vol. 104, no. 5, pp. 3685–3695, Oct. 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-022-01578-5.

[23] K. Dutta, A. Devanshu, and S. Allamsetty, "Scalar-controlled three-phase induction motor drive using FPGA-based WAVECT controller," 3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, pp. 264–268, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/PARC59193.2024.10486589.

[24] B. Heidaripour, M. Ghanbari, R. Ebrahimi, and M. Jannati, "Sensorless direct vector control technique for induction motor drives under single-phase open-circuit fault," Electrical Engineering, vol. 105, no. 4, pp. 2327–2345, Apr. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-023-01781-y.

[25] K. Dimitriadou, N. Rigogiannis, S. Fountoukidis, F. Kotarela, A. Kyritsis, and N. Papanikolaou, "Current Trends in Electric Vehicle Charging Infrastructure; Opportunities and Challenges in Wireless Charging Integration," Feb. 01, 2023, MDPI. doi: https://doi.org/10.3390/en16042057.

[26] Y. Vijaya Sambhavi and R. Vijayapriya, "Modified Field-Oriented Control Scheme for a 5-Level Knight Inverter in PMSM-Based Electric Vehicle Applications," IEEE Access, vol. 13, pp. 199846–199863, 2025, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3636281.

[27] J. Ouakrim, A. Bodian, D. Ouardani, and A. Cardenas, "FPGA Implementation and Performance Evaluation of Classic PID, IMC and DTC for BLDC Motor Control," Vehicles, vol. 8, no. 2, p. 42, Feb. 2026, doi: https://doi.org/10.3390/vehicles8020042.

[28] S. Thangavel, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, S. Raju, C. Dhanamjayulu, and S. M. Muyeen, "A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors," 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250221.

[29] T. Hussein, "V/F Control of Three Phase Induction Motor Driven by VSI Based on SVPWM," International Conference on Advance of Sustainable Engineering and its Application (ICASEA), 2021, doi: https://doi.org/10.1109/ICASEA53739.2021.9733068.

[30] R. Islam, S. M. S. H. Rafin, and O. A. Mohammed, "Comprehensive Review of Power Electronic Converters in Electric Vehicle Applications," Mar. 01, 2023, MDPI. doi: https://doi.org/10.3390/forecast5010002.

[31] S. Bozhko, S. Kovbasa, Y. Nikonenko, and S. Peresada, "Direct vector control of induction motors based on rotor resistance-invariant rotor flux observer," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2018, no. 1, 2019, doi: https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607640.

[32] A. Aziz, A. Mahmoud, A. Abdelaziz, Z. Ali, and A. Diab, "A Comprehensive Examination of Vector-Controlled Induction Motor Drive Techniques," Energies (Basel)., vol. 16, no. 6, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/en16062854.

[33] Q. Nguyen-Vinh and T. Pham-Tran-Bich, "Direct torque control of induction motor based on sliding mode," Electrical Engineering, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-024-02424-6.

[34] N. El Ouanjli et al., "Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-A review," Dec. 01, 2019, Springer. doi: https://doi.org/10.1186/s41601-019-0125-5.

[35] J. Bonet-Jara, A. Quijano-Lopez, D. Morinigo-Sotelo, and J. Pons-Llinares, "Sensorless speed estimation for the diagnosis of induction motors via mcsa. Review and commercial devices analysis†," Aug. 01, 2021, MDPI AG. doi: https://doi.org/10.3390/s21155037.

[36] M. Charest-Finn and S. Pejhan, "Model Predictive Control Used in Passenger Vehicles: An Overview," Nov. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/machines12110773.

[37] Y. Alharbi, A. Darwish, and X. Ma, "A Review of Model Predictive Control for Grid-Connected PV Applications," Feb. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/electronics14040667.

[38] Z. Xue, S. Niu, A. M. H. Chau, Y. Luo, H. Lin, and X. Li, "Recent Advances in Multi-Phase Electric Drives Model Predictive Control in Renewable Energy Application: A State-of-the-Art Review," Feb. 01, 2023, MDPI. doi: https://doi.org/10.3390/wevj14020044.

[39]N. J. Antony, D. Mishra, and S. Parveen, "Sensorless Field Oriented Control of AC Induction Motor Using PI, PD & PID Controllers," in 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference, NKCon 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126557.

[40] N. Q. Vinh and T.-L. Le, "Self-learning model-based control for sensorless induction motor drives," Electrical Engineering, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-025-03146-z.

[41] P. Hothongkham, S. Suathed, and A. Aurairat, "A single-stage AC conversion with the three-phase matrix converter for the constant V/f ratio method," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 16, no. 2, pp. 1038–1050, Jun. 2025, doi: https://doi.org/10.11591/ijpeds.v16.i2.pp1038-1050.

