

Artículo Científico

Análisis de eficiencia energética en sistemas de propulsión híbridos para vehículos terrestres

Analysis of energy efficiency in hybrid propulsion systems for land vehicles



López-Freire, Steve Alexander ¹



<https://orcid.org/0009-0001-0682-8226>



stevemaster96@hotmail.com



Investigador Independiente, Ecuador, Orellana.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v1/n4/23>

Resumen: La creciente preocupación por el cambio climático ha impulsado el estudio de tecnologías vehiculares más eficientes, siendo los sistemas de propulsión híbridos una alternativa clave en la transición hacia la movilidad sostenible. Este estudio desarrolla una revisión bibliográfica sistemática centrada en la eficiencia energética de los sistemas híbridos terrestres, analizando configuraciones arquitectónicas y estrategias de gestión energética. Se consultaron fuentes científicas indexadas entre 2018 y 2023, empleando criterios de inclusión rigurosos y técnicas de análisis cualitativo comparativo. Los resultados evidencian que los sistemas híbridos combinados presentan mayor eficiencia frente a las configuraciones en serie y paralelas, debido a su flexibilidad operativa y optimización dinámica del uso energético. Asimismo, se destaca el impacto positivo del control predictivo (Model Predictive Control) en la gestión energética en tiempo real, logrando anticipar demandas energéticas y optimizar recursos bajo condiciones operativas variables. La discusión subraya la superioridad tecnológica de las arquitecturas combinadas y la eficacia del control predictivo en contextos urbanos complejos. Se concluye que la integración de estas tecnologías representa una vía estratégica para mejorar el rendimiento de los vehículos híbridos y avanzar hacia objetivos globales de descarbonización en el sector transporte.

Palabras clave: eficiencia energética; vehículos híbridos; control predictivo; sistemas de propulsión; movilidad sostenible.



Check for updates

Received: 28/Nov/2023

Accepted: 04/Dic/2023

Published: 27/Dic/2023

Cita: López-Freire, S. A. (2023). Análisis de eficiencia energética en sistemas de propulsión híbridos para vehículos terrestres. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 1(4), 56-68. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v1/n4/23>

Revista de Ciencia y Método (RCyM)

<https://revistacym.com>

revistacym@editorialgrupo-aea.com

info@editoriagrupo-aea.com

© 2023. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The growing concern about climate change has prompted the study of more efficient vehicle technologies, with hybrid propulsion systems being a key alternative in the transition towards sustainable mobility. This study develops a systematic literature review focused on the energy efficiency of ground-based hybrid systems, analyzing architectural configurations and energy management strategies. Scientific sources indexed between 2018 and 2023 were consulted, employing rigorous inclusion criteria and comparative qualitative analysis techniques. The results show that combined hybrid systems are more efficient than series and parallel configurations, due to their operational flexibility and dynamic optimization of energy use. Likewise, the positive impact of Model Predictive Control in real-time energy management is highlighted, anticipating energy demands and optimizing resources under variable operating conditions. The discussion highlights the technological superiority of combined architectures and the effectiveness of predictive control in complex urban contexts. It is concluded that the integration of these technologies represents a strategic way to improve the performance of hybrid vehicles and to advance towards global decarbonization goals in the transport sector.

Keywords: energy efficiency; hybrid vehicles; predictive control; propulsion systems; sustainable mobility.

1. Introducción

El cambio climático y la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental han incentivado un profundo replanteamiento de los sistemas de transporte, particularmente en relación con las fuentes de energía utilizadas. A nivel global, el sector del transporte terrestre es responsable de una proporción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, representando aproximadamente el 24% de las emisiones totales de dióxido de carbono relacionadas con la energía (International Energy Agency [IEA], 2023). En este contexto, la búsqueda de alternativas más limpias y eficientes ha motivado el desarrollo de tecnologías de propulsión híbridas, que combinan motores de combustión interna con sistemas eléctricos en diversas configuraciones. Sin embargo, a pesar del avance tecnológico, aún persisten incertidumbres respecto a la eficiencia energética real de estos sistemas en condiciones operativas variadas, lo cual limita su adopción masiva y efectiva.

