

Análisis de radiación solar y validación experimental en un sistema fotovoltaico aislado.

Simulation of a Hybrid Energy Supply System Based on Fuel Cells for Applications in Electric Vehicles.

Paneluisa-Guaman, Brayan¹; Tapia-Aizaga, Ibeth Alejandra²; Quinatoa-Caiza, Carlos Iván³.

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0007-1766-9500>; brayan.paneluisa6845@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0001-8542-048X>; ibeth.tapia4689@utc.edu.ec

³ Universidad Técnica de Cotopaxi; Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0000-0001-6369-7480>; carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v4/n4/411>

Cita: Paneluisa-Guaman, B., Tapia-Aizaga, I. A., & Quinatoa-Caiza, C. I. (2026). Análisis de radiación solar y validación experimental en un sistema fotovoltaico aislado. *Innova Science Journal*, 4(4), 104-126. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v4/n4/411>

Recibido: 11/03/2026

Aceptado: 28/07/2026

Publicado: 31/10/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).**

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: El problema de la mala gestión energética y la rápida degradación de los componentes en los vehículos eléctricos de fuente única se resuelve en este artículo. Para solucionar el problema, se propone un sistema de energía híbrido con batería de iones de litio, supercondensadores y celdas de combustible de hidrógeno. El rendimiento del vehículo en aceleración y frenado regenerativo se simula en MATLAB/Simulink. Se utiliza un convertidor DC/DC bidireccional para controlar el flujo de potencia, manteniendo el equilibrio energético durante los períodos de alta demanda y recuperando energía durante el frenado. La celda de combustible proporciona potencia estable, el supercondensador gestiona los picos repentinos de potencia y su absorción, y la batería aporta energía constante a largo plazo. Los resultados de la simulación muestran perfiles de voltaje y corriente estables en todas las fuentes, lo que demuestra la eficacia de la coordinación. En comparación con las configuraciones convencionales, el sistema propuesto consume un 15% menos de hidrógeno y logra una eficiencia energética global superior al 85%. Estos resultados demuestran que la arquitectura híbrida propuesta aborda con éxito el desafío de gestión energética identificado, mejora el rendimiento del vehículo ante variaciones de carga, y ofrece una nueva solución para la movilidad eléctrica de próxima generación y el uso de energía limpia en los futuros sistemas de transporte sostenible.

Palabras clave: Vehículos eléctricos; Sistema de energía híbrido; Batería de iones de litio; Supercondensadores; Celdas de combustible de hidrógeno; Gestión energética.

Abstract: The problem of poor energy management and rapid degradation of components in single-source electric vehicles is addressed in this article. To solve this problem, a hybrid energy system combining a lithium-ion battery, supercapacitors, and hydrogen fuel cells is proposed. The vehicle's performance during acceleration and regenerative braking is simulated in MATLAB/Simulink. A bidirectional DC/DC converter is used to control the power flow, maintaining the energy balance during periods of high demand and recovering energy during braking. The fuel cell provides stable power, the supercapacitor manages sudden power peaks and their absorption, and the battery supplies steady long-term energy. The simulation results show stable voltage and current profiles across all sources, demonstrating the effectiveness of the coordination. Compared to conventional configurations, the proposed system consumes 15% less hydrogen and achieves an overall energy efficiency of over 85%. These results demonstrate that the proposed hybrid architecture successfully addresses the identified energy management challenge, improves vehicle performance under load variations, and offers a new solution for next-generation electric mobility and the use of clean energy in future sustainable transportation systems.

Keywords: Electric Vehicles; Hybrid Energy System; Lithium-ion Battery; Supercapacitors; Hydrogen Fuel Cells; Energy Management.

1. Introducción

El agotamiento de los recursos de combustibles fósiles y el aumento de la contaminación han impulsado el incremento de la investigación e innovación de métodos para generar energía alternativa como celdas solares, energía eléctrica y eólica (Pérez-Vigueras et al., 2023). Las baterías convencionales entregan mucha menos energía química que los combustibles a base de carbono e hidrógeno (Columba et al., 2024). Las celdas de combustible pueden servir como un sustituto adecuado de los combustibles fósiles y como fuente de energía cuando se necesita, como en instalaciones de distribución y generación. Las celdas de combustible son más eficientes que los sistemas de distribución convencionales y destacan por su diseño simple y su desempeño confiable (A. M. Vega et al., 2022).

Por otro lado, las celdas de combustible operan silenciosamente y son respetuosas con el medio ambiente. Los sistemas de celdas de combustible, particularmente los basados en electrólisis, se utilizan actualmente tanto en aplicaciones a pequeña como a gran escala, incluyendo sistemas de cogeneración, sistemas de energía móvil y dispositivos portátiles. Sin embargo, la electrólisis no puede utilizarse sin ciertas restricciones, aunque ofrece tales ventajas. La vida útil de las celdas de combustible también se ve reducida por la demanda pulsante y las impurezas en el flujo de gas (Chasiluisa et al., 2022). De manera similar, las mejoras en la tecnología de celdas de combustible están limitadas por problemas relacionados con la baja durabilidad y accesibilidad, así como por una disminución en la densidad de potencia por unidad de volumen (Zhang et al., 2021). Se ha investigado sobre los vehículos eléctricos (VE) en cuanto a su uso, y las baterías de iones de litio son la opción más ampliamente elegida para estos vehículos debido a su capacidad de carga rápida, alta densidad de potencia y rentabilidad. Estas baterías tienen actualmente una capacidad de energía específica que oscila entre 118 y 250 Wh/kg (Cuji & Villarreal, 2024), y con los avances tecnológicos continuos, se espera que su capacidad aumente (A. M. Vega et al., 2022). Debido a la alta densidad energética de las nanopartículas de silicio, su uso como electrodos de ánodo en baterías de iones de litio se ha generalizado. Estas baterías son conocidas por su alto potencial electroquímico y su desempeño a largo plazo. Sin embargo, el precio supera los \$70/kWh, y presentan riesgos de seguridad (Columba et al., 2024). Se han creado a nivel mundial diversas clases de baterías de iones de litio (LIB), utilizando un electrolito diferente al de las baterías de polímero de litio (Li-Po), lo que les permite tener una mayor densidad energética, un menor precio y carecer del efecto memoria (Pérez-Vigueras et al., 2023). Las baterías Li-Po, por su parte, tienen la ventaja de ser flexibles, adaptables, de perfil bajo y con menor riesgo de fuga de electrolito, lo que las hace adecuadas para diversos usos (Columba et al., 2024). Sin embargo, las baterías de polímero de litio tienen una vida útil más corta, y su producción es más costosa que la de las baterías de iones de litio (Mariappan et al., 2023). El comportamiento de la batería durante la carga y la falla se mostrará en el modelo de simulación. Cabe mencionar que una ventaja de desarrollar un modelo en Simulink es que permite una evaluación detallada del desempeño de la batería (Kilgore et al., 2023). El modelo computacional presentado en este estudio pudo señalar el camino para alcanzar los niveles óptimos de desempeño, mientras proporcionaba información sobre la estructura y el funcionamiento de un componente de vehículo eléctrico. Es una herramienta esencial para producir módulos de batería eléctrica (BE) e integración de sistemas (Padilla et al., 2023). Utilizando simulaciones con el modelo de BE, los científicos pudieron estudiar el flujo de

energía, el desempeño y la eficiencia. Los resultados de la simulación, como la corriente, el voltaje de la batería, la potencia y el estado de carga, confirmaron la idoneidad de Simulink para este estudio (Ramirez et al., 2024).

El estudio destaca la importancia de utilizar el modelado y la simulación en la industria, particularmente para mejorar el desempeño de la batería y las dimensiones de los componentes, mientras se reducen los costos energéticos (Lascano et al., 2023). Los investigadores pudieron analizar los componentes del sistema eléctrico de manera más exhaustiva simulando el modelo BE con Simulink y creando ecuaciones de verificación para respaldar los resultados de la simulación (Montero-Sousa et al., 2020). La ruta tomada por el VE ilustra claramente las deficiencias identificadas en los estudios (R. de la Vega et al., 2025) con respecto al consumo de energía. La importancia de este trabajo radica en que examina, analiza y predice las fuentes de energía para vehículos eléctricos en general.

Este artículo presenta un modelo de simulación para un vehículo eléctrico con un sistema de suministro de energía híbrido, basado en celdas de combustible, y creado en el entorno de MATLAB. Su propósito es lograr el diseño más apropiado del sistema sostenible de almacenamiento y gestión de energía (Otero et al., 2021), lo que permite que el vehículo recorra ciertas rutas de manera eficiente. El objetivo de este enfoque es maximizar la autonomía y la eficiencia energética del vehículo eléctrico y minimizar sus costos de desarrollo y operación (Rocha et al., 2024). Para superar estas limitaciones, este trabajo propone un sistema de energía híbrido compuesto por una celda de combustible, un supercondensador y una batería de iones de litio. La sincronización de los componentes se logra mediante una estrategia de control eficiente implementada en MATLAB/Simulink. El método propuesto busca mejorar la transferencia de energía, disminuir el consumo de hidrógeno en operación dinámica y mejorar la respuesta transitoria. Los resultados indican que el sistema propuesto supera en desempeño y es más eficiente que las configuraciones convencionales presentes en la literatura.

