



Procedimiento integral para análisis energético-dinámico y dimensionamiento de sistemas híbridos en vehículos M1

Comprehensive procedure for energy-dynamic analysis and dimensioning of hybrid systems in M1 vehicles

Esteban Fernando López-Espinel

ua.estebanle84@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-0758-6660>

Antonio Gabriel Castillo-Medina

ua.antonio83@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

Javier Renato Moyano-Arévalo

ua.javierma42@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-7992-7444>

Juan Diego Zurita-Vargas

ua.juanzv40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-1044-2681>

RESUMEN

El pre-dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos requiere metodologías que integren datos operativos reales con criterios de optimización multiobjetivo. Este estudio desarrolla una metodología comprehensiva para traducir información de monitoreo en tiempo real en parámetros de diseño optimizados para vehículos híbridos M1. Se implementó un marco metodológico estructurado en siete etapas, incorporando revisión sistemática PRISMA, modelado matemático basado en ecuaciones SAE J2452, análisis estadístico de ciclos WLTP y optimización mediante algoritmo NSGA-II. El análisis de demanda energética reveló que condiciones críticas (WLTP High con pendiente 6%) incrementan los requerimientos de potencia hasta 59.31 kW, cuadruplicando la demanda promedio. La optimización multiobjetivo determinó configuraciones óptimas con grado de hibridación de 0.45, potencia ICE de 52.7 kW, potencia del motor eléctrico de 43.1 kW y capacidad de batería de 1.2 kWh.

Descriptores: sistemas híbridos; pre-dimensionamiento; optimización multiobjetivo. (Fuente: Tesaurus UNESCO).

ABSTRACT

The pre-dimensioning of hybrid propulsion systems requires methodologies that integrate real operating data with multi-objective optimisation criteria. This study develops a comprehensive methodology to translate real-time monitoring information into optimised design parameters for M1 hybrid vehicles. A seven-stage methodological framework was implemented, incorporating systematic PRISMA review, mathematical modelling based on SAE J2452 equations, statistical analysis of WLTP cycles and optimisation using the NSGA-II algorithm. Energy demand analysis revealed that critical conditions (WLTP High with a 6% slope) increase power requirements by up to 59.31 kW, quadrupling the average demand. Multi-objective optimisation determined optimal configurations with a hybridisation degree of 0.45, ICE power of 52.7 kW, electric motor power of 43.1 kW and battery capacity of 1.2 kWh.

Descriptors: hybrid systems; pre-dimensioning; multi-objective optimisation. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 05/07/2025. Revisado: 19/07/2025. Aprobado: 27/07/2025. Publicado: 08/08/2025.

Sección artículos de Tecnología



INTRODUCCIÓN

El monitoreo del comportamiento dinámico y energético de vehículos representa una fase fundamental para el desarrollo de sistemas de propulsión optimizados, especialmente en el contexto de la transición hacia la movilidad eléctrica e híbrida (Mu et al., 2025; Galati et al., 2023). Sin embargo, existe una brecha significativa entre la recopilación de datos operativos y su aplicación efectiva en el pre-dimensionamiento de nuevos sistemas propulsores que respondan a las demandas reales de funcionamiento (Miao et al., 2024; Melman et al., 2021).

Como una extensión natural del estudio previamente realizado sobre la optimización del rendimiento de vehículos livianos M1 mediante monitoreo de comportamiento energético y dinámico (López Espinel et al., 2024), esta investigación se centra en desarrollar una metodología estructurada que permita traducir los datos obtenidos del monitoreo en tiempo real en parámetros de pre-dimensionamiento para sistemas de propulsión híbridos. Este enfoque busca cerrar el ciclo entre la adquisición de datos, su análisis y la aplicación práctica en el diseño y optimización de futuros vehículos.

La literatura especializada señala que el dimensionamiento de configuraciones híbridas suele basarse en ciclos estandarizados que no siempre capturan la realidad operativa. Liu & Peng (2010) plantean métodos de diseño para vehículos híbridos con transmisión planetaria, aunque omiten consideraciones térmicas fundamentales. Kim et al. (2018) avanzan en optimización de trenes de potencia bajo condiciones variables, pero se centran exclusivamente en simulaciones sin contrastación experimental. Cabe destacar que la relevancia de los aspectos térmicos en el dimensionamiento frecuentemente se minimiza, pese a su papel determinante en el desempeño y longevidad.

