

**Implementación de Sistemas de Control para convertidores DC/DC para carga de baterías de vehículos eléctricos usando electrónica embebida.**

**Carlos Mario González Casas**

**Juan Esteban Gil Restrepo**

**Mariana Vergara Sierra**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

**Implementación de Sistemas de Control para convertidores DC/DC para carga de baterías de vehículos eléctricos usando electrónica embebida.**

**Carlos Mario González Casas**

**Juan Esteban Gil Restrepo**

**Mariana Vergara Sierra**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....                                      | 10 |
| 1. Planteamiento del Problema .....                     | 12 |
| 1.1. Descripción .....                                  | 12 |
| 1.2. Formulación .....                                  | 14 |
| 2. Justificación .....                                  | 16 |
| 2.1. Prolongación de la vida útil de las baterías:..... | 16 |
| 3. Objetivos .....                                      | 19 |
| 3.1. Objetivo General.....                              | 19 |
| 3.2. Objetivos Específicos.....                         | 19 |
| 4. Marco Teórico.....                                   | 20 |
| 5. Metodología .....                                    | 41 |
| 6. Resultados .....                                     | 43 |
| 7. Conclusiones.....                                    | 58 |
| 8. Agradecimientos .....                                | 59 |
| 9. Referencias Bibliográficas.....                      | 60 |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Componentes de un vehículo eléctrico.....                | 22 |
| Figura 2. Diagrama de circuito típico de cargador de baterías..... | 36 |
| Figura 3. Nivel de tensión antes de cargar la batería .....        | 44 |
| Figura 4. Conexión de elementos sin suministro de tensión .....    | 45 |
| Figura 5. Conexión de batería con suministro de tensión.....       | 46 |
| Figura 6. Tensión de batería después de 5 minutos de carga .....   | 47 |
| Figura 7. Convertidor DC/DC .....                                  | 48 |
| Figura 8. Gráfica de salida a 10V con entrada de 15V - Motor ..... | 50 |
| Figura 9. Gráfica de salida a 15V con entrada de 15V - Motor ..... | 52 |
| Figura 10. Mediciones con entrada de 15V y salida de 15V .....     | 53 |
| Figura 11. Gráfica de salida a 30V con de 15V - Motor.....         | 54 |
| Figura 12. Grafica de batería tipo TB12-7 .....                    | 56 |

## Lista de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Mediciones con entrada de 15V y salida de 10V ..... | 51 |
| Tabla 2. Mediciones con entrada de 15V y salida de 30V ..... | 55 |

## **Resumen**

### **Implementación de Sistemas de Control para convertidores DC/DC para carga de baterías de vehículos eléctricos usando electrónica embebida.**

**Juan Esteban Gil Restrepo**

**Carlos Mario González Casas**

**Mariana Vergara Sierra**

La creciente adopción de vehículos eléctricos (VE) en Colombia ha evidenciado importantes avances en sostenibilidad, pero también ha revelado limitaciones en la infraestructura de carga, particularmente en lo relacionado con la eficiencia energética, la compatibilidad tecnológica y la estandarización. Este proyecto de grado presenta el diseño e implementación de un sistema de control para convertidores DC/DC, orientado a optimizar el proceso de carga de baterías para vehículos eléctricos mediante electrónica embebida.

El sistema propuesto permite regular de forma precisa el voltaje y la corriente de salida, adaptándose a distintos tipos de baterías y escenarios operativos. Se desarrollaron pruebas experimentales con diferentes configuraciones de voltaje (10V, 15V y 30V) a partir de una fuente de entrada constante de 15V, evaluando el comportamiento del convertidor y la respuesta del sistema bajo condiciones controladas.

Los resultados obtenidos demostraron una alta eficiencia energética, una regulación estable del voltaje de salida y una notable capacidad de adaptación frente a variaciones de carga. Además, el sistema mostró tiempos de respuesta adecuados, sin presencia significativa de sobrepicos o inestabilidades. Este enfoque técnico contribuye no solo a mejorar la experiencia del usuario final, sino también a promover la interoperabilidad de los puntos de recarga y la sostenibilidad del sistema eléctrico en el país. La propuesta se alinea con los objetivos de movilidad eléctrica definidos por la legislación colombiana y representa un avance tangible hacia una infraestructura de carga más eficiente, adaptable y confiable.

*Palabras clave:* convertidores DC/DC, control embebido, eficiencia energética, infraestructura de carga, vehículos eléctricos.

## **Abstract**

### **Implementation of Control Systems for DC/DC Converters for Electric Vehicle Battery Charging Using Embedded Electronics**

**Juan Esteban Gil Restrepo**

**Carlos Mario González Casas**

**Mariana Vergara Sierra**

The growing adoption of electric vehicles (EVs) in Colombia has shown significant progress in sustainability, but has also revealed limitations in charging infrastructure, particularly in terms of energy efficiency, technological compatibility, and standardization. This undergraduate project presents the design and implementation of a control system for DC/DC converters aimed at optimizing the battery charging process for electric vehicles using embedded electronics.

The proposed system allows precise regulation of output voltage and current, adapting to different types of batteries and operational scenarios. Experimental tests were conducted using various output voltage configurations (10V, 15V, and 30V) from a constant 15V input source, evaluating the converter's behavior and system response under controlled conditions.

The results demonstrated high energy efficiency, stable voltage regulation, and a notable adaptability to load variations. Additionally, the system showed adequate response times, with no significant overshoots or instabilities. This technical approach contributes not only to improving the end-user experience, but also to promoting the interoperability of charging points and the sustainability of the country's electrical system. The proposal aligns with Colombia's electric mobility goals and represents a tangible step toward a more efficient, adaptable, and reliable charging infrastructure.

*Keywords:* DC/DC converters, embedded control, energy efficiency, charging infrastructure, electric vehicles

## Glosario

**Batería de litio:** dispositivo electroquímico recargable que almacena energía mediante el movimiento de iones de litio entre un ánodo y un cátodo. Es ampliamente utilizado en vehículos eléctricos por su alta densidad energética y durabilidad.

**Convertidor DC/DC:** dispositivo electrónico que transforma un voltaje de corriente continua (DC) en otro nivel de voltaje DC, ya sea mayor (boost), menor (buck) o combinado (buck-boost), manteniendo la eficiencia energética del sistema.

**Control embebido:** sistema de control basado en microcontroladores o microprocesadores integrados dentro de un dispositivo electrónico, que permite ejecutar tareas específicas de forma autónoma y eficiente.

**Eficiencia energética:** relación entre la energía útil obtenida y la energía total consumida en un sistema. En el contexto del proyecto, se refiere a la capacidad del convertidor para minimizar pérdidas durante el proceso de carga.

**Interoperabilidad:** capacidad de diferentes sistemas o dispositivos para funcionar de manera conjunta y eficiente sin necesidad de modificación. En estaciones de carga, implica compatibilidad entre diversos modelos de vehículos y protocolos de comunicación.

**Movilidad eléctrica:** modelo de transporte que utiliza energía eléctrica como fuente principal de propulsión, reduciendo las emisiones contaminantes y promoviendo la sostenibilidad ambiental.

**OCPP (Open Charge Point Protocol):** protocolo abierto de comunicación estándar utilizado entre estaciones de carga y sistemas de gestión centralizados, que permite la interoperabilidad y la gestión remota de puntos de recarga.

**Sistema de control:** conjunto de dispositivos y algoritmos diseñados para regular variables de un sistema (como voltaje o corriente), manteniéndolas dentro de un rango deseado bajo condiciones dinámicas.

**Smart charger:** estación de carga inteligente que regula dinámicamente el proceso de carga de un vehículo eléctrico con base en parámetros como la demanda eléctrica, el estado de la batería y el costo del suministro.

**Voltaje de entrada/salida:** medida de la diferencia de potencial eléctrico suministrado (entrada) o entregado (salida) por un sistema, generalmente expresado en voltios (V). Su regulación es esencial para un proceso de carga seguro y eficiente.