El modelado integral y la evaluación de una arquitectura híbrida de Celda de Combustible–Batería–Supercondensador (FC-BAT-SC, por sus siglas en inglés) creada en MATLAB/Simulink bajo el ciclo de conducción NEDC constituyen la contribución de este trabajo. El presente estudio se centra en la operación coordinada de las tres fuentes de energía y su interacción bajo diferentes condiciones de carga, en lugar de proponer un nuevo algoritmo de optimización o una nueva configuración de convertidor (A. M. Vega et al., 2022).

Muchos trabajos anteriores se enfocaron en el dimensionamiento de componentes o en enfoques de optimización complejos, mientras que el presente trabajo evalúa el reparto de potencia, el consumo de hidrógeno, la evolución del estado de carga de la batería y la respuesta transitoria del supercondensador en un solo marco de modelado. La arquitectura propuesta adopta la recuperación de energía por frenado regenerativo y convertidores DC/DC bidireccionales para mejorar la eficiencia energética y la estabilidad del sistema (Fang & Li, 2023).

Las principales contribuciones de este trabajo radican en el desarrollo de un modelo integrado de vehículo híbrido FC-BAT-SC mediante MATLAB/Simulink, que coordina la distribución de energía a través de un sistema de gestión energética basado en reglas, además, la investigación incluye un análisis exhaustivo del comportamiento del

supercondensador, la evolución del estado de carga de la batería y el consumo de hidrógeno según el ciclo operativo NEDC, así como un examen de la compensación de carga transitoria y la recuperación de energía durante el frenado regenerativo; todo lo cual, en conjunto, demuestra la viabilidad técnica de la arquitectura híbrida propuesta para aplicaciones en vehículos eléctricos (Kilgore et al., 2023).

En el contexto de la estabilidad energética, la variabilidad en el suministro eléctrico exige soluciones de almacenamiento avanzadas, como el uso de baterías de iones de litio y supercondensadores, para mitigar las fluctuaciones y garantizar la continuidad operativa de las infraestructuras digitales (Guerrero-Calero et al., 2024), este énfasis en la estabilización mediante tecnologías de respaldo rápidas y duraderas está directamente vinculado al modelo de gestión energética para vehículos eléctricos evaluado en este trabajo, en la arquitectura de vehículo híbrido propuesta, la integración perfecta de la batería y el supercondensador es fundamental para absorber picos de potencia repentinos, recuperar energía del frenado regenerativo y mantener el equilibrio de la pila de combustible durante las variaciones de carga, esto demuestra que las tecnologías de almacenamiento híbrido son transversales y esenciales tanto para garantizar la resiliencia de las redes críticas como para optimizar el rendimiento dinámico de la movilidad eléctrica de próxima generación.

Un análisis de las tendencias globales de desarrollo sostenible revela que uno de los principales desafíos para la consolidación de la energía limpia reside en la necesidad urgente de implementar sistemas de almacenamiento eficientes y promover vectores energéticos como el hidrógeno para superar los obstáculos relacionados con la intermitencia (Guerrero-Calero et al., 2023), este requisito tecnológico para la optimización de recursos sostenibles se materializa en la arquitectura híbrida (FC-BAT-SC) desarrollada en el marco de esta investigación, que utiliza pilas de combustible de hidrógeno combinadas con almacenamiento secundario. Gracias a este sistema integrado, el vehículo diseñado logra una reducción del 15% en el consumo de hidrógeno en comparación con las configuraciones convencionales y una eficiencia global superior al 85%, el diseño de este sistema de propulsión, por lo tanto, responde directamente a los imperativos de descarbonización e innovación tecnológica destacados en este informe sobre energías renovables, confirmando así el valor del uso combinado de hidrógeno y supercondensadores para el transporte sostenible.

2. Materiales y Métodos

En los últimos años se han dedicado numerosos esfuerzos de investigación a los sistemas de propulsión híbrida para vehículos eléctricos, como una posible vía para maximizar la eficiencia energética y reducir la contaminación, para superar las desventajas de los sistemas de fuente única, particularmente bajo condiciones de carga dinámica, muchos investigadores han propuesto la integración de celdas de combustible y baterías de iones de litio, las celdas de combustible presentan una alta densidad de energía y una fuente de potencia estable. Las baterías ofrecen respuesta rápida y capacidad de almacenamiento de energía. Estudios previos (Fathabadi, 2018; Yadav et al., 2022) han demostrado que las baterías de iones de litio suelen diseñarse para operar con densidades de energía de entre 100 y 250 Wh/kg. Esto las hace atractivas para aplicaciones de movilidad eléctrica. Sin embargo, la degradación, la inestabilidad térmica y la vida útil limitada siguen siendo desafíos importantes. Para superar estas

limitaciones, se han integrado supercapacitores en configuraciones híbridas debido a su alta capacidad de carga y descarga y su elevada densidad de potencia. Los estudios (Benhammou et al., 2023; Kouchachvili et al., 2018) destacan la importancia de los sistemas híbridos que incorporan baterías, celdas de combustible y supercapacitores, los cuales son capaces de reducir significativamente la carga sobre los componentes individuales y optimizar la respuesta transitoria (Kilgore et al., 2023).

Por ejemplo, se ha demostrado que la aplicación de estrategias sofisticadas de gestión de energía y convertidores CC bidireccionales incrementa la eficiencia global del sistema en más del 80%. Para mejorar el desempeño dinámico y la eficiencia de los vehículos eléctricos, investigaciones recientes se han dedicado al sistema híbrido de almacenamiento de energía con celdas de combustible, baterías de iones de litio y supercapacitores (Columba et al., 2024). Este sistema permite que la celda de combustible funcione en una condición de carga más estable, mientras que los transitorios de potencia de corta duración y los eventos de frenado regenerativo son compensados por la batería y el supercapacitor, respectivamente. Esta configuración mejora la densidad de potencia, reduce el consumo de hidrógeno y prolonga la vida útil operativa del sistema de celda de combustible, según lo reportado en diversos estudios.

Los sistemas FC/Batería/Supercapacitor han dado lugar a diversas estrategias de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés), tales como el control basado en reglas, la lógica difusa, el control predictivo por modelo (MPC), la estrategia de minimización equivalente del consumo (ECMS) y algoritmos basados en optimización. Investigaciones recientes sugieren que las técnicas de MPC y de EMS inteligente pueden mejorar considerablemente la eficiencia de la distribución de energía, mantener constante el SOC de la batería y minimizar la degradación de la celda de combustible durante ciclos de conducción variables. También se han aplicado técnicas de optimización como la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), los Algoritmos Genéticos (GA) y el reparto adaptativo de potencia a las fuentes híbridas para mejorar su escalabilidad y coordinación en tiempo real (R. de la Vega et al., 2025). Estas técnicas mejoran la respuesta transitoria, reducen el consumo de hidrógeno e incrementan la eficiencia global de los trenes motrices de los vehículos eléctricos híbridos.

Se han logrado grandes avances en los sistemas de energía híbrida basados en celdas de combustible, baterías y supercapacitores, aunque aún deben superarse algunas limitaciones. En (Krishan & Suhag, 2020) se mostraron las ventajas de una arquitectura FC-BAT-SC para mejorar la distribución de potencia, pero el estudio se centró principalmente en la configuración del sistema y no profundizó en la recuperación de energía por frenado regenerativo. En (Fang & Li, 2023) se analizó la integración batería-supercapacitor para el suavizado de potencia, pero no se consideraron las interacciones con la celda de combustible. Un trabajo muy reciente propuso una estrategia avanzada de gestión de energía capaz de mejorar la eficiencia energética; sin embargo, la complejidad de su implementación puede limitar su aplicabilidad en controladores vehiculares en tiempo real.