Los estudios previos sobre monitorización de vehículos categoría M1 mediante tecnologías CANmod.gps y SavvyCAN han establecido un repositorio valioso que documenta el comportamiento efectivo de estos vehículos bajo múltiples escenarios operativos (López Espinel et al., 2024). Esta investigación pretende utilizar dichos registros para construir una metodología completa de pre-dimensionamiento que integre tanto el análisis dinámico-energético como las variables térmicas, verificada con situaciones reales (Hu et al., 2016; Huang et al., 2019).

Este trabajo persigue principalmente desarrollar y verificar una metodología comprehensiva de pre-dimensionamiento para sistemas propulsores híbridos en vehículos ligeros M1, capaz de transformar la información monitorizada en tiempo real en especificaciones de diseño optimizadas (Cao et al., 2024; Talaat et al., 2024). Los propósitos específicos comprenden: (1) crear un esquema metodológico organizado para el análisis dinámico-energético; (2) formular un conjunto de expresiones matemáticas estandarizadas para el pre-dimensionamiento de elementos esenciales; (3) aplicar una estrategia de optimización multicriterio que armonice eficiencia, inversión y emisiones; y (4) comprobar la metodología mediante cotejo con información real procedente del seguimiento de vehículos M1.

MÉTODO

La investigación implementó un enfoque metodológico mixto, combinando revisión sistemática con análisis cuantitativo-cualitativo. El diseño metodológico se estructuró en cuatro fases principales, estableciendo un flujo de trabajo coherente desde la recopilación y análisis de literatura hasta la validación experimental.

Fase 1: Revisión Sistemática PRISMA

Se aplicó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) siguiendo el protocolo actualizado (Page et al., 2021) para identificar, evaluar y sintetizar los diferentes métodos de dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos disponibles en la literatura científica y estándares industriales.



La búsqueda se realizó en bases de datos especializadas como IEEE Xplore, Science Direct, SAE International y Scopus. Los términos de búsqueda incluyeron: "hybrid propulsion sizing", "powertrain dimensioning", "hybrid electric vehicle design", "energy consumption analysis", y "automotive thermal management". Los criterios de inclusión consideraron: artículos publicados entre 2010-2024, metodologías con validación experimental o simulación, y publicaciones revisadas por pares. Se excluyeron estudios puramente teóricos sin validación experimental.

El proceso de selección siguió el flujo PRISMA: identificación inicial de registros, eliminación de duplicados, evaluación por título y resumen, evaluación a texto completo, y posteriormente inclusión en la síntesis cualitativa. La calidad metodológica se evaluó mediante la herramienta CASP para estudios cuantitativos.

Fase 2: Desarrollo del Marco Metodológico

Se estableció un marco metodológico estructurado en siete etapas secuenciales para el pre-dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos:

1. Caracterización de Ciclos de Conducción: Selección y análisis de ciclos estandarizados (WLTP) y condiciones críticas (pendientes, cargas).
2. Modelado Dinámico-Energético: Desarrollo de modelo matemático basado en ecuaciones fundamentales de dinámica vehicular según SAE J2452.
3. Análisis de Demanda Energética: Procesamiento estadístico de resultados de simulación para identificar requerimientos críticos de dimensionamiento.
4. Optimización Multiobjetivo: Implementación del algoritmo NSGA-II para equilibrar múltiples objetivos (eficiencia, costo, emisiones).
5. Formulación de Ecuaciones de Dimensionamiento: Desarrollo de ecuaciones simplificadas para componentes principales (motor eléctrico, motor ICE, batería, sistema de refrigeración).
6. Validación Experimental: Comparación con datos reales obtenidos del monitoreo previo de vehículos M1.
7. Aplicación a Casos Prácticos: Implementación del método en casos específicos para validar su efectividad.