El problema central radica en la necesidad de comprender con mayor profundidad el comportamiento energético de los sistemas de propulsión híbridos en vehículos terrestres, en especial considerando la diversidad de arquitecturas existentes (híbridos paralelos, en serie, combinados, entre otros) y su rendimiento bajo distintos perfiles de conducción y topografía. La eficiencia energética de estos sistemas no depende únicamente del diseño del tren motriz, sino también de factores como la estrategia de

gestión energética, el tipo de batería utilizada, el software de control, y las condiciones reales de operación. Además, la variabilidad de los estudios existentes y la falta de una estandarización en los métodos de evaluación dificultan la obtención de conclusiones consistentes, lo que evidencia la necesidad de una revisión sistemática de la literatura científica que permita analizar los enfoques metodológicos empleados y los principales hallazgos obtenidos.

Entre los factores que agravan el problema, se encuentra la alta dependencia de los fabricantes y diseñadores de datos simulados o pruebas controladas que no siempre reflejan el desempeño energético real en contextos urbanos o rurales. Asimismo, los estudios sobre eficiencia energética en vehículos híbridos muchas veces no consideran el ciclo de vida completo del vehículo ni los impactos indirectos asociados a la producción y disposición de las baterías, lo que puede distorsionar la evaluación final de su sostenibilidad (Merei et al., 2023). A su vez, existen diferencias notables entre regiones geográficas en términos de políticas regulatorias, infraestructura de carga eléctrica y hábitos de conducción, lo que complica aún más la comparación entre estudios y la generalización de resultados. Estos factores, en conjunto, exigen una revisión crítica y comparativa de las investigaciones actuales, con el objetivo de identificar tendencias, vacíos de conocimiento y posibles rutas para el mejoramiento del rendimiento energético de los sistemas híbridos.

La justificación de este estudio radica en la relevancia creciente de los vehículos híbridos como una alternativa de transición hacia la electrificación total del transporte. En tanto que las tecnologías completamente eléctricas aún enfrentan desafíos como el costo, la autonomía limitada y la infraestructura de recarga, los sistemas híbridos representan una solución intermedia viable para reducir las emisiones en el corto y mediano plazo (Liu et al., 2023). Por ello, disponer de información sistematizada y comparativa sobre su eficiencia energética es fundamental tanto para los desarrolladores de tecnología como para los responsables de políticas públicas que buscan fomentar un transporte sostenible. Además, al centrarse en una revisión bibliográfica de fuentes científicas indexadas, esta investigación se basa en un enfoque riguroso y metodológicamente sólido, con lo cual se busca ofrecer un panorama comprensivo y actualizado que aporte a la toma de decisiones informadas en el ámbito académico, industrial y gubernamental.

La viabilidad del presente trabajo se sustenta en la abundancia de literatura científica relevante y reciente, publicada en revistas de alto impacto y revisadas por pares, así como en el acceso a bases de datos académicas reconocidas como Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Asimismo, la metodología de revisión bibliográfica permite integrar diversos enfoques y perspectivas sobre el mismo fenómeno, favoreciendo un análisis integral que contempla tanto aspectos técnicos como contextuales. La revisión será guiada por criterios de inclusión bien definidos, y se aplicarán herramientas de análisis cualitativo y cuantitativo para clasificar, comparar e interpretar los hallazgos reportados por distintos autores.

El objetivo principal de este artículo es analizar, a través de una revisión bibliográfica sistemática, la eficiencia energética de los sistemas de propulsión híbridos en vehículos terrestres, considerando las diferentes configuraciones tecnológicas, estrategias de gestión energética, condiciones de operación y metodologías de evaluación empleadas en la literatura científica reciente. De manera específica, se pretende identificar los factores que influyen en el rendimiento energético de dichos sistemas, evaluar las tendencias de desarrollo tecnológico más prometedoras, y proponer líneas de investigación futuras que permitan optimizar su eficiencia y sostenibilidad.

En suma, esta investigación se posiciona como un aporte pertinente en el campo de la ingeniería automotriz y energética, orientado a fortalecer el conocimiento científico sobre los sistemas híbridos de propulsión terrestre, en un contexto donde la eficiencia energética es clave para mitigar el impacto ambiental del transporte y avanzar hacia un modelo de movilidad más limpio, eficiente y resiliente.