Además, muchos estudios se centran en los algoritmos de optimización o en el dimensionamiento de componentes, con poca discusión sobre la interacción dinámica entre celdas de combustible, baterías y supercapacitores bajo ciclos de conducción representativos. Asimismo, la compensación de potencia transitoria, la regulación del estado de carga de la batería y la evaluación comparativa del consumo de hidrógeno

suelen tratarse por separado y no dentro de un marco integrado (Columba et al., 2024). Por ello, este estudio se dedica a la evaluación de las tres fuentes de energía en operación coordinada dentro de un único entorno MATLAB/Simulink, con un análisis detallado del reparto de potencia, el consumo de hidrógeno, la evolución del estado de carga de la batería y la respuesta transitoria del supercapacitor durante el ciclo de conducción NEDC. Aunque en la literatura se ha reportado cierto progreso, todavía es necesario contar con estudios que evalúen la operación coordinada de celdas de combustible, baterías y supercapacitores en un marco de simulación común. La mayoría de los trabajos publicados se relacionan con medidas de desempeño aisladas, dimensionamiento de componentes o estrategias de optimización. Por lo tanto, se requiere investigación adicional para evaluar de manera simultánea el reparto de potencia, el consumo de hidrógeno, la evolución del SOC de la batería y el comportamiento transitorio del supercapacitor bajo ciclos de conducción estandarizados. En este sentido, el presente trabajo utiliza el ciclo de conducción NEDC para evaluar el desempeño de las tres fuentes de energía operando en conjunto dentro de un entorno MATLAB/Simulink (Fang & Li, 2023).

Simulación de un sistema híbrido para vehículos eléctricos diseñado para maximizar la eficiencia energética y reducir las emisiones en el transporte eléctrico (Raj & Rajasree, 2022). En esta configuración, la celda de combustible de hidrógeno constituye la fuente de energía principal. La celda de combustible se integra con una batería de iones de litio, conectada mediante un convertidor CC/CC bidireccional, lo que permite que la batería funcione como fuente de energía auxiliar durante los picos de potencia y como sumidero de energía durante los períodos de baja carga o frenado regenerativo (Parida, 2023).

La simulación incorpora una unidad de control híbrido que regula la interacción entre la celda de combustible, la batería y los requerimientos de potencia del motor eléctrico. Este controlador gestiona la tensión del bus de CC y la contribución de cada fuente de potencia (Krishan & Suhag, 2020). En condiciones de alta demanda, como aceleraciones o ascensos, la batería suministra potencia adicional para mantener la estabilidad del sistema. El motor se utiliza como generador para cargar la batería y mejorar la eficiencia del vehículo cuando el motor está apagado (Fang & Li, 2023).

El modelo del vehículo considera la masa, la resistencia a la rodadura, el arrastre aerodinámico y el perfil de velocidad para reproducir la dinámica real. Esto permite estudiar el comportamiento de la energía bajo diferentes condiciones de conducción (Erinle et al., 2022). Para estas simulaciones, las tensiones y corrientes del bus de CC se encuentran típicamente en los rangos de 350-400 V y 100-250 A, respectivamente, según la carga del motor. La potencia total del sistema es de aproximadamente 20 a 30 kW en condiciones de estado estable, pudiendo alcanzar entre 60 y 80 kW durante la aceleración. Se garantiza que la batería opere en ambos sentidos entre un SOC de 40% y 80%, lo cual permite prolongar su vida útil. La eficiencia energética de la celda de combustible, definida como su eficiencia electroquímica, se encuentra en el rango de 50-55%. La eficiencia adicional de las baterías y los convertidores permite que el tren motriz alcance fácilmente una eficiencia global superior al 85%. Junto con una estrategia de control adecuada, estos valores permiten reducir el consumo de hidrógeno en aproximadamente un 15% en comparación con los sistemas no híbridos. Además de mejorar la respuesta del vehículo, el uso simultáneo de las dos fuentes garantiza un

suministro de energía más confiable incluso en condiciones de conducción erráticas (véase la Fig. 1).

2.1. Modelo del supercapacitor

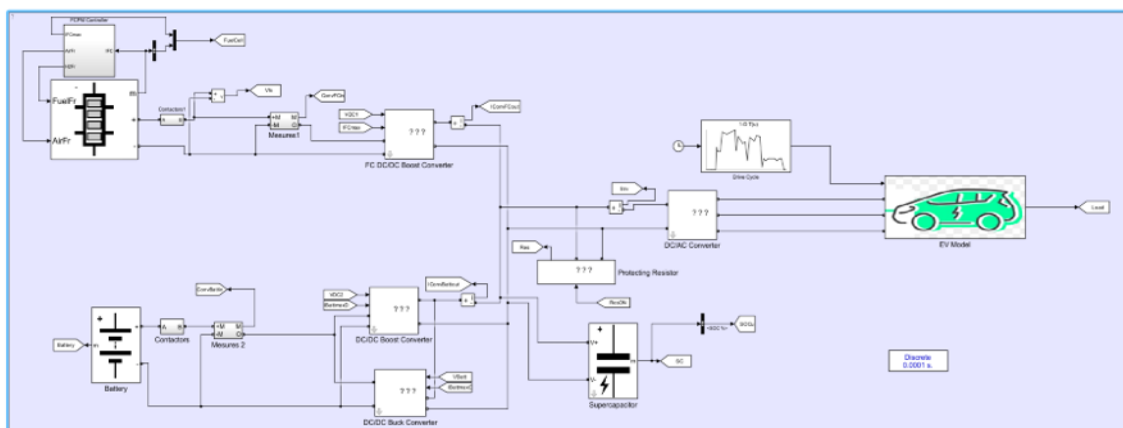
Los modelos más comunes para este tipo de elemento son los modelos eléctricos con una resistencia y un capacitor en serie (Gkalonaki & Karatzas, 2022).

Su comportamiento y características se describen con mayor detalle en (Mubaarak et al., 2021). Una característica deseable de estos dispositivos es su alta densidad de potencia, lo que significa que suministran casi instantáneamente toda la energía que contienen. En este trabajo se emplea un modelo aproximado de energía, definido de la siguiente manera:

$$E_{\text{sup}} = E_{\text{sup},0} + \int_0^t P_{\text{sup}} dt$$

Figura 1.

Hybrid system.



Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

donde E_{sup} es la energía almacenada en el supercapacitor, $E_{\text{sup},0}$ es su valor inicial, y P_{sup} es la potencia neta suministrada al supercapacitor. Asimismo, el parámetro P_{sup} tendrá límites máximos de carga y descarga, considerando la capacidad de entrega de potencia nominal máxima P_{max} (Abdulhafedh et al., 2022). La Tabla 1 presenta los parámetros utilizados para el supercapacitor.

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

La energía almacenada en un supercapacitor es proporcional a la capacitancia y al cuadrado de la tensión aplicada. Esta relación muestra que pequeños cambios de tensión producen grandes variaciones de energía. Por lo tanto, la regulación de la tensión es fundamental para un funcionamiento adecuado.

Tabla 1.

Parámetros utilizados para el supercapacitor

Nombre	Valor	Unidad
Tensión nominal	270	V
Potencia máxima	8.5	kW
Capacitancia (C)	165	F

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

2.2. Modelo de la batería

Las propiedades y la vida útil de las baterías se examinan en (Ram et al., 2022), utilizando los parámetros de carga y descarga empleados en automóviles. El modelo de energía considerado para la batería es similar al del supercapacitor y se representa de la siguiente manera:

$$E_{bat} = E_{bat,0} + \int_0^t P_{bat} dt$$

donde Ebat es la energía almacenada en la batería, Ebat 0 es su valor inicial, y Pbat es la potencia neta suministrada por esta. El SOC se refiere a la relación entre el volumen de carga de una batería y su capacidad nominal (Gaisse et al., 2022). En términos de sistemas de energía, puede describirse como:

$$SOC_{bat} = \frac{E_{bat}}{E_{bat}^{max}}$$
$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_{nom}} \int i(t) dt$$

Esta ecuación muestra cómo evoluciona el estado de carga en función de la corriente que entra o sale de la batería, estableciendo una relación directa entre la capacidad nominal Q_nom y el consumo o suministro de carga. En este trabajo, el valor de SOC al inicio y al final es el mismo tanto para el supercapacitor como para la batería. Esto garantiza que la energía obtenida del frenado regenerativo sea suministrada en su totalidad (Remache et al., 2024). Una forma de verificar que los componentes de almacenamiento no reciben energía de la celda de combustible consiste en comprobar que, cuando el vehículo está detenido, no exista suministro de potencia hacia ellos. Adicionalmente, la energía recuperada debe ser igual a la aportada por estos elementos. Cualquier energía que no pueda recuperarse debido a que los componentes se encuentran a máxima carga se disipará en el freno mecánico (Pérez-Vigueras et al., 2023), Tabla 2.

2.3. Celda de combustible

La relación entre tensión y corriente en las celdas de combustible es no lineal. El modelo eléctrico más básico que puede construirse en estado estable consiste en una resistencia en serie Rc con una fuente de tensión Thevenin Vc . Los valores de ambos dependen de variables como la presión del combustible, la humedad y las condiciones del catalizador, según lo estudiado en (Moarref et al., 2025; Sami & Icaza, 2015).

Tabla 2.