## Introducción

La movilidad eléctrica ha emergido como una de las principales estrategias globales para enfrentar los retos ambientales y energéticos del siglo XXI. En respuesta al incremento de emisiones contaminantes y la necesidad de diversificar las fuentes de energía, los vehículos eléctricos (VE) se consolidan como una alternativa sostenible frente a los sistemas de transporte tradicionales. Este proceso de transformación no solo impacta la forma en que se concibe el transporte, sino que también redefine los requerimientos tecnológicos asociados a la infraestructura energética, especialmente en lo relacionado con los sistemas de carga.

En Colombia, la transición hacia la movilidad eléctrica ha tomado fuerza en los últimos años, respaldada por políticas públicas como la Ley 1964 de 2019 y por incentivos gubernamentales que promueven la adquisición de vehículos cero emisiones. Sin embargo, a pesar del crecimiento del parque automotor eléctrico, persisten importantes limitaciones en cuanto a la cobertura, compatibilidad y eficiencia de la infraestructura de recarga (Enel X, 2024; RUNT, 2024). Entre los desafíos más relevantes se encuentran la falta de interoperabilidad entre estaciones y vehículos, la carencia de estandarización en los sistemas de carga y las ineficiencias en la conversión energética, lo que afecta directamente la experiencia del usuario y la sostenibilidad del sistema.

En este contexto, los convertidores DC/DC desempeñan un papel fundamental al permitir la regulación del voltaje y la corriente suministrados durante el proceso de carga. Estos dispositivos electrónicos posibilitan la adaptación de los niveles de energía requeridos por distintos tipos de baterías, optimizando la transferencia energética y reduciendo los tiempos de carga. Sin embargo, para alcanzar un funcionamiento eficiente y seguro, es necesario implementar sistemas de control avanzados que aseguren la estabilidad, la adaptabilidad y la precisión operativa del convertidor frente a variaciones dinámicas.

El presente proyecto de grado tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de control para convertidores DC/DC enfocado en la carga de baterías de vehículos eléctricos mediante electrónica embebida. Este sistema busca mejorar la eficiencia energética, adaptarse a diferentes tipos de baterías y escenarios de operación, y garantizar la sostenibilidad del proceso

de carga. Para ello, se realizaron pruebas experimentales que validan el desempeño del sistema propuesto, contribuyendo así a la generación de soluciones tecnológicas aplicables al contexto colombiano.

En definitiva, esta iniciativa responde a la necesidad de fortalecer el ecosistema de movilidad eléctrica en el país, ofreciendo una propuesta innovadora que integra conocimientos en electrónica de potencia, control embebido y gestión energética. Su desarrollo representa un paso hacia la consolidación de una infraestructura de carga más eficiente, flexible y alineada con los retos ambientales y tecnológicos de la actualidad.

## 1. Planteamiento del Problema

### 1.1. Descripción

La movilidad eléctrica se ha consolidado como una solución estratégica frente a los desafíos ambientales, sociales y económicos que plantea la dependencia de los combustibles fósiles. En Colombia, el sector ha mostrado un crecimiento prometedor, evidenciado por un incremento significativo en la adopción de vehículos eléctricos en los últimos años. Este progreso es impulsado por políticas públicas favorables, avances tecnológicos y una mayor conciencia ambiental entre los ciudadanos. Sin embargo, el desarrollo de la infraestructura de recarga sigue siendo una barrera crítica que limita el potencial de este mercado.

Entre enero y marzo de 2024, se matricularon 992 vehículos eléctricos nuevos en Colombia, lo que representa un aumento del 21,4 % en comparación con el mismo período de 2023 (RUNT, 2024). Este crecimiento ha sido facilitado por incentivos gubernamentales como la Ley 1964 de 2019, que establece directrices para la instalación de estaciones de carga rápida y funcional en municipios y ciudades del país (Congreso de la República de Colombia, 2019). Adicionalmente, la creciente oferta de vehículos cero emisiones y la conciencia ambiental también han sido factores determinantes. Actualmente, el país cuenta con 204 puntos de recarga públicos y privados, concentrados principalmente en Bogotá y otras ciudades principales como Medellín, Cali, Bucaramanga, Armenia e Ibagué (Enel X, 2024). Sin embargo, esta infraestructura es insuficiente para satisfacer las necesidades actuales y futuras del mercado, especialmente en zonas rurales y regiones periféricas.

Los puntos de recarga disponibles no siempre son compatibles con la amplia gama de modelos y marcas de vehículos eléctricos. Esto se debe a que cada fabricante utiliza especificaciones únicas para conectores y protocolos de comunicación, lo que genera problemas de interoperabilidad y afecta la experiencia del usuario (IEEE, 2020). Además, muchas estaciones no cuentan con tecnología avanzada para ajustar automáticamente los niveles de voltaje según las necesidades de cada vehículo. Esto incrementa los tiempos de carga y puede ocasionar daños en las baterías a largo plazo (Enel X, 2024). Las tecnologías actuales tampoco

optimizan la transferencia de energía, lo que genera pérdidas significativas y aumenta los costos operativos, contradiciendo los principios de sostenibilidad de la movilidad eléctrica (International Energy Agency, 2023).

La implementación de convertidores DC-DC avanzados se presenta como una solución viable para estos desafíos. Estos dispositivos permiten regular y optimizar el flujo de energía, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de carga. Según investigaciones, los convertidores bidireccionales de puente dual activo resonante son una tecnología prometedora para integrar estaciones de carga con redes de corriente continua de media tensión, aumentando la estabilidad y rapidez del proceso (IEEE, 2020). Además, la combinación de paneles solares, sistemas de almacenamiento de energía y estaciones de carga inteligentes puede reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, mejorando la sostenibilidad del sistema (International Energy Agency, 2023). Empresas como Enel X, CELSIA y Grupo EPM han comenzado a instalar estaciones en puntos estratégicos de ciudades como Medellín, pero es necesario un esfuerzo conjunto entre el sector público y privado para expandir esta red a regiones menos desarrolladas (Enel X, 2024).

Las baterías de litio son un componente clave en la movilidad eléctrica. Estas baterías están compuestas por celdas individuales que generan corriente eléctrica mediante el movimiento de iones de litio entre electrodos. Este tipo de baterías ha evolucionado considerablemente en términos de capacidad y durabilidad, permitiendo a los vehículos eléctricos recorrer mayores distancias con una sola carga. Sin embargo, estas mejoras deben complementarse con sistemas de carga avanzados que sean compatibles con las nuevas generaciones de vehículos (IEEE, 2020).

La movilidad eléctrica en Colombia enfrenta un panorama dual. Por un lado, se observa un crecimiento sostenido en la adopción de vehículos eléctricos, impulsado por incentivos gubernamentales y avances tecnológicos. Por otro lado, las limitaciones en la infraestructura de recarga, la falta de estandarización tecnológica y los problemas de eficiencia energética

representan barreras importantes para el desarrollo del sector. Para superar estos desafíos, se requiere un enfoque integral que combine colaboración público-privada, inversión en tecnologías avanzadas como los convertidores DC-DC y la implementación de políticas que promuevan la sostenibilidad. Este enfoque permitirá a Colombia aprovechar plenamente los beneficios de la movilidad eléctrica, transformando su economía y contribuyendo a un futuro más sostenible.

## **1.2. Formulación**

La infraestructura de carga para vehículos eléctricos (VE) en Colombia enfrenta retos importantes en términos de eficiencia, compatibilidad y sostenibilidad. Una solución clave para abordar estas limitaciones es la implementación de un controlador especializado en la regulación de las variables críticas del sistema de carga. Este dispositivo, diseñado para monitorear y ajustar en tiempo real parámetros como el voltaje y la corriente, garantiza un proceso de carga seguro y eficiente, minimizando pérdidas energéticas y previniendo daños en los componentes eléctricos (IEEE, 2020).