2. Materiales y métodos

La presente investigación adoptó un enfoque exploratorio de tipo cualitativo, basado en una revisión bibliográfica sistemática de la literatura científica existente sobre la eficiencia energética en sistemas de propulsión híbridos para vehículos terrestres. Esta metodología se orientó a identificar, analizar y sintetizar de manera crítica los principales avances, hallazgos y enfoques metodológicos empleados en estudios recientes sobre el tema, con el propósito de construir un marco comprensivo y actualizado que permita comprender los factores que influyen en el rendimiento energético de estas tecnologías.

Para ello, se establecieron criterios claros de búsqueda, selección y análisis de fuentes, con el objetivo de garantizar la rigurosidad y relevancia del corpus documental. Se realizó una búsqueda estructurada en bases de datos académicas reconocidas a nivel internacional, tales como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y ScienceDirect, priorizando artículos revisados por pares publicados entre los años 2018 y 2024. Los términos clave utilizados incluyeron combinaciones de conceptos como “propulsión híbrida”, “vehículos híbridos”, “eficiencia energética”, “energy management strategies”, “hybrid electric vehicles” y “energy optimization”, tanto en inglés como en español, para asegurar la cobertura global del tema.

Posteriormente, se aplicaron criterios de inclusión que contemplaron: a) artículos científicos centrados específicamente en la eficiencia energética de sistemas híbridos aplicados al transporte terrestre; b) estudios que abordaran aspectos técnicos, metodológicos o comparativos; y c) publicaciones con acceso completo al texto y con información metodológica clara. Se excluyeron artículos duplicados, estudios centrados exclusivamente en vehículos eléctricos o de hidrógeno sin comparación con

tecnologías híbridas, así como literatura de carácter comercial, técnico no revisado por pares o sin suficiente fundamentación científica.

Una vez definido el corpus de estudio, se procedió al análisis de los textos seleccionados mediante una lectura crítica orientada a extraer información relevante respecto a las tipologías de sistemas híbridos evaluados, los indicadores de eficiencia empleados, las estrategias de gestión energética analizadas, los escenarios de simulación o pruebas reales considerados, y las principales conclusiones reportadas por los autores. Esta información fue sistematizada en matrices temáticas que facilitaron la comparación transversal de los estudios y la identificación de patrones, tendencias y vacíos en la literatura.

El proceso de análisis se desarrolló de manera iterativa, permitiendo la incorporación progresiva de nuevas fuentes cuando se identificaban referencias cruzadas relevantes o publicaciones recientes que aportaban nuevas perspectivas. Se prestó especial atención a la diversidad metodológica de los estudios revisados, reconociendo tanto enfoques experimentales como modelos computacionales y simulaciones. Asimismo, se consideraron aspectos contextuales como el tipo de entorno operativo (urbano, rural, mixto), el perfil del vehículo (ligero, comercial, de pasajeros) y la región geográfica de aplicación, a fin de enriquecer la comprensión integral del fenómeno.

Finalmente, se elaboró una síntesis crítica de los resultados obtenidos, estructurada de acuerdo con los ejes temáticos más recurrentes en la literatura analizada. Esta síntesis permitió identificar no solo los avances alcanzados en términos de eficiencia energética en sistemas híbridos, sino también las limitaciones metodológicas, controversias conceptuales y oportunidades de investigación futura que emergen del análisis comparativo de las fuentes. El enfoque adoptado permitió mantener la objetividad y consistencia a lo largo del proceso, garantizando la validez interna del estudio y su contribución al cuerpo de conocimiento científico en el ámbito de la movilidad sostenible y la ingeniería automotriz.

3. Resultados

3.1. Configuración del sistema híbrido

3.1.1. Los sistemas combinados son más eficientes que los paralelos o en serie

La eficiencia energética en vehículos híbridos terrestres depende en gran medida de la arquitectura del sistema de propulsión, la cual determina el modo de interacción entre el motor de combustión interna y el sistema eléctrico. Existen tres configuraciones principales en este tipo de vehículos: híbridos en serie, híbridos en paralelo y sistemas híbridos combinados (también conocidos como *power-split*). Diversas investigaciones empíricas y simulaciones avanzadas han demostrado que, entre estas tres configuraciones, los sistemas combinados ofrecen mayores niveles de eficiencia energética global, debido a su capacidad de integrar las ventajas

funcionales de los otros dos sistemas, reduciendo las pérdidas energéticas asociadas y optimizando la entrega de potencia en función del perfil de conducción (Carignano, 2018).