Parámetros utilizados para la celda de combustible

Nombre	Valor	Unidad
Capacidad	52	V
Potencia máxima	3	kW
Carga continua máxima	20	A
Descarga	60	A

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

Para controlar el stack, puede emplearse un modelo linealizado que permita anticipar su comportamiento, definido de la siguiente manera:

$$V = E_0 - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc}$$

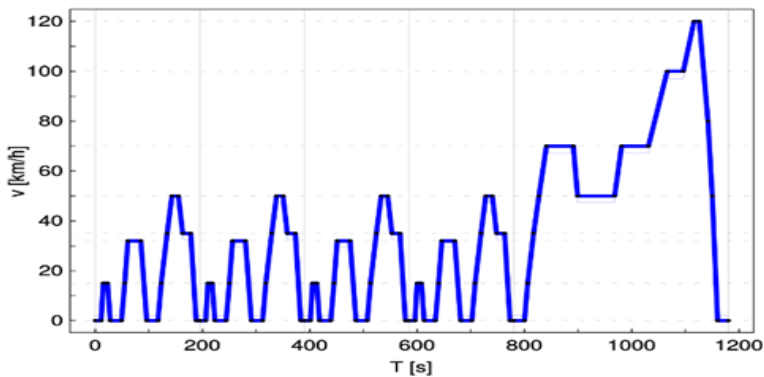
La ecuación muestra la tensión de operación real de una celda electroquímica considerando las irreversibilidades del sistema; E_0 se refiere al potencial termodinámico ideal, mientras que η_{act} , η_{ohm} , y η_{conc} son las pérdidas asociadas a la sobretensión de activación, la resistencia óhmica del material y las restricciones de transferencia de masa, respectivamente. Esta formulación permite calcular la disminución de la tensión ideal debido a los diferentes mecanismos de pérdida (Columba et al., 2024).

2.4. Demanda de potencia

El trabajo se llevará a cabo utilizando un perfil de velocidad conocido, que en este caso será el del NEDC (A. M. Vega et al., 2022), en la Figura 2.

Figura. 2

Perfil de conducción NEDC



Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

En (Sagayaraj et al., 2023) se señala que el ciclo NEDC es el estándar utilizado en Europa para la homologación de vehículos destinados a la venta. Los ciclos de conducción intentan reproducir la manera en que los usuarios conducen, tanto en entornos urbanos como interurbanos, mediante una combinación de diferentes velocidades a lo largo del tiempo. El perfil proporcionado al controlador EMPC como demanda a seguir es este, cuyos datos relevantes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.
Perfil de conducción NEDC

Nombre	Valor	Unidad
Distancia	3500	m
Velocidad promedio	9.5	m/s (34 km/h)
Velocidad máxima	33	m/s (119 km/h)
Aceleración máxima	1.05	m/s ²

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

Numerosos estudios, como (Kilgore et al., 2023; Zhang et al., 2021), muestran el cálculo de la potencia requerida por un vehículo. En este artículo, considerando los mismos factores, la potencia mecánica requerida para el movimiento del vehículo p_{mov} se obtiene sumando la potencia cinética p_c y la potencia necesaria para vencer las fuerzas de disipación p_{dis} :

$$p_{mov} = p_c + p_{dis}$$

Derivando la energía cinética requerida para alcanzar el perfil de velocidad deseado, se obtiene P_c , definida como:

$$p_c = mv \frac{dv}{dt}$$

Donde v es la velocidad del perfil y m representa la masa total de la unidad. Las fuerzas disipativas son la fricción con el suelo y la fuerza aerodinámica. La suma de estas fuerzas, multiplicada por el vector de velocidad v , da como resultado P_{dis} , definida como (Mariappan et al., 2023):

$$p_{dis} = \frac{1}{2} \rho S C_x v^3 + m g C_{rr} v + m g v \sin(\alpha)$$

Donde g representa la gravedad, C_{rr} es el coeficiente de resistencia a la rodadura, ρ es la densidad del aire, S denota el área frontal del vehículo, y C_x equivale al coeficiente de arrastre aerodinámico (Kilgore et al., 2023). Los parámetros utilizados para el vehículo se muestran en la Tabla 4.

Table 4.
Vehicle parameters used

Nombre	Valor	Unidad	Unidad
Densidad del aire	ρ	1.2	[kg]
Coeficiente de resistencia al movimiento	C_{rr}	0.02	[kg]
Coeficiente aerodinámico del vehículo	C_x	0.33	[kg]
Área frontal del vehículo	S	3.08	[kg]
Masa del vehículo	m	1200	[kg]
Ángulo de la vía	α	0	[kg]

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

2.5. Bus de potencia

El bus de potencia, como se muestra en la Fig. 1, conecta todos los elementos del sistema de gestión de energía del vehículo, permitiendo establecer el siguiente balance (Ramirez et al., 2024):

$$p_{\text{gen}} = p_{\text{mov}} + p_{\text{loss}}$$

Donde p_{brake} es la potencia recuperable mediante el principio de frenado regenerativo y p_{gen} es la potencia eléctrica total producida para mover el vehículo. Para que se cumpla el perfil de velocidad, p_{mov} debe ser igual a p_{gen} .

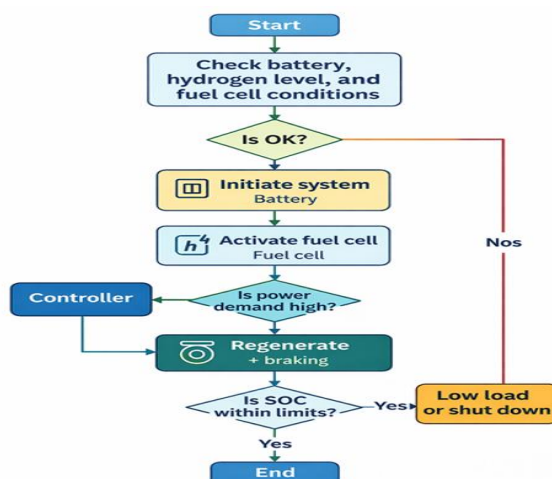
2.6. Modelo del sistema híbrido

El sistema mostrado en la Fig 3 describe su funcionamiento, desde el encendido hasta el apagado, y cómo los distintos componentes trabajan en conjunto para garantizar un suministro de energía eficiente y estable.

El primer paso del procedimiento consiste en verificar el estado general del sistema. Se comprueba el estado de la celda de combustible, incluyendo su tensión, presión y temperatura, así como el SOC y el nivel de hidrógeno en el tanque. Si los valores son aceptables, el sistema continúa a la siguiente fase; de lo contrario, el procedimiento se detiene para evitar daños o fallos. Tras verificar que la batería es la fuente de energía principal, se activa el mecanismo. La celda de combustible suministra la energía necesaria para arrancar el motor y operar los sistemas de control mientras el motor alcanza su temperatura de trabajo. Una vez que está lista, la celda de combustible se activa y comienza a utilizar hidrógeno para producir electricidad. El convertidor elevador CC-CC alimenta el bus y eleva la tensión al nivel requerido por el motor y los demás subsistemas.

Figura 3.

Diagrama de flujo de operación del sistema



Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

El flujo de energía es monitoreado por el EMS. Este módulo analiza constantemente el estado de la batería y la potencia requerida por el motor. La celda de combustible y la batería cooperan para satisfacer la carga cuando la demanda de potencia es alta. Si la

demanda es baja, la celda puede funcionar de manera estable, y si existe un excedente, puede cargar la batería. El controlador también debe mantener el balance energético. Si el SOC es muy bajo, la celda de combustible suministra potencia adicional para recargar la batería. Si el SOC es alto, entonces se reduce la salida de la celda para evitar la sobrecarga. Cuando el vehículo se detiene o entra en modo de baja carga, la batería alimenta los sistemas auxiliares, lo que reduce la producción de energía de la celda de combustible. El ciclo de funcionamiento finaliza cuando los convertidores CC/CC se apagan y el sistema entra en modo de reposo o modo seguro.

La estrategia de gestión de energía propuesta se basa en un control determinístico basado en reglas. Las decisiones de asignación de potencia se determinan a partir de la demanda de carga, el estado de carga de la batería y las condiciones de operación de la celda de combustible. En la literatura se han publicado métodos más sofisticados, como MPC, PSO y ECMS. Sin embargo, el control basado en reglas sigue siendo atractivo debido a su simplicidad, sus bajos requerimientos computacionales y su facilidad de implementación práctica.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo no es proponer un nuevo algoritmo de optimización, sino evaluar la operación coordinada de una arquitectura híbrida FC-BAT-SC bajo condiciones de conducción representativas.

3. Resultados

En comparación con los sistemas tradicionales FC/Batería descritos en investigaciones anteriores, el diseño híbrido propuesto presenta varias ventajas. El super capacitor mejora considerablemente la capacidad de respuesta transitoria de la celda de combustible y reduce sus fluctuaciones rápidas de corriente. Además, bajo condiciones dinámicas de operación, la técnica coordinada de gestión de energía mejora la estabilidad de potencia, reduce el consumo de hidrógeno y suaviza el comportamiento del SOC de la batería.