El diseño de este controlador debe centrarse en la personalización de los ciclos de carga, adaptándose a la diversidad de capacidades y tecnologías de las baterías disponibles en el mercado. Esto permitiría extender la vida útil de las baterías y reducir los costos de mantenimiento para los usuarios, un aspecto crítico en la adopción masiva de los VE (Enel X, 2023). Además, la tecnología debe garantizar la compatibilidad con múltiples fabricantes, abordando uno de los desafíos más apremiantes: la interoperabilidad entre estaciones de carga y vehículos eléctricos. La estandarización y adaptabilidad en los sistemas de carga reducirían las barreras técnicas actuales, proporcionando un servicio más confiable y satisfactorio (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Por último, al optimizar los tiempos de carga mediante una mayor eficiencia en la transferencia de energía, se contribuiría a la sostenibilidad del sistema de movilidad eléctrica.

Esto permitiría una mejor disponibilidad de los puntos de carga, mejorando la experiencia del usuario y fomentando una mayor adopción de vehículos eléctricos en el país (RUNT, 2024).

**¿Cómo se puede mejorar el sistema de carga para vehículos eléctricos mediante la implementación de un controlador especializado, con un enfoque en la eficiencia energética, la adaptabilidad tecnológica y la sostenibilidad del servicio?**

## **2. Justificación**

En Colombia, uno de los principales desafíos para la adopción de vehículos eléctricos es la limitada inversión en infraestructura de carga rápida. La escasez de estaciones disponibles y la dependencia de cargadores adquiridos de forma individual restringen significativamente el acceso a una experiencia de carga eficiente. Esto desalienta a potenciales compradores, para quienes la rapidez y accesibilidad en la carga son esenciales en su vida diaria. Este proyecto se plantea como una respuesta directa a estas limitaciones, proponiendo el diseño e implementación de un sistema de control avanzado para convertidores DC/DC, orientado a optimizar los sistemas de carga en el país.

### **2.1. Prolongación de la vida útil de las baterías:**

Las baterías son uno de los componentes más costosos y sensibles en los vehículos eléctricos, y su degradación prematura, causada por procesos de carga inadecuados, constituye un desafío significativo. Implementar sistemas de control avanzados permitirá gestionar la energía de forma precisa, ajustando los ciclos de carga a las necesidades específicas de cada batería. Este enfoque no sólo extenderá su vida útil, sino que también disminuirá los costos asociados al mantenimiento y reemplazo, contribuyendo a una experiencia más satisfactoria para los usuarios.

### **2.2. Evolución de los sistemas de control para recargas de baterías:**

La tecnología de control en la recarga de baterías ha evolucionado hacia soluciones más inteligentes y eficientes. Aprovechar estos avances permite implementar convertidores DC/DC que optimizan la transferencia de energía, garantizando un suministro seguro y eficiente. La adopción de estas tecnologías mejora significativamente la interoperabilidad entre distintas marcas y modelos de vehículos, promueve una mayor estandarización y facilita el uso masivo de estaciones de carga.

### **2.3. Eficiencia en los sistemas de carga:**

Uno de los problemas más comunes en las estaciones de carga actuales es la pérdida de energía durante el proceso de conversión. Optimizar el proceso de carga mediante el uso de convertidores que reduzcan estas pérdidas permite alcanzar una mayor eficiencia energética. De esta manera, no solo reduce los costos operativos, sino que también refuerza el compromiso con la sostenibilidad ambiental, al maximizar el aprovechamiento de cada unidad de energía generada.

#### **2.4. Accesibilidad y reducción de tiempos de carga:**

El tiempo es un recurso valioso, y la rapidez en la recarga se convierte en un factor decisivo para los usuarios. Reducir considerablemente los tiempos de carga es posible mediante la implementación de tecnologías avanzadas que mejoren la disponibilidad y eficiencia de las estaciones. Esta mejora resulta especialmente relevante en el contexto colombiano, donde la infraestructura aún es limitada y los usuarios deben enfrentar largas esperas para acceder a la carga.

#### **2.5. Contribución al medio ambiente y al desarrollo local:**

Facilitar el acceso a sistemas de carga más eficientes impulsa la transición hacia una movilidad eléctrica más limpia, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la disminución de la contaminación urbana. Además, esta iniciativa fomenta el desarrollo de un ecosistema tecnológico local, creando oportunidades de empleo en áreas de ingeniería y servicios técnicos, al tiempo que fortalece la economía verde en el país.

#### **2.6. Impulso a la movilidad eléctrica y el cumplimiento de compromisos ambientales:**

Este proyecto se alinea con las metas establecidas en la Ley 1964 de 2019, que promueve la instalación de estaciones de carga rápida en municipios y ciudades, y respalda los compromisos internacionales de Colombia en la reducción de emisiones de carbono. Al fortalecer la infraestructura de carga, se potencia el dinamismo en la compra de vehículos eléctricos, posicionando al país como un referente en la transición hacia tecnologías sostenibles.

En ese sentido, este proyecto no solo responde a las necesidades inmediatas del sector de la movilidad eléctrica en Colombia, sino que también busca garantizar una experiencia de usuario superior, con sistemas de carga más rápidos, eficientes y sostenibles. Su impacto positivo abarca el ámbito ambiental, económico y social, consolidándose como una propuesta estratégica para acelerar la adopción de vehículos eléctricos y contribuir al desarrollo de una infraestructura acorde con las exigencias del mercado actual.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Implementar un sistema de control para convertidores DC/DC que optimice la carga de baterías de vehículos eléctricos, mejorando la eficiencia energética, la adaptabilidad a distintos escenarios y la sostenibilidad del sistema.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Seleccionar la tipología más adecuada para garantizar la funcionalidad en diversos escenarios y con diferentes marcas de vehículos eléctricos.
- Diseñar un sistema de control avanzado basado en un microcontrolador para la regulación óptima de voltaje y corriente, adaptándose a las especificaciones de distintas baterías.
- Implementar el sistema en un entorno de pruebas controlado para evaluar su eficiencia energética, estabilidad, tiempos de carga y adaptabilidad a condiciones dinámicas.

## **4. Marco Teórico**

La transición hacia una movilidad eléctrica sostenible representa uno de los mayores desafíos y oportunidades en el ámbito energético y ambiental. Este marco teórico explora los conceptos fundamentales y las tecnologías esenciales para implementar sistemas de carga optimizados en vehículos eléctricos (VE). En primer lugar, se aborda una visión general de los VE, clasificándolos en sus principales tipos y destacando sus beneficios y limitaciones.

Posteriormente, se examina la importancia de una infraestructura de carga adecuada, haciendo énfasis en su estado actual, retos y soluciones. En tercer lugar, se exploran los convertidores DC-DC como componentes clave en la optimización de sistemas de carga, incluyendo sus tipos, aplicaciones y criterios de selección. Asimismo, se analiza el papel de los sistemas de control avanzados en estos convertidores para garantizar eficiencia y seguridad. Finalmente, se revisan las características y desafíos de las baterías para VE, sus tipos y avances tecnológicos, culminando con un análisis de tendencias internacionales que pueden inspirar estrategias en Colombia.

### **4.1. Vehículo Eléctrico (VE)**

El vehículo eléctrico (VE) es un medio de transporte que se mueve gracias a la energía eléctrica almacenada en baterías. Aunque en la actualidad se asocia con avances recientes, los primeros VE se desarrollaron en el siglo XIX, pero su popularidad decayó ante el auge de los motores de combustión interna. En los últimos años, el creciente interés por la sostenibilidad y los avances tecnológicos han revitalizado su desarrollo, consolidándose como una alternativa viable y ecológica frente a los vehículos tradicionales (LugEnergy, 2023).

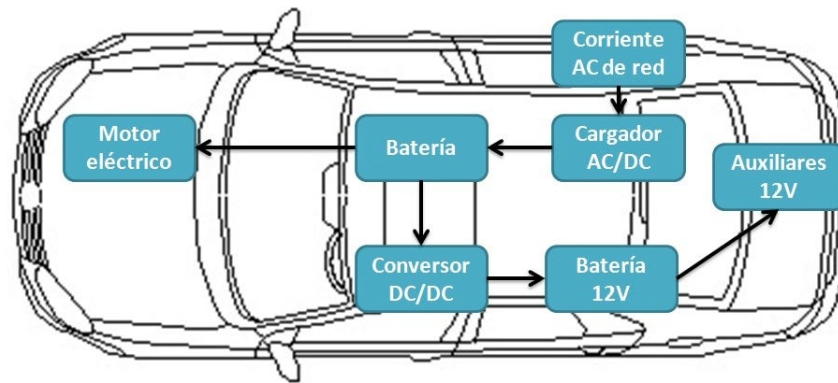
Su diseño prescinde de combustibles fósiles, lo que lo posiciona como una alternativa sostenible frente a los vehículos tradicionales, cuando surgieron los primeros prototipos que

competían con los vehículos de combustión interna y los sistemas de transporte a vapor. (Goldman, A. R., Rotondo, F. S., & Swallow, J. G. 2019).