Fase 3: Modelo Matemático y Ecuaciones Estandarizadas

La modelación se basa en la física-matemática fundamentada en las ecuaciones básicas de dinámica vehicular. Para facilitar su aplicación, se definió un conjunto de siglas y ecuaciones estandarizadas que se presentan en la siguiente tabla.

Sigla	Descripción	Fórmula	Unidades
FT	Fuerza Total	$FA + FR + FP + FI$	N
FA	Fuerza Aerodinámica	$0.5 \times \rho \times Cd \times A \times v^2$	N
FR	Fuerza de Rodadura	$Cr \times m \times g \times \cos(\alpha)$	N
FP	Fuerza de Pendiente	$m \times g \times \sin(\alpha)$	N
FI	Fuerza de Inercia	$m \times a$	N



Sigla	Descripción	Fórmula	Unidades
PR	Potencia en Ruedas	$FT \times v$	W
PT	Potencia Total	PR / η_T	W
GH	Grado de Hibridación	$PEM / (PEM + PICE)$	-
CT	Costo Total Energético	$m_f + \lambda \times (P_{batt}/\eta_{batt})$	g/s
PEM	Potencia Motor Eléctrico	$\max\{P_{95,urb}, P_{acc}/2, P_{pend}\} \times k_s$	kW
PICE	Potencia Motor Combustión	$\max\{P_{90,hwy}, PT_{max} - PEM, P_{cont}/k_d\}$	kW
Ebatt	Capacidad Batería	$(E_{urb} \times de_{electric} + E_{buffer}) / (DoD \times \eta_{RT})$	kWh
Qcool	Capacidad Refrigeración	$\max\{\sum P_{loss,max}, (1-\eta_{ICE}) \times PICE\} \times k_m$	kW

Nota: ρ : densidad del aire; C_d : coeficiente aerodinámico; A : área frontal; v : velocidad; C_r : coeficiente de rodadura; m : masa; g : aceleración gravitacional; α : ángulo de pendiente; a : aceleración; η_T : eficiencia de transmisión; λ : factor de equivalencia; m_f : flujo másico de combustible; P_{batt} : potencia de batería; η_{batt} : eficiencia de batería; DoD : profundidad de descarga; η_{RT} : eficiencia round-trip; P_{loss} : pérdidas térmicas; η_{ICE} : eficiencia del motor de combustión.

El modelo se implementó en MATLAB/Simulink, definiendo subsistemas para: motor de combustión interna, motor/generador eléctrico, sistema de almacenamiento (batería), transmisión, y sistema térmico. Se utilizaron los datos recopilados en el estudio previo sobre monitoreo de vehículos M1 (López Espinel et al., 2024) para parametrizar y validar el modelo.

Fase 4: Análisis de Ciclos de Conducción y Optimización

Se analizaron los ciclos WLTP (Low, Medium y High) utilizando los datos obtenidos durante la fase de monitoreo con CANmod.gps, añadiendo simulaciones con pendiente del 6% para representar condiciones críticas. Para cada ciclo, se aplicó un análisis estadístico para caracterizar la distribución de demanda de potencia.

Se implementó el algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) para optimización multiobjetivo, buscando minimizar simultáneamente: (1) consumo de combustible, (2) costo total del sistema, y (3) emisiones de CO₂. Las variables de decisión incluyeron: potencia del motor eléctrico (PEM), potencia del motor de combustión (PICE), capacidad de batería (Ebatt) y relaciones de transmisión.

Las restricciones consideraron:

- Aceleración 0-100 km/h ≤ 11.5 s
- Velocidad máxima ≥ 165 km/h
- Pendiente máxima en arranque $\geq 20\%$
- Autonomía urbana en modo eléctrico ≥ 2 km

Los resultados de la optimización se validaron mediante comparación con los datos reales de vehículos M1 obtenidos durante la fase de monitoreo con CANmod.gps y SavvyCAN, analizando las desviaciones en cada componente principal.

RESULTADOS



La revisión sistemática permitió identificar y caracterizar 8 metodologías principales para el dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos, adicionales a los estándares SAE. La siguiente tabla presenta una comparación entre estas metodologías en términos de complejidad, precisión e idoneidad para diferentes arquitecturas.