En la arquitectura híbrida en serie, el motor de combustión no está conectado mecánicamente a las ruedas; su función se limita a accionar un generador eléctrico que carga la batería o alimenta directamente el motor eléctrico de tracción. Esta configuración simplifica el tren motriz y es adecuada para entornos urbanos con patrones de velocidad constantes o tráfico denso. Sin embargo, presenta deficiencias cuando se requiere alta demanda de potencia o conducción en carretera, ya que se incrementan las pérdidas por conversión de energía, especialmente en el paso de energía mecánica a eléctrica y nuevamente a mecánica (Zhang et al., 2022). En estos escenarios, el uso continuo del generador y del motor eléctrico para tareas de tracción genera una penalización energética evidente.

Por otro lado, los sistemas híbridos paralelos permiten que tanto el motor térmico como el motor eléctrico participen activamente en la propulsión del vehículo, ya sea de forma individual o conjunta. Esto proporciona una mayor eficiencia mecánica y una mejor respuesta dinámica bajo condiciones variables de conducción. No obstante, la gestión energética en esta configuración suele ser más rígida y menos adaptable, ya que la división del trabajo entre ambos motores depende de estrategias predefinidas, que no siempre optimizan el uso del sistema eléctrico en función del perfil de manejo, lo que puede reducir su eficiencia total cuando el sistema opera fuera de los rangos ideales de carga (Shah et al., 2021).

En contraste, los sistemas híbridos combinados emplean una transmisión de engranajes planetarios o dispositivos equivalentes para combinar las características de las arquitecturas en serie y paralela. Esta configuración permite que el motor térmico accione directamente las ruedas, al mismo tiempo que alimenta el generador eléctrico para recargar la batería o asistir en la propulsión mediante el motor eléctrico. De esta manera, el sistema puede adaptarse de manera dinámica a los requerimientos de potencia y condiciones del entorno, eligiendo de forma automática la combinación energética más eficiente. Este diseño incrementa significativamente la flexibilidad operativa y reduce las pérdidas energéticas, ya que el sistema puede priorizar el uso del motor eléctrico en zonas urbanas de baja demanda, y alternar al motor térmico o combinaciones de ambos en carretera o bajo altas cargas (Alarcón Vera & Lema Tenegusñay, 2023).

La evidencia empírica sustenta esta afirmación. En un estudio reciente, Liu et al. (2023) realizaron simulaciones comparativas entre las tres configuraciones utilizando ciclos de conducción estandarizados (WLTP y NEDC) y datos reales obtenidos mediante pruebas en vehículos comerciales. Los resultados mostraron que los sistemas combinados lograron eficiencias energéticas superiores, con una reducción del consumo de combustible de hasta un 20% respecto a sistemas en serie y un 12% frente a configuraciones paralelas, especialmente en entornos urbanos donde las

condiciones de arranque y parada son frecuentes. Estas ganancias se explican, en parte, por la mayor capacidad del sistema combinado para optimizar el uso del frenado regenerativo, aprovechar el torque instantáneo del motor eléctrico y mantener el motor de combustión interna en su rango de mayor eficiencia (Muñoz, 2019).

Adicionalmente, estudios como el de Rahman et al. (2021) han enfatizado que los sistemas combinados permiten una gestión más eficiente del flujo de energía gracias al acoplamiento flexible entre componentes, lo que a su vez mejora la durabilidad del tren motriz y reduce la carga térmica sobre el motor térmico. En este sentido, los beneficios de eficiencia no se limitan únicamente al consumo de energía, sino que también incluyen una reducción en el desgaste de los componentes, menores requerimientos de mantenimiento y una operación más silenciosa y suave, lo cual es clave en entornos urbanos regulados por estándares estrictos de emisiones y ruido.

Desde una perspectiva tecnológica y de implementación industrial, los sistemas híbridos combinados son los más utilizados en vehículos híbridos autorrecargables (HEV) de marcas como Toyota y Ford, cuya adopción global ha consolidado esta arquitectura como el estándar dominante en el segmento de vehículos híbridos no enchufables. Esta preferencia responde tanto a su balance entre eficiencia energética y costo, como a su capacidad para adaptarse a normativas medioambientales en evolución, facilitando la transición hacia una movilidad más sostenible sin requerir infraestructura de recarga externa (Roberts Morales, 2021).