En sus inicios, los vehículos eléctricos mostraron un desempeño prometedor, pero la disponibilidad de petróleo y las limitaciones tecnológicas de las baterías de la época, como su baja capacidad de almacenamiento y altos costos, frenan su adopción masiva. Durante el siglo XX, los VE encontraron aplicaciones específicas, principalmente en flotas municipales y sistemas de transporte interno, sin llegar a consolidarse como una opción predominante en el mercado (Natural Resource Governance Institute, 2021.)

En las últimas décadas, los avances tecnológicos y el creciente interés por la sostenibilidad han revitalizado el desarrollo de los VE. La introducción de baterías modernas, como las de iones de litio, ha mejorado significativamente la autonomía de los vehículos y reducido los tiempos de recarga, haciendo posible su uso en el día a día. Este progreso, acompañado por políticas gubernamentales orientadas a reducir las emisiones de carbono, incentivos económicos y un mayor compromiso con el desarrollo de infraestructuras de recarga, ha favorecido la expansión de los VE en el mercado global (Dols Ruis, J. F. 2012).

Adicionalmente, la transición hacia una economía más sostenible ha impulsado la integración de energías renovables tanto en la producción como en el reciclaje de baterías, reduciendo el impacto ambiental asociado a su fabricación y disposición final. Estos esfuerzos subrayan no sólo el avance tecnológico de los VE, sino también su importancia en la transición energética global, transformándolos en un elemento central para un futuro más limpio y eficiente (Natural Resource Governance Institute, 2021.)



*Figura 1. Componentes de un vehículo eléctrico*

*Electric Vehicle Technology Explained por James Larminie y John Lowry.*

## 4.2. Ventajas del Vehículo Eléctrico

Los vehículos eléctricos (VE) representan una solución sostenible y eficiente frente a los desafíos ambientales y económicos actuales. Las investigaciones científicas y estudios especializados han destacado las siguientes ventajas clave:

**4.2.1. Reducción de Emisiones:** Una de las principales ventajas de los VE es su contribución a la mitigación del cambio climático. A diferencia de los vehículos de combustión interna, los VE no emiten gases contaminantes como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) durante su operación. Esto no solo mejora la calidad del aire, especialmente en zonas urbanas, sino que también reduce la huella de carbono global (International Energy Agency, 2023).

**4.2.2. Disminución de la Contaminación Acústica:** Los VE funcionan casi silenciosamente, lo que contribuye significativamente a la reducción del ruido ambiental en áreas densamente pobladas. Esta característica mejora la calidad de vida urbana al disminuir el estrés asociado con la contaminación acústica (Banco Mundial, 2022).

**4.2.3. Eficiencia Energética:** Los motores eléctricos son mucho más eficientes que los motores de combustión interna. Mientras que los motores tradicionales pierden una gran parte de

la energía como calor, los VE transforman la mayor parte de la energía eléctrica en movimiento. Esto optimiza el uso de recursos energéticos y refuerza su sostenibilidad (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2023).

**4.2.4. Bajos Costos Operativos:** En comparación con los vehículos a gasolina o diésel, los VE presentan costos operativos más bajos. La electricidad utilizada para recargar las baterías es considerablemente más económica que los combustibles fósiles, y los sistemas eléctricos tienen menos partes móviles, lo que reduce los costos de mantenimiento (Real Automóvil Club de España [RACE], 2023).

**4.2.5. Impacto Positivo en Países en Desarrollo:** Además de los beneficios ambientales, los VE pueden impulsar el crecimiento económico en países en desarrollo al reducir la dependencia de combustibles importados y generar empleos en la fabricación e instalación de infraestructuras de recarga (Banco Mundial, 2022).

Los vehículos eléctricos no solo son una herramienta clave para combatir el cambio climático, sino que también ofrecen una alternativa económica y viable para transformar el transporte hacia un modelo más sostenible.

### **4.3. Tipos de Vehículos Eléctricos**

Los vehículos eléctricos (VE) han emergido como una solución sostenible frente a los problemas ambientales y de dependencia energética asociados con los combustibles fósiles. Según diversas investigaciones, los VE se clasifican principalmente en tres categorías: vehículos eléctricos de batería (BEV), vehículos híbridos eléctricos (HEV) y vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV). Cada tipo tiene características particulares que los distinguen en cuanto a tecnología, autonomía y fuentes de energía empleadas.

#### **4.3.1. Vehículos Eléctricos de Batería (BEV)**

Los BEV se propulsan exclusivamente mediante motores eléctricos alimentados por baterías recargables. Estos vehículos no generan emisiones directas de gases de efecto invernadero, lo que los convierte en una opción limpia para el transporte. Sin embargo, su autonomía depende en gran medida de la capacidad de la batería y de la infraestructura de carga disponible (Core.ac.uk, 2020). Además, la eficiencia energética de los BEV está condicionada por la fuente de generación eléctrica empleada, lo que puede afectar su impacto ambiental global (Scielo.org.mx, 2019).

#### **4.3.2. Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV)**

Los HEV combinan un motor de combustión interna con uno o más motores eléctricos. Su principal ventaja es la capacidad de utilizar ambas fuentes de energía, lo que mejora la eficiencia del combustible y reduce las emisiones contaminantes en comparación con los vehículos convencionales (Scielo.org.mx, 2020). Estos vehículos presentan una tecnología avanzada en sistemas de gestión de energía, lo que les permite alternar o combinar las fuentes de propulsión según las condiciones operativas (Ride, 2023).

#### **4.3.3. Vehículos Eléctricos de Celda de Combustible (FCEV)**

Los FCEV generan electricidad a bordo a través de una reacción química entre hidrógeno y oxígeno en una celda de combustible. Este tipo de vehículo no emite gases contaminantes, ya que su único subproducto es el agua. Según la literatura, los FCEV destacan por su rápida recarga y una mayor autonomía en comparación con los BEV, aunque su adopción se ve limitada por la escasa infraestructura para el abastecimiento de hidrógeno (Repositorio Comillas, 2018).

La clasificación de los vehículos eléctricos evidencia la diversidad de tecnologías disponibles para abordar los retos ambientales y energéticos actuales. Los BEV lideran en términos de adopción y sostenibilidad, mientras que los HEV representan una solución transicional efectiva.

Por otro lado, los FCEV ofrecen una alternativa prometedora, especialmente en aplicaciones de largo alcance, aunque requieren un desarrollo significativo en infraestructura de soporte.

#### **4.4. Importancia de la Infraestructura de Carga**

En el contexto de la modalidad eléctrica, no basta con la existencia de vehículos con tecnología avanzada; se requiere una red de soporte robusta que garantice su operación efectiva. Esta red se basa principalmente en la infraestructura de carga, la cual se convierte en un pilar estratégico para fomentar la adopción de vehículos eléctricos (VE), tanto en entornos urbanos como rurales. Su disponibilidad, alcance y eficiencia son elementos decisivos para que los usuarios perciban la movilidad eléctrica como una alternativa viable y sostenible.

##### **4.4.1. La importancia de la infraestructura de carga de los vehículos eléctricos**

La infraestructura de carga es un componente esencial para la transición hacia la movilidad eléctrica, pues permite garantizar la funcionalidad y accesibilidad de los vehículos eléctricos (VE). En el contexto colombiano, el desarrollo de esta infraestructura es crucial para alcanzar los objetivos de sostenibilidad ambiental, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y diversificación energética (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

La ausencia de una red adecuada de carga desincentiva la adopción de VE, ya que limita la autonomía percibida y genera incertidumbre entre los usuarios. Además, contar con una infraestructura bien distribuida promueve la confianza del consumidor, incentiva la inversión privada en el sector automotor eléctrico y facilita la integración de tecnologías renovables al sistema energético nacional (Universidad Externado de Colombia, 2023).