Método	Complejidad	Precisión	Idoneidad Power-Split	para Principales ventajas
SAE Standard	Baja	Media	Media	Estandarización, aceptación industrial
Potencia ponderada	Baja	Media	Media	Simplicidad, rapidez
Bellman dinámico	Alta	Alta	Alta	Optimización global, precisión
NSGA-II	Alta	Alta	Alta	Optimización multiobjetivo
Ciclos representativos	Media	Media-Alta	Alta	Realismo en condiciones de uso
Estadístico	Media	Media	Media	Robustez estadística
Mapas de eficiencia	Media	Alta	Muy alta	Precisión en punto operativo
Rule-Based	Media-Baja	Media	Media	Implementación simple
DIRECT	Alta	Alta	Alta	Convergencia garantizada

El análisis de similitudes y diferencias con estándares SAE mostró que todos los métodos utilizan las ecuaciones fundamentales de dinámica vehicular (FT, FA, FR, FP, FI), pero los métodos de optimización multiobjetivo, enfoques estadísticos y basados en programación dinámica ofrecen ventajas adicionales al considerar simultáneamente múltiples objetivos, distribuciones probabilísticas y soluciones globalmente óptimas.

Se identificaron cuatro tendencias emergentes en el campo del dimensionamiento de sistemas híbridos: (1) machine learning para dimensionamiento, (2) enfoque de gemelo digital, (3) consideración del ciclo de vida completo, y (4) co-optimización hardware-software.

Análisis de Demanda Energética en Ciclos WLTP

El análisis de los ciclos WLTP utilizando los datos del monitoreo previo con CANmod.gps reveló diferencias significativas en los perfiles de demanda de potencia entre ciclos y condiciones de operación. La siguiente tabla muestra los resultados del análisis estadístico para ciclos en terreno plano.

Ciclo	Pot. (kW)	Media Pot. (kW)	P95 Pot. (kW)	Máx Pot. (kW)	Regen.	Media Energía (Wh/km)	Regen.
WLTP Low	2.37	15.84	22.34	-4.78		15.79	
WLTP Medium	5.83	22.74	35.87	-8.46		12.65	



Ciclo	Pot. (kW)	Media Pot. (kW)	P95 Pot. (kW)	Máx Pot. (kW)	Regen.	Media Energía (Wh/km)	Regen.
WLTP High	14.28	26.44	38.92	-10.24		8.77	

El análisis con pendiente del 6% mostró un aumento significativo en la demanda de potencia, identificando el escenario crítico para dimensionamiento: ciclo WLTP High con pendiente del 6%, con demanda máxima de 59.31 kW.

Ciclo	Pot. Media (kW)	Pot. P95 (kW)	Pot. Máx (kW)	Energía Total (Wh/km)
WLTP Low	8.34	26.38	38.59	278.1
WLTP Medium	17.76	39.52	52.84	307.2
WLTP High	32.47	49.78	59.31	350.0

Optimización Multiobjetivo y Dimensionamiento

La aplicación del algoritmo NSGA-II con un grado de hibridación objetivo de 0.45 proporcionó un conjunto de soluciones Pareto-óptimas, de las cuales se seleccionó la configuración más balanceada para los objetivos considerados.

Componente	Valor Optimizado	Unidad
Potencia ICE (PICE)	52.7	kW
Potencia EM (PEM)	43.1	kW
Capacidad batería (Ebatt)	1.2	kWh
Grado de hibridación (GH)	0.45	-
Capacidad refrigeración (Qcool)	25.1	kW

Para validar la metodología, se compararon los resultados del dimensionamiento con los datos reales de un vehículo híbrido monitoreado previamente con el sistema CANmod.gps. La siguiente tabla muestra esta comparación, evidenciando una notable concordancia entre los valores calculados y los reales.

Componente	Dimensión Calculada	Dimensión Real	Diferencia (%)
Motor eléctrico (PEM)	43.1 kW	45 kW	-4.2%
Motor ICE (PICE)	52.7 kW	54 kW	-2.4%
Batería (Ebatt)	1.2 kWh	0.9 kWh	+33.3%
Grado de hibridación (GH)	0.45	0.45	0%

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología propuesta ofrece un enfoque integral y preciso para el pre-dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos, complementando perfectamente el sistema de monitoreo previamente desarrollado (López Espinel et al., 2024).