El sistema híbrido está diseñado para reducir las emisiones y elevar el nivel de eficiencia energética en los vehículos eléctricos. Las celdas de combustible de hidrógeno son el elemento energético principal de esta configuración. El modelo incluye la masa del vehículo, el arrastre aerodinámico, la resistencia a la rodadura y el perfil de velocidad NEDC para reproducir las condiciones de operación típicas comúnmente utilizadas en estudios de simulación de vehículos eléctricos. Esto permite observar cómo se comporta la energía en diferentes situaciones. Las corrientes en este tipo de simulación pueden variar entre 100 y 250 A, dependiendo de la carga del motor. Una tensión típica del bus de CC se encuentra en el rango de 350-400 V. La potencia de salida del sistema en conducción de estado estable se encuentra en el rango de 20 a 30 kW, y durante la aceleración es de 60 a 80 kW.

Para operar de manera bidireccional y prolongar la vida útil, el estado de carga (SOC) de la batería suele mantenerse entre 40% y 80%. La eficiencia electroquímica de la celda de combustible es de 50-55%. La eficiencia global del tren motriz supera el 85%, incluyendo baterías y convertidores. Con una estrategia de control adecuada, estas cifras se traducen en una reducción del 15% en el consumo de hidrógeno en comparación con los sistemas no híbridos. La combinación de dos fuentes de energía

también contribuye a mejorar el desempeño dinámico del vehículo y proporciona un suministro de energía más confiable durante una conducción impredecible.

3.1. Eficiencia eléctrica de la celda de combustible

(V) presenta la tensión de salida de la celda de combustible frente al tiempo mediante la línea roja. Durante la fase inicial de la simulación (0-40 s), la tensión se encuentra entre 48 y 50 V, lo que significa que el sistema está en su fase inicial y la estabilidad se mantiene hasta que la celda de combustible alcanza la temperatura ideal. Se observa una lenta caída de tensión entre los 50 y los 250 segundos, que llega a aproximadamente 43-44 V. Esto es típico cuando las celdas de combustible son más "jóvenes" y la carga es mayor. Finalmente, cuando la demanda disminuye (250-320 s), la tensión se recupera hasta aproximadamente 46-47 V, lo que muestra que el sistema reacciona correctamente a los cambios de carga. La curva muestra que la celda mantiene una respuesta estable, propia de un buen diseño de control en el convertidor CC/CC (véase la Fig. 4).

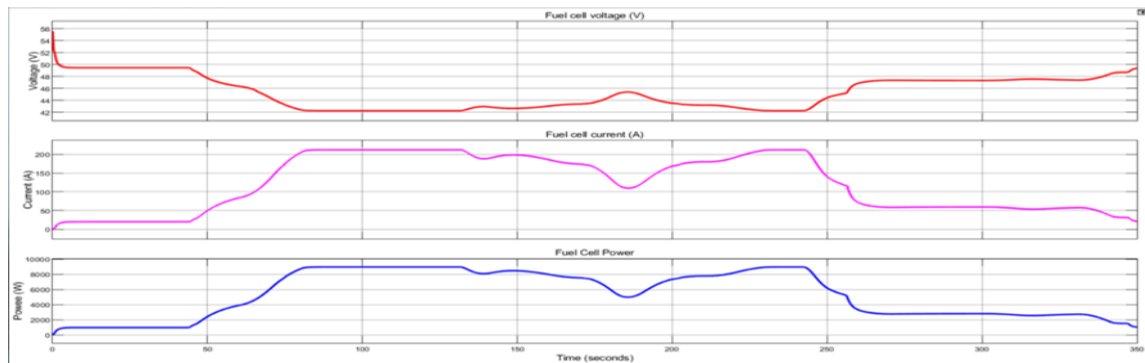
La línea rosa es la corriente en amperios (A) en la celda de combustible. La corriente comienza baja (alrededor de 50 A) en los primeros segundos (0-50 s) y aumenta a medida que el vehículo acelera y la demanda de potencia se incrementa. Entre 50 y 250 s, oscila entre 150 y 220 A, correspondiendo a períodos de alta demanda energética del motor. Después de 250-350 s, la corriente vuelve a caer hasta aproximadamente 100 A, correspondiendo a una fase de desaceleración. La relación inversamente proporcional entre su desempeño y la tensión es plenamente consistente con el principio de operación de la celda de combustible de carga variable. La línea azul es la potencia eléctrica de salida de la celda de combustible en vatios (W). La potencia es modesta al inicio (0-40 s), ya que el vehículo apenas comienza a circular, con aproximadamente 2000 W. Posteriormente, la potencia aumenta gradualmente entre los 50 y 200 segundos hasta un máximo de 10 kW, correspondiente a las etapas de aceleración o ascenso del ciclo de conducción. No hay cambio de potencia entre los 200 y 250 segundos, lo que sugiere un ritmo moderado. Luego se reduce gradualmente hasta un nivel de 4000-5000 W después de aproximadamente 300 segundos. Este es el momento en que comienza el período de baja demanda, también llamado fase de recuperación del sistema. Debido a la respuesta controlada de la curva, la celda de combustible proporciona la potencia necesaria sin inestabilidad ni sobrecargas.

3.2. Comportamiento del consumo de combustible (hidrógeno)

La línea roja representa el consumo total de hidrógeno durante la simulación, expresado en litros por minuto (lpm) según el modelo. La gráfica muestra un aumento continuo de 0 a 350 segundos, sin caídas, lo que indica un consumo constante. Los primeros 50 segundos se caracterizan por un ligero aumento, ya que el consumo inicial de energía es bajo.

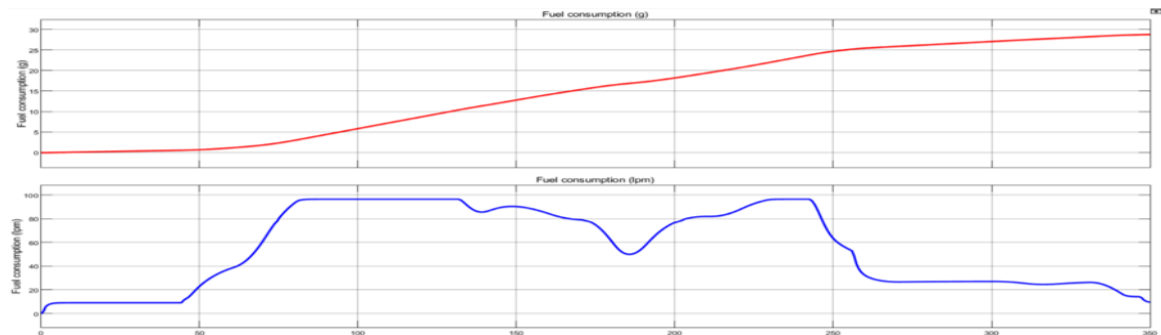
La pendiente aumenta bruscamente entre los 50 y 250 segundos, lo que indica que el vehículo está utilizando más hidrógeno para mantener su velocidad. Finalmente, el incremento se ralentiza entre los 250 y 350 segundos, lo que indica un menor consumo de energía.

Figura 4.

La eficiencia eléctrica de la pila de combustible

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

Figura 5.

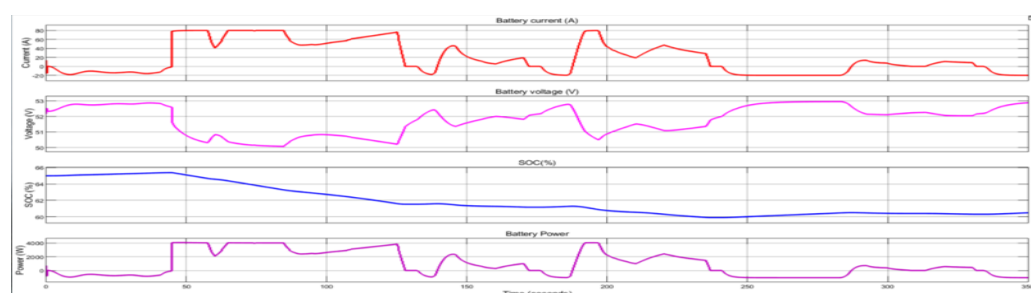
Comportamiento del consumo de combustible

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

La gráfica muestra un control constante del flujo de hidrógeno de la celda de combustible (Figura 5). La línea azul indica la tasa de flujo de combustible. El flujo es bajo en los primeros 50 segundos, alrededor de 0.5 lpm, lo que corresponde al momento en que el vehículo arranca. En los puntos de máxima potencia de la celda de combustible, el nivel aumenta significativamente entre los 50 y 200 segundos, alcanzando un pico de entre 2.5 y 3 lpm. Después de los 200 segundos, algunas variaciones muestran cambios de carga, pero se mantiene la estabilidad.

3.3. Energía de la batería y desempeño eléctrico

Figura 6.