## 4.5. Estado Actual y Retos en Colombia

En Colombia, la infraestructura de carga de VE se encuentra en una etapa de desarrollo inicial, con aproximadamente 1.200 puntos de carga pública registrados a finales de 2023, concentrados principalmente en las ciudades de Bogotá, Medellín y Cali (Blog del Transporte e Infraestructura, 2023). Aunque esta cifra representa un avance, es insuficiente para satisfacer la demanda esperada a medida que aumenta el número de vehículos eléctricos en el país.

Los principales retos incluyen la limitada estandarización tecnológica de los sistemas de carga, los altos costos de implementación, la escasez de incentivos económicos, y la baja densidad de puntos de recarga en áreas rurales y regiones periféricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Además, la falta de coordinación entre los sectores público y privado dificulta la planificación de una red de carga nacional coherente y eficiente (Universidad Distrital, 2024).

## 4.6. Principales Desafíos

**4.6.1. Expansión de la infraestructura:** Colombia necesita al menos 50.000 puntos de carga para alcanzar una cobertura adecuada que permita la circulación de una flota estimada de 1 millón de VE (Carga.com.co, 2024).

**4.6.2. Accesibilidad regional:** De acuerdo con la investigación realizada por la Universidad Externado de Colombia, (2023) La desigual distribución de la infraestructura excluye a las zonas rurales y limita la posibilidad de utilizar VE fuera de los centros urbanos.

**4.6.3. Regulación y estándares:** La falta de regulación clara y la diversidad de protocolos de carga dificultan la interoperabilidad entre diferentes sistemas y proveedores (Universidad Distrital, 2024).

**4.6.4. Inversión económica:** Los costos iniciales de implementación de estaciones de carga son elevados, lo que desincentiva a potenciales inversionistas y a los operadores del sector eléctrico (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

## **4.7. Soluciones Propuestas**

**4.7.1. Incentivos económicos y regulatorios:** Establecer beneficios fiscales y subsidios para incentivar la instalación de estaciones de carga tanto en el ámbito público como privado (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

**4.7.2. Modelos de negocio innovadores:** Diseñar estrategias que integren la participación de diferentes actores, incluyendo alianzas público-privadas, para garantizar la sostenibilidad financiera de la infraestructura de carga (Universidad Distrital, 2024).

**4.7.3. Estandarización tecnológica:** Desarrollar normativas que promuevan la interoperabilidad y compatibilidad entre estaciones de carga y vehículos eléctricos (Universidad Externado de Colombia, 2023).

**4.7.4. Ampliación de cobertura:** Fomentar la instalación de puntos de carga en regiones rurales mediante proyectos piloto y apoyo gubernamental para garantizar la equidad territorial (Carga.com.co, 2024).

## **4.8. Convertidores DC-DC**

Los convertidores DC-DC son dispositivos electrónicos de potencia diseñados para transformar un nivel de voltaje de corriente continua (DC) en otro, ya sea incrementando o reduciéndolo según las necesidades de los sistemas eléctricos. Son esenciales en aplicaciones

como los vehículos eléctricos (VE), donde las diferentes partes del sistema requieren niveles de voltaje distintos (Bestas, 2023). Su principal función es garantizar la eficiencia energética en sistemas con múltiples niveles de voltaje, adaptando la energía de la batería principal para alimentar diversos subsistemas auxiliares o componentes (Arxiv, 2022; IEEEExplore, 2023).

En los VE, estos dispositivos desempeñan un papel crítico al reducir el voltaje de la batería de alto voltaje (generalmente entre 200V y 800V) a niveles adecuados para sistemas auxiliares como la iluminación, los sistemas de información y entretenimiento, y los circuitos de control. Además, algunos convertidores permiten la transferencia bidireccional de energía, lo que mejora la flexibilidad y la eficiencia de los sistemas eléctricos, especialmente en vehículos híbridos y de celda de combustible (Arxiv, 2022).

#### **4.8.1. Tipos de Convertidores DC-DC**

Existen diversas topologías de convertidores DC-DC, cada una diseñada para aplicaciones específicas dentro de los vehículos eléctricos. Los principales tipos incluyen:

##### **4.8.1.1. Convertidor Buck (reductor)**

Este tipo de convertidor reduce el nivel de voltaje de entrada a un valor más bajo. Es utilizado principalmente para alimentar subsistemas auxiliares de bajo voltaje en los VE (IEEEExplore, 2023).

##### **4.8.1.2. Convertidor Boost (elevador)**

Incrementa el nivel de voltaje de entrada a un valor más alto, siendo útil en aplicaciones como la carga de baterías de alta capacidad o en sistemas de propulsión eléctrica que requieren altos voltajes para operar eficientemente (Arxiv, 2022).

#### **4.8.1.3. Convertidor Buck-Boost**

Combina las funciones de reducción y elevación de voltaje, permitiendo una mayor flexibilidad en el manejo de diferentes niveles de voltaje en un solo dispositivo. Este tipo de convertidor es común en sistemas que necesitan gestionar fluctuaciones de voltaje significativas.

#### **4.8.1.4. Convertidores bidireccionales**

Diseñados para permitir el flujo de energía en ambas direcciones, estos convertidores son esenciales en vehículos eléctricos híbridos y de celda de combustible, donde la energía puede transferirse entre la batería y otras fuentes de energía o sistemas de almacenamiento (Arxiv, 2022).

### **4.9. Importancia en Vehículos Eléctricos**

En el contexto de los vehículos eléctricos (VE), los convertidores DC-DC son fundamentales para la optimización energética y funcionalidad del sistema. Una de sus principales ventajas es la capacidad de adaptar la energía almacenada en la batería de alto voltaje (generalmente entre 200 y 800 V) a los diferentes niveles de voltaje requeridos por los subsistemas auxiliares, como sistemas de iluminación, control, entretenimiento y climatización. Esto permite una gestión eficiente de la energía, asegurando la funcionalidad de todos los componentes del vehículo sin comprometer su autonomía (IEEEExplore, 2023).

Además, en los vehículos eléctricos híbridos (HEV) y de celda de combustible (FCV), los convertidores DC-DC desempeñan un papel clave al permitir la transferencia bidireccional de energía entre diferentes fuentes, como la batería principal, el sistema de frenado regenerativo y la celda de combustible. Esto no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también facilita el

almacenamiento temporal de energía durante las fases de desaceleración o frenado regenerativo, utilizando esta energía para alimentar el motor o los sistemas auxiliares (Arxiv, 2022).

Otra aplicación importante es en los sistemas de carga, donde los convertidores DC-DC boost eleva el voltaje de entrada para cargar baterías de alta capacidad de manera eficiente. De acuerdo con la investigación de (IEEEExplore, 2023), en las estaciones de carga rápida, los convertidores DC-DC son esenciales para garantizar una transferencia de energía segura y efectiva, minimizando las pérdidas durante el proceso de conversión. En términos de diseño, los convertidores DC-DC contribuyen significativamente a reducir el tamaño y peso total del sistema eléctrico de los VE. Su integración eficiente en los sistemas de propulsión eléctrica mejora la densidad de potencia y reduce el impacto en el peso total del vehículo, optimizando así la relación peso-energía, un factor crítico para maximizar la autonomía del VE.

Finalmente, el uso de convertidores DC-DC es crucial para la implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas de propulsión basados en múltiples fuentes de energía. Estas configuraciones, soportadas por convertidores bidireccionales, permiten el desarrollo de arquitecturas de vehículos eléctricos más flexibles y adaptables a diferentes aplicaciones, incluyendo transporte urbano, transporte pesado y vehículos de emergencia, asegurando así una mayor versatilidad en el mercado (Arxiv, 2022).