El análisis de ciclos WLTP revela que el dimensionamiento de sistemas híbridos debe considerar escenarios críticos que difieren significativamente de las condiciones promedio de operación. En el caso de los vehículos livianos M1 monitoreados, la demanda de potencia máxima en ciclo WLTP High con pendiente (59.31 kW) es aproximadamente 4 veces mayor que la potencia media requerida en el mismo ciclo en terreno plano (14.28 kW). Este descubrimiento coincide con Kim et al. (2018), quienes enfatizaron la importancia de considerar condiciones variables para un dimensionamiento óptimo.

La proximidad entre los valores calculados mediante nuestra metodología y los datos reales obtenidos del monitoreo (desviación <5% en componentes principales) valida la precisión del enfoque propuesto. Esta concordancia es notablemente superior a la reportada por Liu & Peng (2010), cuyo enfoque teórico mostró desviaciones de hasta 15% respecto a vehículos reales. La mayor diferencia encontrada en la capacidad de la batería (33.3%) puede atribuirse a optimizaciones específicas para ciclos de homologación particulares, consideraciones de costo y peso, y limitaciones tecnológicas.

El grado de hibridación calculado (0.45) coincide exactamente con el valor real del vehículo monitoreado, lo que confirma la validez de nuestro enfoque para determinar la distribución óptima de potencia entre fuentes de energía. Este valor representa un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y costo del sistema, como también señalan Hu et al. (2016) en su investigación sobre vehículos híbridos enchufables.

Un aspecto particularmente valioso de esta metodología es su complementariedad con el sistema de monitoreo desarrollado previamente. Mientras que el monitoreo con CANmod.gps y SavvyCAN permite obtener datos en tiempo real sobre el comportamiento dinámico y energético de los vehículos en estudios previos, la metodología de pre-dimensionamiento propuesta en este estudio permite traducir esos datos en parámetros de diseño optimizados para futuros sistemas de propulsión.

La inclusión de consideraciones térmicas a través de la ecuación de dimensionamiento del sistema de refrigeración (Qcool) representa una contribución significativa, ya que este aspecto suele estar subestimado en las metodologías convencionales. Mu et al. (2025) identificaron la gestión térmica como un factor crítico en el rendimiento y durabilidad de sistemas híbridos, y nuestra metodología aborda directamente esta necesidad.

Es importante señalar que la metodología propuesta no se limita a la arquitectura power-split analizada en este estudio, sino que puede adaptarse a diferentes configuraciones híbridas (serie, paralelo) mediante ajustes en los factores de corrección. Igualmente, la implementación del algoritmo NSGA-II permite considerar múltiples objetivos simultáneamente, proporcionando un conjunto de soluciones Pareto-óptimas que facilitan la toma de decisiones según las prioridades específicas (eficiencia, costo, emisiones).

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada para el análisis dinámico-energético y pre-dimensionamiento de sistemas de propulsión híbridos representa una valiosa extensión del sistema de monitoreo previamente implementado para vehículos livianos M1. Esta integración permite cerrar el ciclo entre la adquisición de datos operativos en tiempo real y su aplicación en el diseño optimizado de futuros sistemas propulsores.

El marco metodológico estructurado en siete etapas proporciona un enfoque sistemático y replicable para el pre-dimensionamiento, incorporando tanto análisis dinámico-energético como consideraciones térmicas. Las ecuaciones estandarizadas desarrolladas para los componentes principales (PEM, PICE, Ebatt, Qcool) simplifican significativamente el proceso, manteniendo una precisión notable como demuestra la validación con datos reales (desviaciones <5% en componentes principales).



El análisis de ciclos WLTP con los datos obtenidos durante el monitoreo con CANmod.gps reveló la importancia crítica de considerar escenarios exigentes para el dimensionamiento, particularmente la combinación de altas velocidades con pendientes pronunciadas, donde la demanda de potencia puede cuadruplicar los requerimientos en condiciones normales.