[42] Q. Nguyen-Vinh and T.-L. Le, "Optimal frequency modulation of carrier waves and its application to induction motor drive systems," Electrical Engineering, vol. 107, no. 6, pp. 6791–6803, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s00202-024-02887-7.

[43] K. A. Singh, A. Chaudhary, and K. Chaudhary, "Three-phase AC-DC Converter for Direct-drive PMSG-based Wind Energy Conversion System," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 11, no. 2, pp. 589–598, 2023, doi: https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000060.

[44] M. A. Afifi, M. I. Marei, and A. M. I. Mohamad, "Modelling, Analysis and Performance of a Low Inertia AC-DC Microgrid," Applied Sciences (Switzerland), vol. 13, no. 5, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/app13053197.

[45] J. Rekha, T. Thamizh, and K. Vijayakumar, "Electric Vehicle Motor, Converter, Controller and Charging Station with Challenges and Configurations: Review," International Journal Of Renewable Energy Research, vol. 12, no. 1, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i1.12703.g8430.

[46] S. Yadav, S. K. Mallik, and A. Mishra, "Low-Switching Based Improved PWM for Torque Harmonic Reduction in V/f Controlled High Power Inverter Fed IM Drive," Journal of Operation and Automation in Power Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 140–148, 2025, doi: https://doi.org/10.22098/joape.2023.12546.1951.

[47] E. Nandhini and A. Sivaprakasam, "A Review of Various Control Strategies Based on Space Vector Pulse Width Modulation for the Voltage Source Inverter," IETE J. Res., vol. 68, no. 5, pp. 3187–3201, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1754935.

[48] G. Challa and M. D. Reddy, "Slip angle control based DTC of open-end winding induction motor drive using dual randomized decoupled PWM for acoustic noise mitigation in EV application," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 15, no. 3, pp. 1339–1347, Sep. 2024, doi: https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1339-1347.

[49] A. Sudhakar et al., "Monitoring and speed control of AC motor using PWM technique," International Journal of Applied Power Engineering, vol. 13, no. 4, pp. 1005–1013, Dec. 2024, doi: https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i4.pp1005-1013.

[50] G. Rohner et al., "Hardware-Based Comparative Analysis of Multilevel Inverter Topologies for Integrated Motor Drives Considering Overload Operation," IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 4, pp. 934–944, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/OJPEL.2023.3327423.

[51] A. K. Abobaker, N. M. Nordin, and A. A. Razak, "Torgue and flux ripple mitigation technique using multi-level inverter for sequential model predictive controlled induction motor," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 16, no. 1, pp. 287–297, Mar. 2025, doi: https://doi.org/10.11591/ijpeds.v16.i1.pp287-297.

[52] M. Medina-Sánchez, A. G. Yepes, Ó. López, and J. Doval-Gandoy, "Comprehensive Comparative Assessment of Multiphase Overmodulation Techniques and Three-Phase Discontinuous PWM Methods Applied to Symmetrical Six-Phase Induction Motor Drives Under Overmodulation," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 13, no. 1, pp. 702–720, Feb. 2025, doi: https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3507573.

[53] P. Sánchez–Sánchez, J. G. Cebada–Reyes, A. Montiel–Martínez, and J. F. Reyes–Cortés, "Implementation of Model Reference Adaptive Control in a Dehydration System," RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, vol. 21, no. 1, pp. 39–51, 2024, doi: https://doi.org/10.4995/riai.2023.19172.

[54] D. Bhule and R. S. Kaarthik, "A Multisequence Space Vector PWM Scheme for Peak-Peak Torque Ripple Minimization in Split-Phase Induction Motors," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11, no. 2, pp. 6525–6533, 2025, doi: https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3511112.

[55] C. L. K. Yamamura, H. Takiya, C. A. S. Machado, J. C. C. Santana, J. A. Quintanilha, and F. T. Berssaneti, "Electric Cars in Brazil: An Analysis of Core Green Technologies and the Transition Process," Sustainability (Switzerland), vol. 14, no. 10, May 2022, doi: https://doi.org/10.3390/su14106064.

[56] A. M. Khalid and Y. S. C. Khuman, "Electric Vehicles as a Means to Sustainable Consumption: Improving Adoption and Perception in India," in Socially Responsible Consumption and Marketing in Practice: Collection of Case Studies, J. Bhattacharyya, M. S. Balaji, Y. Jiang, J. Azer, and C. R. Hewege, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 325–345. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-6433-5_20.