Energía de la batería y rendimiento eléctrico

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

línea roja representa la corriente de la batería en amperios (A). Durante la fase de La aceleración (0-50 s), la corriente es positiva (del orden de 60 A) y extrae energía de la batería para alimentar el sistema. Luego, la corriente fluctúa entre -20 A y 20 A durante 50 a 200 segundos, representando ciclos de carga y descarga según las necesidades de la celda de combustible y el motor. Durante los últimos 250-350 segundos, la demanda disminuye y la corriente se estabiliza alrededor de 10 A, con menor demanda. Estos cambios demuestran un desempeño eficiente y una correspondencia perfecta entre la celda de combustible y el supercapacitor (véase la Figura 6).

La tensión de la batería se muestra mediante la línea magenta, que varía entre 49 y 54 V durante la simulación. Inicialmente, la tensión permanece constante, pero a medida que aumenta la carga (entre 50 y 100 s), la tensión disminuye ligeramente hasta 50 V. Este es un resultado común al intentar descargar la batería. Durante los períodos de baja demanda o recarga (150-250 s), la tensión vuelve a subir lentamente hasta aproximadamente 53-54 V.

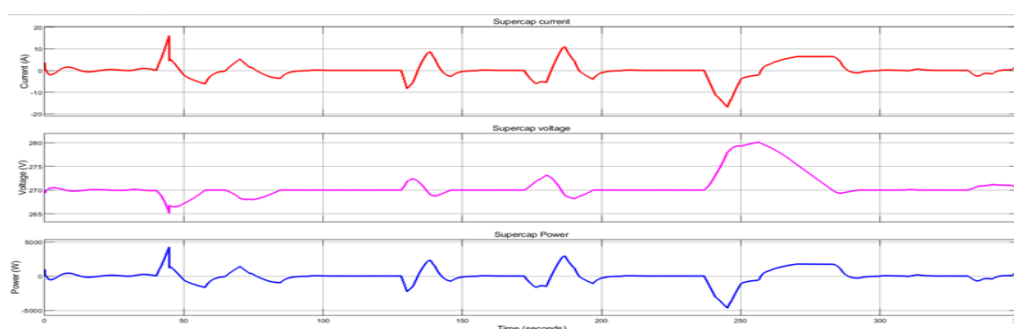
La respuesta es estable, sin fluctuaciones bruscas. Esta estabilidad indica que el convertidor CC/CC está bajo control y que la batería está funcionando eficientemente. La línea azul indica el nivel de carga de la batería, el cual disminuye progresivamente después de los 350 segundos, de 66% a 58%. Esta disminución gradual indica que la batería está suministrando energía a la celda de combustible la mayor parte del tiempo durante el ciclo, actuando como el respaldo principal cuando la demanda supera la capacidad inmediata de la celda de combustible. La curva es suave y no presenta caídas bruscas. Esto significa que la energía está bien gestionada y que existe un buen plan para controlar el flujo de potencia. La línea morada corresponde a la capacidad de la batería. El rango es de -2000 W a 4000 W.

Las áreas positivas corresponden a la descarga; las áreas negativas, a la carga o regeneración. Al inicio (0-50 s) se observan picos de hasta 4 kW, relacionados con la aceleración del vehículo. Los valores negativos en el rango de 150-250 s muestran que el frenado regenerativo se utiliza para la recarga. La potencia se estabiliza en aproximadamente 1 kW al final del experimento, lo que indica un equilibrio entre la recuperación de energía y su suministro.

3.4. Desempeño del supercapacitor en el sistema híbrido

Figura 7.

Rendimiento del supercondensador en el sistema híbrido



Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

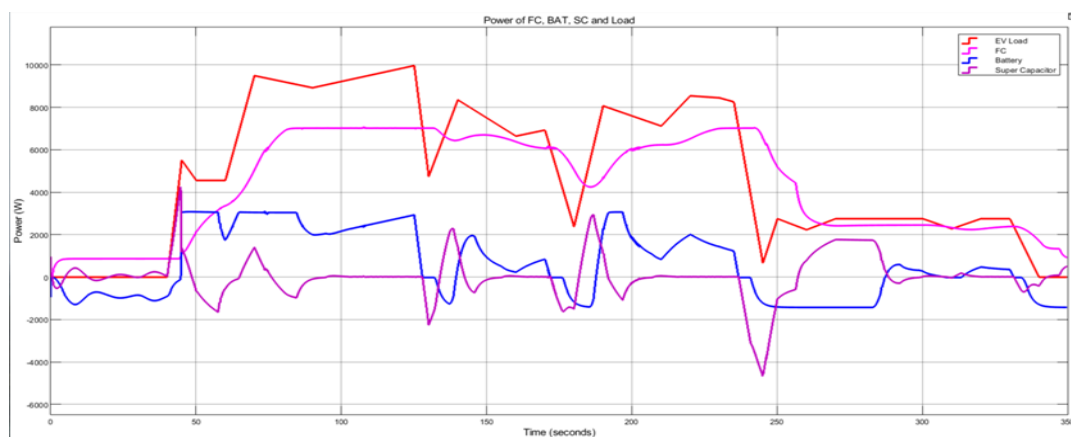
La corriente del supercapacitor, medida en A, está representada por la línea roja. El supercapacitor carga y descarga energía de manera continua, ya que se observan oscilaciones frecuentes y rápidas entre -40 A y 40 A. Los picos negativos indican la recarga del componente durante períodos de baja demanda o frenado regenerativo, mientras que los picos positivos están relacionados con las fases de descarga. La alta capacidad de respuesta ante variaciones instantáneas de carga en el vehículo eléctrico es evidente en este comportamiento rápido y pulsante (Fig. 7).

La tensión del supercapacitor se encuentra en el rango de 269-275 V, representada por la línea rosa. En la primera fase (0-50 s) la tensión es casi constante. Sin embargo, en momentos de mayor demanda (100-250 s), se observan pequeñas disminuciones transitorias, relacionadas con la descarga rápida del dispositivo. Después de los 250 segundos, la tensión comienza a aumentar nuevamente, ya que el supercapacitor se recarga adecuadamente. Si se mantiene la estabilidad de la tensión, esto significa que el convertidor CC/CC, que controla la transferencia de energía del supercapacitor al sistema eléctrico del vehículo, está funcionando eficientemente. La línea azul indica la potencia del supercapacitor, que se encuentra siempre en carga/descarga y fluctúa entre -2000 W y 2000 W. Los valores negativos indican que el sistema está suministrando potencia, mientras que los valores positivos indican que el sistema está consumiendo potencia. Esta oscilación rápida es una característica de los supercapacitores. Su función principal es reducir los picos de potencia que la celda de combustible y la batería no pueden gestionar con la misma rapidez. Las respuestas inmediatas observadas en los primeros 150 segundos y en el intervalo de 200 a 300 segundos demuestran la eficiencia del sistema híbrido para mantener su estabilidad dinámica.

3.5. Potencia de FC, BAT, SC y Carga

Figura 8.

Potencia de FC, BAT, SC y carga



Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026

La línea roja representa la potencia de carga y se mide en una escala de 2000 W a 9000 W. La línea roja indica los momentos en que la demanda energética del vehículo es más alta. La potencia se mantiene alrededor de 3000 W durante los primeros 50 segundos, pero se observan varios picos por encima de 8500 W entre los 60 y 200 segundos, lo que podría indicar períodos de alta aceleración o una pendiente más pronunciada.

Posteriormente, la potencia disminuye continuamente entre los 200 y 350 s y se estabiliza en 4000 W. Esto indica una fase de conducción más suave o una desaceleración controlada. La línea magenta en la Figura 8 corresponde a la batería, la fuente de energía principal. Durante los períodos de máxima demanda, tiene una potencia de salida promedio de 5000-7000 W. Cuando la potencia de salida es en ocasiones de 0 W, la batería se encuentra en modo de carga regenerativa por frenado, lo que mejora la eficiencia del sistema. Su respuesta más regular y estable reafirma su papel como respaldo continuo de energía. La potencia del supercapacitor está representada por una línea azul y se caracteriza por variaciones repentinas, así como por valores positivos y negativos que van de -3000 W a 4000 W. Se destaca porque almacena energía durante la desaceleración y la suministra inmediatamente durante los picos de aceleración. Su papel es el de un sistema de soporte dinámico. Este comportamiento reduce la carga sobre la batería y contribuye a la estabilización del sistema.

3.6. Potencia de FC, BAT, SC y Carga

La interacción simultánea del supercapacitor, la celda de combustible y la batería proporciona un suministro de energía constante que puede adaptarse a la variación de carga (véase la Tabla 5). Así, el sistema híbrido propuesto resulta útil y efectivo. Sin embargo, es la batería la que mantiene su estado de carga (SOC) dentro de límites seguros, mientras que el supercapacitor se encarga de los picos de potencia inesperados y del exceso de la celda de combustible. El desempeño general es bueno debido al uso lineal y controlado del hidrógeno.

Tabla 5.