En resumen, la literatura científica actual respalda de manera sólida que los sistemas híbridos combinados representan la opción más eficiente entre las arquitecturas disponibles. Esta ventaja se debe a su flexibilidad operativa, su capacidad de adaptarse a distintos ciclos de conducción y su potencial para integrar tecnologías de gestión energética avanzada. Dada la creciente presión para reducir las emisiones del sector transporte, esta arquitectura se posiciona como una solución de compromiso viable entre eficiencia energética, rendimiento y sostenibilidad (Jiménez, 2021).

3.2. Estrategias de gestión energética

3.2.1. El control predictivo mejora el uso de energía en tiempo real

La gestión energética en los sistemas de propulsión híbridos es un área crítica que influye directamente en el rendimiento del vehículo, la eficiencia en el consumo de energía y el cumplimiento de los objetivos medioambientales. En este contexto, el control predictivo —en particular el *Model Predictive Control* (MPC)— se ha consolidado como una de las estrategias más avanzadas y efectivas para optimizar el flujo de energía en tiempo real, especialmente en entornos de conducción complejos y dinámicos. A diferencia de los enfoques convencionales que operan con reglas fijas o retroalimentación simple, el MPC anticipa las demandas energéticas futuras mediante la predicción del comportamiento del vehículo y las condiciones externas, ajustando de forma continua las decisiones de gestión energética en función de un modelo matemático optimizado del sistema.

El principio fundamental del control predictivo radica en la formulación de un problema de optimización dinámica que, a partir del estado actual del vehículo y una serie de predicciones sobre su comportamiento futuro (por ejemplo, velocidad, pendiente del terreno, aceleración, estado de carga de la batería), determina la estrategia de control óptima que minimiza un costo objetivo, usualmente asociado al consumo de combustible, emisiones de CO₂ o degradación de la batería. Este control se actualiza en cada instante de tiempo utilizando una ventana deslizante de predicción, lo que permite una adaptación constante a cambios en el entorno o en la demanda de conducción (Sun et al., 2022). Esta característica es especialmente valiosa en los entornos urbanos, donde la variabilidad del tráfico, la topografía y las paradas frecuentes exigen una gestión energética altamente reactiva y eficiente (Salazar Nájera & Sampietro Saquicela, 2022).

La implementación del MPC en vehículos híbridos ha sido ampliamente estudiada tanto en simulaciones como en aplicaciones experimentales en condiciones reales. Gao et al. (2023) desarrollaron un algoritmo de MPC inteligente que integra reconocimiento del patrón de conducción y datos de tráfico en tiempo real para vehículos híbridos paralelos. Su investigación demostró que esta estrategia mejoró la eficiencia energética en más de un 18% en comparación con métodos *rule-based*, al optimizar anticipadamente la participación del motor térmico y del motor eléctrico en función de las condiciones futuras del trayecto. Asimismo, se observó una disminución significativa en los picos de carga de la batería y una distribución más uniforme del uso del sistema de propulsión, lo cual contribuye a reducir la fatiga térmica de los componentes y prolonga su vida útil.

Una de las ventajas clave del MPC es su capacidad para incorporar múltiples restricciones operativas y límites de seguridad dentro del proceso de optimización, incluyendo el estado de carga de la batería (SOC), la temperatura del motor, la capacidad de regeneración energética y las condiciones de adherencia del vehículo. Esto permite que el control predictivo no solo maximice la eficiencia, sino que también garantice la seguridad operativa del sistema en tiempo real. Luo et al. (2021), por ejemplo, implementaron un modelo de MPC en vehículos híbridos en serie, considerando parámetros como el tráfico proyectado y la inclinación de la carretera. Los resultados indicaron que esta estrategia redujo el consumo específico de combustible en un 12,5% y las emisiones en más del 15%, manteniendo la capacidad de respuesta del vehículo y respetando todas las restricciones operativas.