#### **4.10. Integración de Energías Renovables en Sistemas de Carga**

Uno de los objetivos del presente proyecto es mejorar la sostenibilidad del sistema de carga de vehículos eléctricos. En este contexto, la incorporación de fuentes de energía renovable, particularmente la energía solar, permite una carga autónoma y eficiente, reduciendo la dependencia de la red convencional. Las estaciones de carga fotovoltaica, que integran paneles solares y convertidores DC/DC inteligentes, pueden operar de forma independiente o conectarse a la red eléctrica mediante sistemas híbridos. Estos sistemas permiten almacenar energía en baterías estacionarias durante las horas de mayor irradiación solar y liberarla durante los

períodos de mayor demanda, maximizando así la eficiencia del sistema (International Energy Agency, 2023).

A nivel técnico, esto requiere de convertidores DC/DC bidireccionales capaces de gestionar flujos de energía en ambas direcciones: desde los paneles hacia la batería del vehículo, y desde los sistemas de almacenamiento estacionario hacia la red (o viceversa). Estos convertidores deben integrarse con sistemas de control que monitoreen en tiempo real la radiación solar, el estado de carga del sistema y los requerimientos energéticos del vehículo, ajustando los parámetros de operación automáticamente (Arxiv, 2022).

#### **4.10.1. Arquitecturas Inteligentes de Carga**

Para cumplir con el objetivo de diseñar un sistema de control avanzado, es necesario considerar las nuevas arquitecturas inteligentes de carga. Estas estaciones, también conocidas como 'smart chargers', emplean tecnología basada en la nube y sistemas embebidos para interactuar con diversos vehículos, plataformas de gestión energética y sistemas de facturación.

Mediante el uso de sensores integrados y comunicación en tiempo real con el sistema de control, las estaciones inteligentes pueden ajustar dinámicamente la corriente de carga en función de la demanda de la red, la tarifa eléctrica, la carga de otros vehículos en la red y el estado de la batería. Además, se pueden implementar estrategias de balanceo de carga que prioricen ciertos vehículos o usuarios en función de parámetros definidos (IEEE, 2020).

Esto se traduce en una mayor eficiencia del sistema y una experiencia personalizada para el usuario. Desde el punto de vista del diseño del sistema de control, este debe ser capaz de procesar datos en tiempo real, aplicar algoritmos de decisión y comunicarse con múltiples dispositivos a través de protocolos estandarizados como OCPP (Open Charge Point Protocol).

#### **4.10.2. Normativa y Estándares para Infraestructura de Carga**

La interoperabilidad tecnológica es un objetivo fundamental en este proyecto. Para alcanzarla,

es necesario integrar normas nacionales e internacionales que aseguren que los vehículos eléctricos puedan conectarse y cargar de forma segura y eficiente en cualquier estación pública o privada.

En Colombia, la Ley 1964 de 2019 promueve el despliegue de infraestructura de carga con estándares mínimos de conectividad y seguridad. Esta ley establece la obligación de instalar cargadores en nuevas edificaciones y facilita incentivos para empresas que promuevan estas tecnologías (Congreso de la República de Colombia, 2019).

A nivel internacional, los estándares IEC 61851 y SAE J1772 definen los requerimientos para conectores, protocolos de comunicación y seguridad eléctrica. El cumplimiento de estas normativas no solo asegura la compatibilidad entre distintos modelos de vehículos y estaciones, sino que también reduce el riesgo de fallos y prolonga la vida útil de las baterías (IEEE, 2020).

#### **4.10.3. Tendencias Futuras en Tecnología de Carga**

Finalmente, uno de los propósitos de este trabajo es anticipar y adaptarse a futuras innovaciones en el campo de la movilidad eléctrica. Entre las tendencias más relevantes se encuentra la carga bidireccional (V2G), que convierte al vehículo eléctrico en una unidad de almacenamiento energético móvil capaz de suministrar electricidad de vuelta a la red en horas pico, contribuyendo a la estabilidad energética (IEEEExplore, 2023).

Otra innovación relevante es la carga ultrarrápida, que permite recargar hasta el 80% de la batería en menos de 15 minutos mediante el uso de convertidores DC-DC de alta potencia y tecnologías de refrigeración líquida. Este tipo de carga requiere un sistema de control extremadamente preciso, capaz de regular la corriente y la temperatura del sistema en tiempo real para evitar riesgos como el sobrecalentamiento o la sobrecarga (Arxiv, 2022).

Finalmente, la carga inalámbrica emerge como una opción práctica para flotas urbanas, reduciendo el desgaste físico de los conectores y facilitando el acceso a la carga. Estas soluciones requerirán una nueva generación de convertidores con capacidades de acoplamiento inductivo

eficiente, lo cual se alinea con la visión de este proyecto en el diseño e implementación de sistemas de carga más avanzados.

#### **4.11. Sistemas de Control en Convertidores DC-DC**

Los convertidores DC-DC son componentes fundamentales en diversas aplicaciones de energía eléctrica, como sistemas fotovoltaicos, vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles. Su función principal es regular el voltaje o la corriente de salida en función de las necesidades de la carga o del sistema conectado (Redalyc, 2010). Para lograrlo, se requiere un sistema de control que garantice un rendimiento eficiente y estable, incluso frente a variaciones de carga, fluctuaciones en la fuente de entrada o perturbaciones externas (SciELO, 2010).

##### **4.11.1. Importancia del Control en Convertidores DC-DC**

El control en los convertidores DC-DC es esencial para optimizar su desempeño y prolongar la vida útil de los dispositivos asociados. Su relevancia radica en los siguientes aspectos:

**4.11.1.1. Estabilidad del Sistema:** Los sistemas de control aseguran que el convertidor opere dentro de los parámetros deseados, evitando inestabilidades o fluctuaciones indeseadas en el voltaje y la corriente (Udec, 2021).

**4.11.1.2. Eficiencia Energética:** Un control adecuado minimiza las pérdidas de energía, lo que es crucial en aplicaciones donde la eficiencia es prioritaria, como en sistemas fotovoltaicos (Noesis, 2015).

**4.11.1.3. Adaptación a Variaciones:** Permite que el convertidor responda de manera eficiente a cambios en la carga, fluctuaciones de entrada o perturbaciones externas (Redalyc, 2010).

**4.11.1.4. Protección del Sistema:** Los algoritmos de control pueden detectar fallos y proteger los dispositivos frente a eventos adversos como sobrecargas o sobrecalentamientos (Scielo, 2010).

#### **4.11.2. Estrategias de Control en Convertidores DC-DC**

Diversas estrategias de control se implementan según las características del convertidor y la aplicación. Entre las más destacadas se encuentran:

**4.11.2.1. Control en lazo abierto:** Utilizado en aplicaciones simples, este método no mide ni corrige variaciones en el voltaje de salida. Aunque es sencillo, su desempeño es limitado frente a perturbaciones (Redalyc, 2010).

**4.11.2.2. Control en lazo cerrado:** Este método utiliza retroalimentación para medir constantemente la salida del convertidor y ajustar los parámetros en función de los valores deseados. Es ampliamente utilizado debido a su precisión y estabilidad (Noesis, 2015).

**4.11.2.3. Modulación por Ancho de Pulso (PWM):** Esta estrategia ajusta el tiempo de conducción del interruptor del convertidor para regular la salida. Es una de las técnicas más utilizadas debido a su simplicidad y eficacia (Udec, 2021).

**4.11.2.4. Control Digital:** Basado en microcontroladores o procesadores digitales, este enfoque ofrece flexibilidad y precisión en la implementación de algoritmos avanzados de control (SciELO, 2010).

**4.11.2.5. Control basado en MPPT (Maximum Power Point Tracking):** Específico para sistemas fotovoltaicos, este método asegura que el convertidor opere en el punto de máxima potencia del generador solar, optimizando la extracción de energía (Noesis, 2015).

**4.11.2.6. Control robusto y adaptativo:** Estas estrategias están diseñadas para manejar incertidumbres o perturbaciones significativas en el sistema, garantizando un rendimiento óptimo incluso bajo condiciones cambiantes (Redalyc, 2010).

Los sistemas de control en convertidores DC-DC son esenciales para garantizar el funcionamiento eficiente, estable y seguro de los sistemas eléctricos y electrónicos modernos. Las investigaciones demuestran que estrategias avanzadas de control, como la modulación PWM, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y el control robusto, contribuyen significativamente a optimizar el desempeño de los convertidores en aplicaciones críticas (Udec, 2021). Con los avances en tecnologías digitales, se espera que estas técnicas evolucionen aún más, mejorando la integración de estos dispositivos en sistemas de energía renovable y aplicaciones industriales.