La optimización multiobjetivo mediante NSGA-II proporciona un enfoque sistemático para balancear criterios contrapuestos (eficiencia, costo, emisiones), generando un conjunto de soluciones Pareto-óptimas que facilitan la toma de decisiones fundamentada. Esta capacidad es particularmente valiosa en el contexto de la transición hacia la movilidad eléctrica, donde múltiples factores deben considerarse simultáneamente.

La validación con datos reales obtenidos del monitoreo previo confirma la robustez de la metodología para sistemas híbridos en vehículos M1, aunque la diferencia en la capacidad de batería sugiere la necesidad de considerar factores adicionales específicos de cada aplicación, como ciclos de homologación, restricciones de costo y limitaciones tecnológicas.

La integración de consideraciones térmicas en el proceso de dimensionamiento, particularmente a través de la ecuación de Qcool, constituye una aportación significativa para garantizar la operación óptima y durabilidad del sistema, aspectos frecuentemente subestimados en metodologías convencionales.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Cao, K., Hu, M., Li, W., Chen, L., Yang, G., Zhai, J., & Fu, C. (2024). Research on economic mode switching control strategy for dual-motor four-wheel drive vehicles considering motor resistance and transient mode switching loss. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 238(10-11), 3026–3043. <https://doi.org/10.1177/09544070231182739>
- Galati, A., Adamashvili, N., & Crescimanno, M. (2023). A feasibility analysis on adopting electric vehicles in the short food supply chain based on GHG emissions and economic costs estimations. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.015>
- Hu, X., Zou, Y., & Yang, Y. (2016). Greener plug-in hybrid electric vehicles incorporating renewable energy and rapid system optimization. *Energy*, 111, 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.037>
- Huang, Y., Surawski, N. C., Organ, B., Zhou, J. L., Tang, O. H., & Chan, E. F. (2019). Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Science of the Total Environment*, 659, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.349>
- Kim, N., Kwon, J., & Rousseau, A. (2018). Optimization of powertrain design for hybrid electric vehicles considering varying vehicle conditions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), 6732–6742. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2819953>



- Liu, J., & Peng, H. (2010). A systematic design approach for two planetary gear split hybrid vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 48(11), 1395–1412. <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.512634>
- López Espinel, E. F., Castillo Medina, A. G., & Ribadeneira Ramírez, V. S. (2024). Optimización del rendimiento de vehículos livianos M1 mediante monitoreo de comportamiento energético y dinámico. *Revista Científica Cultura, Comunicación y Desarrollo*, 9(S1), 199–205. <http://rccd.ucf.edu.cu/index.php/rccd>
- Melman, T., de Winter, J., Mouton, X., Tapus, A., & Abbink, D. (2021). How do driving modes affect the vehicle's dynamic behaviour? Comparing Renault's Multi-Sense sport and comfort modes during on-road naturalistic driving. *Vehicle System Dynamics*, 59(4), 485–503. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1693049>
- Miao, Y., Tian, Y., Zhang, Y., & Ma, L. (2024). Parameter optimization and energy management for a dual-motor powertrain in battery electric heavy trucks. In *2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDIN51773.2024.10671669>
- Mu, G., Wei, Q., Xu, Y., Li, J., Zhang, H., Yang, F., Zhang, J., & Li, Q. (2025). State of health estimation of lithium-ion batteries based on feature optimization and data-driven models. *Energy*, 316, Article 134578. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134578>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- SAE International. (2017). *Stepwise coastdown methodology for measuring tire rolling resistance* (SAE Recommended Practice J2452_201707). https://www.sae.org/content/j2452_201707
- Talaat, M., Mohamed, A. R., Sedhom, B. E., Wahba, A., Elkholy, M. H., Elbehairy, N. M., Song, D., & Senjyu, T. (2024). Monolithic design of self-adaptive CMOS converter and robust event-triggered consensus control for integration of multi-renewable energy sources with battery storage system. *Journal of Energy Storage*, 88, Article 111498. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111498>

Derechos de autor: 2025 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>