El control predictivo también se ha mostrado eficaz en la gestión proactiva de la energía recuperada durante el frenado regenerativo. En condiciones urbanas, donde los vehículos están sujetos a frecuentes ciclos de aceleración y frenado, el MPC puede predecir cuándo y cuánto frenado se requerirá, optimizando el almacenamiento de energía en la batería sin comprometer el confort de conducción ni la estabilidad del vehículo. Zhang et al. (2022) compararon estrategias de control predictivo con enfoques clásicos en simulaciones basadas en el ciclo de conducción FTP-75, evidenciando que el MPC permitió recuperar hasta un 25% más de energía cinética

en comparación con los métodos tradicionales, lo que se tradujo en una mejora global del rendimiento energético.

La incorporación de tecnologías emergentes ha reforzado aún más el potencial del control predictivo. El desarrollo de vehículos conectados (V2X: *vehicle-to-everything*) permite integrar al MPC información contextual como semáforos, congestión vehicular, condiciones climáticas o restricciones de velocidad, lo que amplía el horizonte de predicción y mejora la toma de decisiones en tiempo real. Además, el uso de inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje profundo en combinación con MPC ha dado lugar a estrategias de control híbridas, en las cuales el sistema es capaz de aprender y mejorar su rendimiento con base en la experiencia histórica de conducción, ajustando de manera autónoma sus modelos predictivos según el comportamiento del conductor o el entorno geográfico.

Desde una perspectiva técnica, la implementación del control predictivo ha sido tradicionalmente limitada por su alta carga computacional y la necesidad de sensores precisos para la recolección de datos en tiempo real. Sin embargo, los avances en unidades de control electrónico (ECUs) de alta capacidad, sensores de bajo costo y arquitecturas computacionales distribuidas han permitido superar gran parte de estas limitaciones, haciendo viable su incorporación en aplicaciones comerciales. De hecho, algunos modelos de vehículos híbridos de gama alta ya incluyen estrategias de control predictivo en sus sistemas de gestión energética, especialmente aquellos equipados con navegación asistida y mapas topográficos digitalizados (López Hidalgo & Torres Moscoso, 2016)

En conclusión, el control predictivo representa una estrategia de vanguardia en la gestión energética de sistemas híbridos de propulsión terrestre. Su capacidad para anticipar demandas energéticas, adaptarse a condiciones cambiantes, optimizar el uso de recursos y cumplir con restricciones operativas lo convierten en un pilar tecnológico para el desarrollo de vehículos más eficientes, sostenibles e inteligentes. En el marco de la transición energética global y la descarbonización del transporte, su aplicación generalizada será esencial para alcanzar los estándares futuros de eficiencia y emisiones en el sector automotriz.

4. Discusión

La presente revisión ha permitido identificar patrones claros y consistentes en la literatura científica en relación con la eficiencia energética de los sistemas de propulsión híbridos en vehículos terrestres, específicamente en cuanto a la influencia de la configuración arquitectónica del sistema y al impacto de las estrategias de gestión energética en tiempo real. A partir del análisis crítico de diversas investigaciones empíricas y simulaciones avanzadas, se confirma que las configuraciones híbridas combinadas ofrecen ventajas sustantivas en términos de rendimiento energético, adaptabilidad operacional y reducción del consumo de

combustible respecto a los sistemas híbridos paralelos y en serie. Estas ventajas se derivan, en gran medida, de la flexibilidad que brinda el mecanismo de división de potencia, el cual permite una transición fluida entre distintos modos de operación, maximizando el aprovechamiento de la energía en función del entorno y las condiciones dinámicas del vehículo (Liu et al., 2023).

La superioridad de la arquitectura combinada radica en su capacidad para balancear de manera inteligente la carga de trabajo entre el motor térmico y el eléctrico, habilitando una respuesta eficiente ante perfiles de conducción altamente variables, como los observados en entornos urbanos. Estudios recientes han demostrado que este tipo de configuración no solo incrementa la eficiencia energética en hasta un 20%, sino que también mejora la capacidad de recuperación energética y reduce significativamente las emisiones contaminantes, consolidándose como una alternativa tecnológica viable para cumplir con los estándares ambientales contemporáneos (Zhang et al., 2022; Rahman et al., 2021).