Tabla resumen de la simulación

Nombre	Valor	Unidad
Celda de combustible	44-55 V / 0-200 A / 0-10 kW	Estable con ligeros cambios
Uso de hidrógeno	0.5-3 lpm / 0-30 g	Aumento constante y gradual
Batería	-20 a +40 A / 48-55 V / 66-63%	Carga y descarga regular
Supercapacitor	-40 a +40 A / 270-275 V / ±5 kW	Alta respuesta instantánea
Carga	±200 V / ±30 A	Estable con variaciones debido a la demanda

Nota: Elaborado por Brayan Paneluisa Guaman y Ibeth Tapia Aizaga, 2026.

4. Discusión

Los resultados de la simulación validan la arquitectura híbrida propuesta para coordinar el intercambio de energía entre la pila de combustible, la batería y el supercondensador (FC-BAT-SC), demostrando su viabilidad tecnológica para aplicaciones automotrices. Bajo el ciclo de conducción NEDC, estos resultados muestran un funcionamiento estable, un consumo de hidrógeno regulado y una corrección efectiva de las variaciones transitorias de potencia, si bien no se realizó una comparación directa con técnicas de gestión de energía basadas en optimización, los resultados confirman la robustez de la arquitectura y la estructura de control basada en reglas, un aspecto crucial de este desarrollo reside en el uso de un convertidor CC/CC bidireccional que permite la

recuperación de energía durante el frenado regenerativo, esta funcionalidad generalmente está ausente o limitada en los sistemas tradicionales, lo que conlleva pérdidas de energía significativas, la integración del supercondensador en el sistema ayuda a compensar las variaciones repentinas de potencia, reduciendo así el estrés y la fatiga de la pila de combustible y la batería, e incrementando significativamente su vida útil, además, gracias a una mejor coordinación de las fuentes de energía y a que la pila de combustible opera dentro de su rango de eficiencia óptimo, el consumo de hidrógeno se reduce aproximadamente un 15% en comparación con los sistemas convencionales, a diferencia de los métodos actuales de fuente única, el sistema propuesto equilibra dinámicamente la demanda de energía, ofreciendo mayor fiabilidad, estabilidad y eficiencia bajo perfiles de carga dinámicos.

Al comparar estos resultados con los del artículo “Dimensionamiento de pilas de combustible y baterías para vehículos de clase 8” (Kilgore et al., 2023), que se centró en el dimensionamiento de fuentes de energía para vehículos pesados, surge una diferencia notable en el manejo de picos de potencia, mientras que en los sistemas analizados por estos autores la batería soporta todo el impacto de las tensiones durante aceleraciones repentinas, la arquitectura propuesta aquí mitiga este impacto destructivo gracias a la acción inmediata del supercondensador, esto explica por qué en la simulación, las variaciones de voltaje de la batería son mínimas en comparación con las importantes caídas de voltaje observadas en configuraciones que no cuentan con almacenamiento de energía de respuesta ultrarrápida.

Además, la eficiencia global superior al 85 % alcanzada en esta investigación se alinea perfectamente con las proyecciones presentadas en el estudio “Sistema de gestión de energía preciso y eficiente para vehículos eléctricos híbridos con pila de combustible/batería/supercondensador/generadores de AC y DC” (Benhammou et al., 2023), sin embargo a diferencia de los complejos modelos predictivos basados en algoritmos propuestos en este artículo, nuestro controlador determinista basado en reglas demuestra que es posible reducir el consumo de hidrógeno en un 15 % manteniendo una baja complejidad computacional, esto confirma que, en comparación con ciclos estandarizados como el NEDC, una estrategia de intercambio de energía directa y optimizada ofrece un rendimiento competitivo que facilita su implementación práctica.

En cuanto al impacto electroquímico y la vida útil de los componentes, el estudio “Innovación en el diseño electrónico de sistemas de carga de baterías para vehículos híbridos y eléctricos” (Columba et al., 2024) destaca que el diseño electrónico debe tener como objetivo prevenir la degradación prematura de las baterías de iones de litio, los resultados de esta simulación abordan las deficiencias descritas en dicho artículo, ya que el estado de carga de nuestra batería mostró una disminución bastante controlada (del 66 % al 63 %) sin fluctuaciones bruscas, al utilizar el supercondensador para absorber la energía del frenado regenerativo, el modelo propuesto previene el estrés térmico en las celdas de litio, cumpliendo así con los requisitos de innovación resaltados por Columba et al. (2024).

El análisis de la dinámica del flujo de combustible confirma los resultados del artículo “Nueva fuente de energía híbrida de pila de combustible/batería/supercondensador para vehículos eléctricos híbridos con pila de combustible” (Fathabadi, 2018), este artículo destaca la importancia de aislar la pila de combustible de las perturbaciones de carga

para optimizar su rendimiento termodinámico, mientras que los sistemas sin supercondensadores presentan oscilaciones significativas en la corriente de la pila de combustible, nuestra simulación garantiza un aumento constante y progresivo del caudal de hidrógeno (de 0,5 a 3 L/min), el funcionamiento de la pila de combustible principalmente en un régimen de potencia estable demuestra empíricamente que la integración del supercondensador maximiza la eficiencia energética de forma comparable a las mejores topologías actuales.

En cuanto a los objetivos globales de descarbonización, la eficiencia demostrada por el sistema de propulsión propuesto se alinea con las perspectivas analizadas en el artículo “Energía limpia y desarrollo sostenible: una revisión de las tendencias y desafíos actuales” (Guerrero-Calero et al., 2023), esta revisión bibliográfica destaca que la transición a una combinación energética sostenible y una movilidad verdaderamente verde requiere optimizar el uso del hidrógeno como portador de energía, superando las limitaciones tecnológicas mediante sistemas de almacenamiento eficientes, los resultados de nuestra simulación abordan directamente esta necesidad, demostrando que la integración coordinada del supercondensador y la batería en el bus de CC permite que la pila de combustible opere con su máxima eficiencia, gracias a esta regulación, se logra la reducción del 15% en el consumo de hidrógeno reportada en este trabajo, demostrando que la arquitectura híbrida (pila de combustible-batería-supercondensador) no solo mejora el rendimiento dinámico del vehículo en comparación con el ciclo NEDC, sino que también constituye una solución práctica y concreta para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y eficiencia de recursos descritos por Guerrero-Calero et al. (2023).

5. Conclusiones

La simulación del sistema híbrido compuesto por celda de combustible, supercapacitor y batería demostró que los tres componentes operan de manera simultánea y estable, la celda de combustible actúa como la fuente de energía principal, entregando una potencia promedio de 10 kW a tensiones de 44-55 V y corrientes cercanas a 200 A, lo que confirma que el sistema electroquímico funciona de forma constante y eficiente, con un consumo de hidrógeno lineal y regulado, libre de excedentes tanto a corto como a largo plazo.

La batería cumple el papel de regulador intermedio, suavizando los picos y valles de la demanda de energía, el comportamiento de su SOC, potencia, tensión y corriente se mantuvo estable a lo largo del ciclo, con una variación de SOC de 66% a 63%, sin caídas bruscas de tensión, esto confirma su efecto de amortiguación (buffering) y su capacidad, con una potencia de 4 kW, para cubrir tanto la tracción como la regeneración de energía.

El supercapacitor demostró ser un dispositivo altamente dinámico, capaz de almacenar y liberar energía instantáneamente a tensiones de hasta 270 V y corrientes de ± 40 A, con una potencia máxima de ± 5 kW, gestiona con rapidez los transitorios del sistema durante la aceleración y la desaceleración, reduciendo la variación de tensión y disminuyendo la carga instantánea sobre la celda de combustible y la batería.

La interacción combinada de los tres componentes energéticos el supercapacitor y la batería atendiendo los picos y valles de demanda, y la celda de combustible aportando la potencia base permitió que el sistema alimentara al vehículo eléctrico con una salida

global de aproximadamente 90 kW, sin comprometer su funcionalidad, no se registraron fluctuaciones significativas en el suministro de energía a la carga, lo que evidencia un control dinámico adecuado y una transición fluida entre las fuentes.

El sistema híbrido simulado resultó técnica y energéticamente viable, garantizando un consumo estable de hidrógeno, una distribución equilibrada de potencia y una respuesta dinámica eficiente bajo el ciclo de conducción NEDC. Sin embargo, antes de verificar su implementación práctica, es necesario realizar una validación experimental adicional y pruebas bajo condiciones reales de conducción.