## **4.12. Baterías para Vehículos Eléctricos**

La evolución de las baterías para vehículos eléctricos (VE) es fundamental para la adopción masiva de la movilidad eléctrica. Según la investigación sobre tendencias científicas y tecnológicas mediante vigilancia tecnológica (Cárdenas et al., 2017), se destacan los aspectos

más relevantes en términos de características, tipos y retos tecnológicos asociados con esta tecnología.

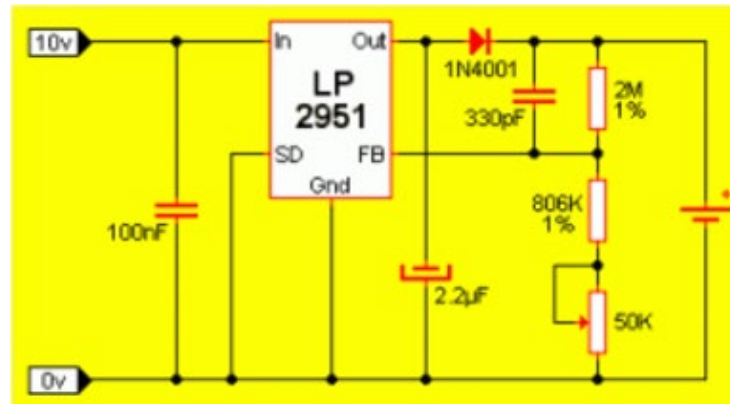


Figura 2. Diagrama de circuito típico de cargador de baterías

Diagrama adaptado del circuito de aplicación típico del regulador LP2951. Fuente: **Texas Instruments. (1999).** LP2950-N, LP2951-N Data Sheet. Disponible en: <https://www.ti.com>

#### 4.12.1. Características y Tipos

Las baterías representan uno de los componentes más críticos en los vehículos eléctricos (VE), ya que determinan aspectos clave como la autonomía, el rendimiento, el tiempo de carga, la eficiencia y el costo total del sistema. En función de sus propiedades técnicas y su evolución tecnológica, las baterías influyen directamente en el diseño de los sistemas de conversión y control de energía, así como en la viabilidad del uso masivo de vehículos eléctricos en diferentes contextos. Por esta razón, resulta fundamental identificar las principales características que definen su comportamiento y desempeño en entornos reales de operación.

##### 4.12.1.1. Características:

De acuerdo con la investigación de (Cárdenas et al., 2017), las baterías utilizadas en VE tienen características clave que influyen en su desempeño y adopción:

**4.12.1.2. Densidad Energética:** Es la capacidad de las baterías para almacenar energía por unidad de peso o volumen, un factor crítico para determinar la autonomía de los vehículos.

**4.12.1.3. Durabilidad y Ciclos de Vida:** Implica la capacidad de las baterías de soportar múltiples ciclos de carga y descarga sin una degradación significativa.

**4.12.1.4. Eficiencia Energética:** Es la proporción de energía almacenada que se puede recuperar para su uso.

**4.12.1.5. Impacto Ambiental:** Se refiere a los materiales empleados, su reciclabilidad y la huella de carbono asociada con su producción.

**4.12.1.6. Costo:** Representa un desafío importante, ya que las baterías constituyen un porcentaje significativo del costo total de los vehículos eléctricos.

#### **4.12.2 Tipos:**

Existen diversos tipos de baterías para VE, cada uno con características específicas:

**4.12.2.1. Baterías de Iones de Litio (Li-Ion):** Tecnología predominante con alta densidad energética y eficiencia.

Principales desafíos: disponibilidad de materiales críticos y gestión térmica.

**4.12.2.2. Baterías de Litio-Fosfato de Hierro (LiFePO<sub>4</sub>):** Ofrecen mayor seguridad y vida útil prolongada. Tienen menor densidad energética en comparación con las baterías tradicionales de Li-Ion.

**4.12.2.3. Baterías de Estado Sólido:** Utilizan electrolitos sólidos en lugar de líquidos. Prometen mayor densidad energética y seguridad, pero presentan retos en su fabricación y costos.

**4.12.2.4. Baterías de Litio-Azufre y Litio-Aire:** Tecnologías emergentes con potencial para superar las limitaciones actuales de densidad energética. Aún se encuentran en fase de investigación y presentan desafíos relacionados con la estabilidad y durabilidad.

**4.12.2.5. Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH):** Utilizadas principalmente en vehículos híbridos. Menor capacidad y densidad energética, pero mayor estabilidad química.

#### **4.13. Retos Tecnológicos**

El desarrollo de baterías para vehículos eléctricos enfrenta importantes desafíos relacionados con los materiales utilizados en su fabricación. La escasez de recursos como el cobalto y el níquel, esenciales para las baterías de iones de litio, plantea la necesidad de buscar alternativas sostenibles y económicas que permitan reducir los costos y la dependencia de recursos limitados. Adicionalmente, el diseño de baterías más eficientes implica desarrollar tecnologías que optimicen el uso de estos materiales y permitan su reemplazo por otros más abundantes o reciclables. Esto es crucial no solo para reducir costos, sino también para garantizar una cadena de suministro más robusta y sostenible (Cárdenas et al., 2017). Otro reto significativo que se presenta en la investigación detallada por (Cárdenas et al., 2017), es la gestión térmica de las baterías, particularmente en las de alta capacidad. La generación de calor durante los procesos de carga y descarga puede ocasionar sobrecalentamiento, afectando su seguridad y rendimiento. Esto exige la implementación de sistemas avanzados de enfriamiento y control que permitan mantener la temperatura de operación dentro de límites seguros sin comprometer la eficiencia. Además, este problema adquiere mayor relevancia en el desarrollo de tecnologías de carga rápida, donde las altas corrientes generan mayor calor y pueden acelerar la degradación de los componentes internos de la batería.

Finalmente, el reciclaje y la reutilización de baterías usadas representan un desafío tecnológico y ambiental. La gran cantidad de baterías que se espera retirar de servicio en los próximos años requiere soluciones innovadoras para su recuperación y procesamiento. Esto

incluye la extracción de materiales valiosos como el litio y el cobalto, así como el desarrollo de procesos que reduzcan el impacto ambiental de su disposición final. Además, la reutilización en aplicaciones como almacenamiento estacionario de energía podría extender su vida útil, optimizando los recursos y reduciendo la generación de residuos. Superar estos retos es esencial para asegurar que la transición hacia la movilidad eléctrica sea verdaderamente sostenible (Cárdenas et al., 2017).

#### **4.14. Implementación en Entorno de Pruebas con Motor DC 12V y Batería TB12-7 12V 7 AH**

Como parte del cumplimiento del objetivo específico 3, se plantea la implementación del sistema de carga en un entorno de pruebas controlado, utilizando un motor DC de 12V como carga simulada y una batería modelo TB12-7 12V 7AH/20HR como fuente de almacenamiento. Esta configuración permite recrear condiciones reales de operación y evaluar parámetros críticos como la eficiencia energética, la estabilidad del sistema de control, los tiempos de carga y la adaptabilidad ante fluctuaciones dinámicas.

##### **4.14.1. Motor DC 12V:**

El motor DC de 12 voltios es una opción común en entornos de prueba debido a su bajo costo, disponibilidad y facilidad de integración. Estos motores tienen una operación lineal en función del voltaje aplicado, lo que los hace ideales para analizar el comportamiento del sistema de control ante variaciones de carga. La corriente típica de operación varía entre 0.5 A y 2 A en carga parcial, y puede alcanzar picos de hasta 5 A bajo carga máxima. Además, su velocidad se puede regular mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), lo cual es especialmente útil para evaluar la respuesta dinámica del convertidor DC/DC.