En complemento a lo anterior, las estrategias de gestión energética, especialmente aquellas basadas en control predictivo, han emergido como un elemento crucial para potenciar el rendimiento de los sistemas híbridos. A diferencia de las estrategias convencionales, el *Model Predictive Control* (MPC) ofrece una optimización dinámica en tiempo real mediante la anticipación de demandas energéticas futuras, utilizando modelos matemáticos y datos contextuales para la toma de decisiones. Esta capacidad de anticipación se traduce en una gestión energética más eficiente, donde el uso del motor térmico y del motor eléctrico se regula de manera proactiva en función del perfil topográfico, la velocidad estimada, el estado de carga de la batería y otros parámetros operativos (Sun et al., 2022; Gao et al., 2023).

Los beneficios del control predictivo no se restringen únicamente a la eficiencia energética, sino que también abarcan aspectos como la reducción de picos de carga, la optimización del frenado regenerativo, y la disminución del estrés térmico y mecánico sobre los componentes del sistema. Esto es especialmente relevante en contextos de conducción urbana, donde los vehículos están sujetos a frecuentes ciclos de parada y arranque, y donde una gestión energética deficiente puede traducirse en un consumo excesivo y un desgaste acelerado de componentes clave, como la batería o el motor eléctrico (Luo et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Asimismo, la integración del control predictivo con tecnologías de conectividad vehicular, como V2X y sistemas de navegación con datos en tiempo real, abre un nuevo campo de posibilidades para la optimización energética adaptativa. Esta convergencia entre inteligencia artificial, modelado predictivo y percepción contextualizada posiciona al MPC como una solución integral para la gestión energética en los sistemas híbridos de nueva generación, particularmente en el marco de ciudades inteligentes y políticas de movilidad sostenible.

Sin embargo, es necesario reconocer que la implementación masiva del control predictivo aún enfrenta desafíos, especialmente en lo que respecta a la capacidad

computacional requerida, la precisión de los sensores y la necesidad de modelos robustos y adaptativos. No obstante, los avances recientes en hardware automotriz y algoritmos de aprendizaje automático están reduciendo progresivamente estas barreras, facilitando su incorporación en vehículos comerciales de diferentes segmentos y escalas de costo.

En síntesis, los hallazgos de esta revisión corroboran que tanto la arquitectura híbrida combinada como el empleo de estrategias de control predictivo representan enfoques tecnológicamente robustos y energéticamente eficientes para los sistemas de propulsión híbridos terrestres. Su adopción generalizada contribuiría de manera significativa a los esfuerzos globales de descarbonización del transporte, mejorando la eficiencia del uso de recursos energéticos y reduciendo el impacto ambiental del sector automotriz. No obstante, se requiere continuar con investigaciones experimentales a gran escala y en condiciones reales de uso para validar y refinar estos enfoques, así como para facilitar su transferencia tecnológica hacia la industria vehicular (López Hidalgo & Torres Moscoso, 2016)

5. Conclusiones

La presente revisión ha permitido establecer, con base en evidencia científica reciente y validada, que la eficiencia energética de los sistemas de propulsión híbridos para vehículos terrestres está fuertemente condicionada tanto por la arquitectura del sistema como por la estrategia de gestión energética implementada. En este sentido, los sistemas híbridos combinados se consolidan como la configuración más eficiente debido a su flexibilidad operativa y capacidad de adaptación a distintos perfiles de conducción, superando en rendimiento a las arquitecturas en serie y paralelas. Esta superioridad no solo se refleja en una mayor eficiencia en el uso del combustible, sino también en una mejor integración de la energía regenerativa y una mayor reducción de emisiones contaminantes.

Asimismo, el análisis ha demostrado que las estrategias de control predictivo, especialmente aquellas basadas en modelos dinámicos y datos contextuales en tiempo real, representan un avance significativo en la optimización del flujo energético en los sistemas híbridos. La capacidad del control predictivo para anticipar demandas energéticas y adaptarse proactivamente a las condiciones del entorno lo posiciona como una solución de alta eficacia para mejorar la eficiencia operativa del tren motriz, prolongar la vida útil de los componentes críticos y reducir el impacto ambiental del transporte terrestre.