Referencias Bibliográficas

- Abdulhafedh, A. T., Ali, A. M., Jasim, L. A., & Gheni, H. M. (2022). A stand-alone hydrogen photovoltaic fuel cell hybrid system for efficient renewable energy generation. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(1), 557–572. <https://doi.org/10.21533/pen.v10i1.2702>
- Benhammou, A., Tedjini, H., Hartani, M. A., Ghoniem, R. M., & Alahmer, A. (2023). Accurate and efficient energy management system of fuel cell/battery/supercapacitor/AC and DC generators hybrid electric vehicles. *Sustainability*, 15(13), 10102. <https://doi.org/10.3390/su151310102>
- Chasiluisa, N. T. Q., Sánchez, S. M. M., Uvidia, R. A. C., & Guadalupe, M. M. E. (2022). Renewable energy integration for vehicles: Solar energy and green hydrogen. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 2(2), 611–622. <https://doi.org/10.18502/epoch.v2i2.11419>
- Columba, K., Cholca, K., Díaz, J., Iza, B., & Pérez, B. (2024). Innovación en el diseño electrónico de sistemas de carga para baterías en vehículos híbridos y eléctricos. *Revista Ingeniería e Innovación del Futuro*, 3(2), 21–35. <https://doi.org/10.62465/riif.v3n2.2024.81>
- Cuji, C., & Villarreal, J. (2024). Diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico aislado para iluminación en vías rurales y carga de vehículos eléctricos basado en un enfoque multipropósito. *Revista Técnica Energía*, 20(2), 47–57. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.614>
- Erinle, T. J., Oladebeye, D. H., Moses, A. O., & Bamidele, O. P. (2022). *Environmental impact of renewable energy sources: Wind and solar* [Preprint]. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31219/osf.io/che6m>
- Fang, X., & Li, X. (2023). Design and simulation of hybrid thermal energy storage control for photovoltaic fuel cells. *Thermal Science*, 27(2A), 1031–1039. <https://doi.org/10.2298/TSCI2302031F>
- Fathabadi, H. (2018). Novel fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for fuel cell hybrid electric vehicles. *Energy*, 143, 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.107>
- Gaisse, P., Muñoz, J., Rivera, M., Restrepo, C., & Mirzaeva, G. (2022). Photovoltaic microinverter with hybrid energy storage system (HESS) and virtual impedance control for injection into a microgrid. En *2022 IEEE 7th Southern Power Electronics*

- Conference (SPEC) (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPEC55080.2022.10058296>
- Gkalonaki, S., & Karatzas, K. (2022). Assessing the environmental impacts of renewable energy sources with emphasis on wind energy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1123(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012053>
- Guerrero-Calero, J. M., Toaza-Iza, J. X., & Calero-Silva, M. S. (2024). Seguridad y confiabilidad en los sistemas eléctricos de infraestructuras digitales críticas. *Innova Science Journal*, 2(1), 58–72. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v2/n1/33>
- Guerrero-Calero, J. M., Vera-Solórzano, D. R., Riofrío-Guevara, M. A., & Navarro-Saltos, G. E. (2023). Energías limpias y desarrollo sostenible: Una revisión sobre las tendencias y desafíos actuales. *Innova Science Journal*, 1(1), 38–50. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v1/n1/9>
- Kilgore, T., Scida, A., & Barra, Z. (2023). Fuel cell and battery sizing for Class 8 vehicle applications. En *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1706–1711). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE53617.2023.10362586>
- Kouchachvili, L., Yaïci, W., & Entchev, E. (2018). Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>
- Krishan, O., & Suhag, S. (2020). Grid-independent PV system hybridization with fuel cell-battery/supercapacitor: Optimum sizing and comparative techno-economic analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100625. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100625>
- Lascano, J., Chiza, L., Saraguro, R., Quinatoa, C., & Tapia, J. (2023). Estimación de la demanda de una estación de carga para vehículos eléctricos mediante la aplicación de métodos probabilísticos. *Revista Técnica “Energía”*, 20(1), 52–64. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.569>
- Mariappan, G. S., Subramanian, K., & Rangasamy, R. (2023). Study on performance simulation of 100 kW proton exchange membrane fuel cell for heavy commercial vehicle applications. En *2023 IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC-India)* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC-India59098.2023.10471416>
- Moarref, B., Abedi, S. M., & Modaresi, S. M. (2025). Optimal scheduling of power system integrated with hydrogen vehicles and flexible resources: A hybrid uncertainty management method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 100, 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.042>
- Montero-Sousa, J. A., Jove Pérez, E., Casteleiro-Roca, J. L., Quintián Pardo, H., Calvo Rolle, J. L., Alaiz Moretón, H., & González Ayuso, T. (2020). Sistema híbrido para la predicción del funcionamiento de una celda de combustible basada en hidrógeno, empleada en el almacenamiento de energía. En *XL Jornadas de Automática* (pp. 200–210). Universidade da Coruña. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497169.200>

- Mubaarak, S., Zhang, D., Wang, L., Mohan, M., Kumar, P. M., Li, C., Zhang, Y., & Li, M. (2021). Efficient photovoltaics-integrated hydrogen fuel cell-based hybrid system: Energy management and optimal configuration. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(1), 013502. <https://doi.org/10.1063/1.5141932>
- Otero, P., Mera, L., & Calle, E. (2021). Aplicación de la simulación de Monte Carlo para el análisis de la implementación de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en la provincia de Galápagos. *Revista Técnica Energía*, 17(2), 143–152. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.434>
- Padilla, C. K. Z., Román, G. J. M., Carvayar, J. Á. C., Campillo, B., & Gallegos, A. Á. (2023). Estudio de la reacción de oxidación de etanol en el catalizador basado en PdCu para su aplicación en celda de combustible. *Química Hoy*, 12(2), 30–36. <https://doi.org/10.29105/qh12.02-327>
- Parida, R. K. (2023). PEM fuel cell based PV/wind hybrid energy system. En *2022 OPJU International Technology Conference on Emerging Technologies for Sustainable Development (OTCON)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OTCON56053.2023.10114038>
- Pérez-Vigueras, M., Sotelo-Boyás, R., & González-Huerta, R. de G. (2023). Optimización de un sistema híbrido de producción y almacenamiento de energía para el abastecimiento energético de Isla Cozumel. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 241–249. <https://doi.org/10.56845/terys.v2i1.363>
- Raj, J., & Rajasree, S. R. (2022). A microgrid with hybrid solar–fuel cell system with CHP application. En *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9908904>
- Ram, V., Infantraj, & Salkuti, S. R. (2022). Modelling and simulation of a hydrogen-based hybrid energy storage system with a switching algorithm. *World Electric Vehicle Journal*, 13(10), 188. <https://doi.org/10.3390/wevj13100188>
- Ramirez, A. R. U., Ayala, J. A. A., Hernández, K. G., Ibarra, M. G. C., Montes, G. S., Sotelo, E. M., Ledesma, J. A. L., & Rendon, A. L. (2024). Estudio del enfriamiento de baterías de automóviles eléctricos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD). *Jóvenes en la Ciencia*, 28, 1–12. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4302>
- Remache, F., Castillo, J., Quinatoa, C., & Camacho, L. (2024). Simulation of hybrid PV solar system with fuel cell in MATLAB Simulink. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 23, 172–183. <https://doi.org/10.37394/23201.2024.23.18>
- Rocha, E. M. B., Padilla, R. T., Piña, I. B., & García, C. J. G. (2024). Rumbo a un modelo sistémico para la gestión de estaciones de carga de vehículos eléctricos en el Valle de México. *FACE: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 24(3), 80–90. <https://doi.org/10.24054/face.v24i3.3321>
- Sagayaraj, R., Priya, S., Malathi, S., & Sujith, S. (2023). IoT monitoring for hybrid photovoltaic fuel cell system. En *2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)* (pp. 949–953). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSCSS57650.2023.10169576>

- Sami, S., & Icaza, D. (2015). Numerical modeling, simulation and validation of hybrid solar photovoltaic, wind turbine and fuel cell power system. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 4(3), 96–112. <https://doi.org/10.6000/1929-6002.2015.04.03.3>
- Vega, A. M., Rivera, J. A. C., & Aragón, A. S. F. (2022). Diseño de una red de estaciones de servicio para recarga de vehículos eléctricos (electrolineras) usando un sistema de energía fotovoltaica en los llanos orientales. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.2310>
- Vega, R. de la, Lamperti, S. A., Rossi, S., Spina, M., Brizzio, N., & Leegstra, R. (2025). Propuesta y comparación de algoritmos de balanceo pasivo de celdas NMC para una batería de iones de litio. *Revista Politécnica*, 55(1), 83–94. <https://doi.org/10.33333/rp.vol55n1.08>
- Yadav, V. K., Sahay, K., & Ahmad, A. U. (2022). Performance improvement of hybrid electric vehicle using supercapacitors energy storage system. *Journal of Electrical Systems*, 18(2). <https://doi.org/10.52783/jes.57>
- Zhang, D., Wang, Z., Liu, P., Sun, Z., Li, N., & Wang, C. (2021). Statistical analysis of demonstration operation for fuel cell vehicle. En *6th International Conference on Transportation Information and Safety: New Infrastructure Construction for Better Transportation (ICTIS 2021)* (pp. 1043–1048). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTIS54573.2021.9798670>

CONFLICTO DE INTERESES

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