[57] M. L. De Klerk and A. K. Saha, "A Comprehensive Review of Advanced Traction Motor Control Techniques Suitable for Electric Vehicle Applications," IEEE Access, vol. 9, pp. 125080–125108, 2021, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110736.

[58] N. España, J. Murillo-Hoyos, and E. Caicedo, "Methodology for the comparative evaluation of vehicle technologies in intermediate cities considering electric vehicles," Transp. Res. Interdiscip. Perspect., vol. 24, Mar. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101068.

[59] A. D. Gonzalez-Abreu, R. A. Osornio-Rios, A. Y. Jaen-Cuellar, M. Delgado-Prieto, J. A. Antonino-Daviu, and A. Karlis, "Advances in Power Quality Analysis Techniques for Electrical Machines and Drives: A Review," Mar. 01, 2022, MDPI. doi: https://doi.org/10.3390/en15051909.

[60]M. S. Rafaq, W. Midgley, and T. Steffen, "A Review of the State of the Art of Torque Ripple Minimization Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Industr. Inform., vol. 20, no. 1, pp. 1019–1031, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1109/TII.2023.3272689.

[61] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, Oct. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092.

[62] D. G. Yáñez, D. Fernandez, M. Martínez, and J. M. Guerrero, "Loss Model of NdFeB Magnets Considering Resistivity Variations with Magnetization State and Temperature," Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dec. 2025, pp. 1–7. doi: https://doi.org/10.1109/ecce58356.2025.11260009.

[63] R. Thomas, H. Husson, L. Garbuio, and L. Gerbaud, "Comparative study of the Tesla Model S and Audi e-Tron induction motors," Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2021. doi: https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9503055.

[64] C. Hicham, A. Nasri, and K. Kayisli, "A novel method of electric scooter torque estimation using the space vector modulation control," International Journal of Renewable Energy Development, vol. 10, no. 2, pp. 355–364, 2021, doi: https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33403.

[65] M. Azab, "A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction Motor Drives," Mar. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/vehicles7010015.

[66] U. R. S. Yalavarthy and V. S. K. R. Gadi, "Indirect Space Vector Modeling of Asynchronous Motor for High-Speed Electric Vehicle Propulsion," Journal Europeen des Systemes Automatises, vol. 55, no. 1, pp. 35–48, Feb. 2022, doi: https://doi.org/10.18280/jesa.550104.

[67] F. Tazerart, F. Kerrouche, A. Azib, and T. Rekioua, "Improving efficiency through the optimization of energy losses in an induction machine for electric vehicle propulsion," Journal of Renewable Energies, vol. 27, no. 1, pp. 67–80, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.54966/jreen.v27i1.1158.

[68] M. Şen and M. Mutluer, "A Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection," Dec. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/en18246402.

[69] S. S. Rangarajan, C. K. Shiva, E. R. Collins, and T. Senjyu, "Electric Vehicle Motors Free of Rare-Earth Elements—An Overview," Aug. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: https://doi.org/10.3390/machines13080702.

[70] B. Benbouya et al., "Sliding Mode Control of an Electric Vehicle Driven by a New Powertrain Technology Based on a Dual-Star Induction Machine," World Electric Vehicle Journal, vol. 15, no. 4, Apr. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/wevj15040155.

[71] A. Boudallaa, M. Chennani, D. Belkhayat, and K. Rhofir, "Vector Control of Asynchronous Motor of Drive Train Using Speed Controller H∞," Emerging Science Journal, vol. 6, no. 4, pp. 834–850, Aug. 2022, doi: https://doi.org/10.28991/ESJ-2022-06-04-012.

[72] X. Zhou, J. Fan, and Y. Chang, "Comparative Analytical Study of Asynchronous Motor Control Methods for Straddle Mounted Monorail Vehicle Test Stands," in Journal of Physics: Conference Series, Institute of Physics, 2025. doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/3004/1/012086.

[73] A. Oubelaid et al., "Intelligent Speed Control and Performance Investigation of a Vector Controlled Electric Vehicle Considering Driving Cycles," Electronics (Switzerland), vol. 11, no. 13, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/electronics11131925.

[74] M. I. Abdelwanis, "Optimizing the performance of six-phase induction motor-powered electric vehicles with fuzzy-PID and DTC," Neural Comput. Appl., vol. 37, no. 16, pp. 9721–9734, Jun. 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s00521-024-10455-0.

[75] S. Goolak, B. Liubarskyi, V. Lukoševicius, R. Keršys, and A. Keršys, "Operational Diagnostics System for Asymmetric Emergency Modes in Traction Drives with Direct Torque Control," Applied Sciences (Switzerland), vol. 13, no. 9, May 2023, doi: https://doi.org/10.3390/app13095457.