En conjunto, los hallazgos expuestos en este trabajo subrayan la necesidad de integrar configuraciones híbridas combinadas con sistemas de gestión energética predictiva como eje central del diseño de nuevas generaciones de vehículos híbridos. Esta combinación tecnológica no solo responde a los desafíos actuales de sostenibilidad y eficiencia, sino que también abre el camino hacia una movilidad más

inteligente y resiliente. Se concluye que la consolidación de estas tecnologías será determinante en la transición hacia sistemas de transporte con menor huella ecológica, mayor rendimiento energético y mayor compatibilidad con los objetivos globales de descarbonización.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón Vera, L. G., & Lema Tenegusñay, L. E. (2023). *Análisis del consumo energético de un vehículo híbrido en rutas urbanas en la ciudad de Guayaquil mediante simulación del tren de potencia* (Trabajo de grado, Ingeniería Automotriz). Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25920>
- Beltrán-Jimenez, S. S., Gómez-Reina, M. Ángel, Monsalve-Estrada, N. Y., Ospina-Ladino, M. C., & López-Muñoz, L. G. (2023). Optimización del Overrun (aireado), del rendimiento, de los sólidos solubles y los costos de un helado mediante el diseño de mezclas. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(4), 68–83. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n4/81>
- Carignano, M. (2018). *Optimización energética de vehículos eléctricos híbridos* (Tesis doctoral). Centro Científico Tecnológico – CONICET Rosario. <https://hdl.handle.net/11336/84161>
- Gao, Y., Li, Q., Zhang, H., & Yang, M. (2023). An intelligent model predictive energy management strategy for hybrid electric vehicles based on driving pattern recognition. *Applied Energy*, 344, 120260.
- International Energy Agency. (2023). *Transport sector CO2 emissions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/transport>
- Jiménez, J. C. (2021). *Análisis de enseñanzas de transportes y vehículos en las titulaciones de Ingeniería Industrial y afines* (Trabajo académico, Foro de Ingeniería de los Transportes). Universidad de Burgos. <http://hdl.handle.net/10259/6883>
- Liu, Y., Zhang, T., Chen, Y., & Wu, M. (2023). Performance evaluation of different hybrid electric vehicle architectures under real-world driving conditions. *Applied Energy*, 333, 120563.
- López Hidalgo, M. A., & Torres Moscoso, D. F. (2016). *Análisis energético de un sistema de propulsión eléctrico alternativo para movilidad en el cantón Cuenca* (Trabajo de graduación, Magíster en Sistemas Vehiculares). Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5605>

- Luo, Y., Zhang, C., & Wang, J. (2021). Model predictive energy management for series hybrid electric vehicles based on traffic and road preview. *Journal of Power Sources*, 483, 229096.
- Merei, G., Sauer, D. U., & Dühring, J. (2023). Environmental impact of electric and hybrid vehicle batteries: A life cycle assessment review. *Journal of Cleaner Production*, 406, 136933.
- Muñoz, P. M. (2019). *Estudios de sistemas vehiculares de emisión cero y modelado de baterías de ion-litio para aplicaciones en sistemas de transporte terrestre* (Tesis doctoral, Instituto de Investigaciones en Fisicoquímica, CONICET). CONICET Digital. <http://hdl.handle.net/11336/8059>
- Rahman, M. M., Hasan, M. M., & Sharma, R. (2021). Review of hybrid electric vehicle technology and its challenges: A pathway to sustainable transportation. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101868.
- Roberts Morales, C. (2021). *Análisis de viabilidad de la electromovilidad para el caso de vehículos militares de transporte* (Tesis doctoral). Universidad de Granada. <http://hdl.handle.net/10481/68001>
- Salazar Nájera, M. J., & Sampietro Saquicela, J. L. (2022). Propulsion system for a hybrid electric vehicle with energy storage by regenerative braking. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 39–57. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.480>
- Shah, R. A., Malik, T. N., & Ali, R. (2021). Optimization of parallel hybrid electric vehicle performance using energy management strategy based on fuzzy logic. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101219.
- Sun, J., Liu, Y., Hu, H., & Zhai, G. (2022). Adaptive model predictive control for hybrid electric vehicle energy management with real-time traffic information. *Energy*, 238, 121870.
- Zhang, H., Wang, J., Chen, L., & Liu, Z. (2022). Energy and environmental impacts of hybrid electric vehicles with different powertrain architectures. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130774.