##### **4.14.2. Batería TB12-7 12V 7AH/20HR:**

La batería TB12-7 es una batería de plomo-ácido sellada (SLA) de 12 voltios con una capacidad de 7 amperios-hora (AH) y un tiempo de descarga de 20 horas (20HR). Se caracteriza por su construcción libre de mantenimiento, lo que la hace adecuada para aplicaciones de laboratorio. Su tensión nominal de 12 V es compatible con la mayoría de los convertidores DC-

DC de bajo voltaje y su capacidad permite ensayos prolongados sin necesidad de recargas constantes.

Los parámetros típicos de esta batería incluyen:

- Voltaje nominal: 12 V
- Capacidad: 7 AH @ 20HR
- Corriente de carga recomendada: 1.05 A
- Corriente máxima de carga: hasta 2.1 A (rápida)
- Vida útil: entre 200–300 ciclos a 100% de descarga

El sistema de control propuesto se conectará entre una fuente de alimentación ajustable (simulando paneles solares) y la batería TB12-7, monitorizando en tiempo real parámetros de voltaje. Adicionalmente, se conectará el motor DC como carga para analizar el comportamiento del sistema en escenarios variables. La integración de sensores de corriente Hall y voltímetros digitales permitirá recopilar datos precisos para analizar la eficiencia energética y la estabilidad del proceso de carga.

Este entorno controlado ofrece una plataforma segura y económica para validar las funcionalidades del convertidor DC-DC y el algoritmo de control embebido, cumpliendo así con los criterios de evaluación definidos en los objetivos del proyecto.

## 5. Metodología

El desarrollo del sistema de control para convertidores DC/DC en la carga de baterías de vehículos eléctricos se llevará a cabo a través de un enfoque experimental y analítico, con el objetivo de diseñar, implementar y evaluar una solución eficiente que optimice la gestión de voltaje y corriente durante la carga. Este sistema se configurará para ser evaluado mediante un banco de baterías fijo y se utilizará un microcontrolador como herramienta central para implementar y probar diversas estrategias de control.

El diseño inicial contempla la selección de un convertidor DC/DC que se adecúe a configuraciones de 12V y 24V, en función de los requerimientos de las baterías que se emplearán en las pruebas. Se prevé utilizar un banco de baterías fijo que simule las condiciones reales de carga, proporcionando un entorno controlado. Asimismo, se programará un microcontrolador para gestionar las señales de voltaje y corriente, y se desarrollarán estrategias de control como el Proporcional-Integral-Derivativo (PID), modulación por ancho de pulso (PWM) y control adaptativo, adaptadas a las condiciones dinámicas del sistema.

Durante la fase de implementación, se instalarán sensores que permitirán monitorear en tiempo real las variables de corriente y voltaje, con el objetivo de transmitir estas señales al microcontrolador para su procesamiento. Posteriormente, este procesa las señales recibidas y envía comandos al convertidor DC/DC, regulando las operaciones de carga según los parámetros previamente definidos. Se integrará un sistema de comunicación mediante señales PWM o de modulación de frecuencia, asegurando la precisión en la regulación de la carga.

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos, se realizan pruebas de desempeño del sistema, evaluando distintas estrategias de control en términos de eficiencia energética, tiempos de carga, estabilidad y adaptabilidad frente a variaciones en las condiciones de operación. Se espera medir indicadores clave como la eficiencia energética del sistema, la estabilidad de las

operaciones ante fluctuaciones, y el comportamiento dinámico del convertidor en distintos escenarios.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se analizará la efectividad del sistema implementado y se desarrollarán recomendaciones para futuras investigaciones. Estas podrían incluir la integración de nuevas tecnologías de control y la adaptación del diseño para escenarios más complejos, con el propósito de contribuir al desarrollo de sistemas de carga avanzados para vehículos eléctricos en el contexto nacional e internacional.

## **6. Resultados**

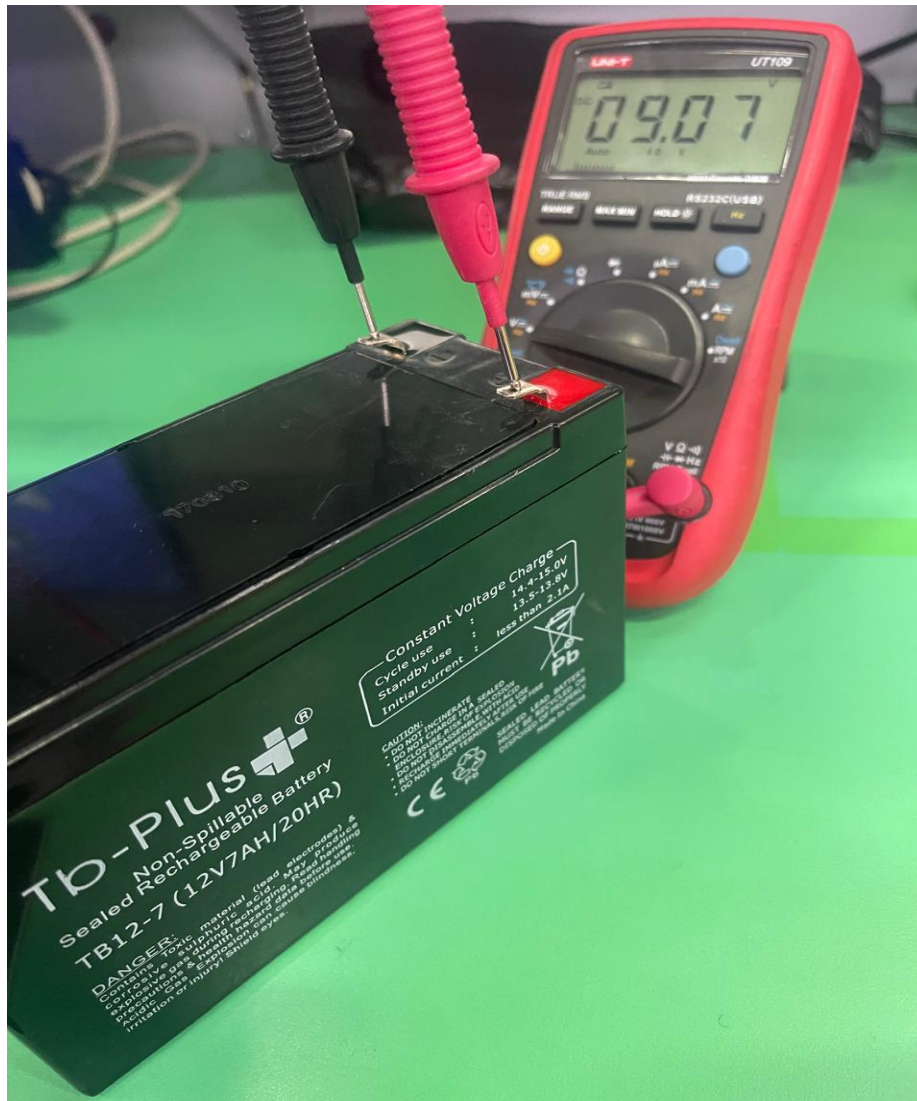
### **6.1. Resultados Experimentales y Análisis**

Para validar el desempeño del sistema de control implementado en convertidores DC/DC, se realizaron pruebas experimentales utilizando una fuente de alimentación regulada, un convertidor tipo buck-boost, una carga representada por un motor DC y una batería TB12-7 (12V/7AH). Durante las pruebas se evaluaron diferentes niveles de tensión de salida (10V, 15V y 30V), monitoreando parámetros como estabilidad, eficiencia energética y comportamiento dinámico en condiciones reales. Las siguientes imágenes y análisis documentan el desarrollo de estas pruebas, destacando tanto el montaje físico como los resultados obtenidos a través de instrumentos de medición digital y osciloscopio.

#### **6.1.1. Montaje Experimental**

A continuación, se presentan imágenes del montaje real del sistema:

Las siguientes imágenes ilustran la disposición de conexión del sistema con el convertidor, equipo de medida, batería y fuente de alimentación. Se utilizó una fuente de alimentación regulada (hasta 30V/5A) y una batería TB12-7 (12V/7AH) de plomo-ácido sellada como carga.



*Figura 3. Nivel de tensión antes de cargar la batería  
Fuente: elaboración propia.*



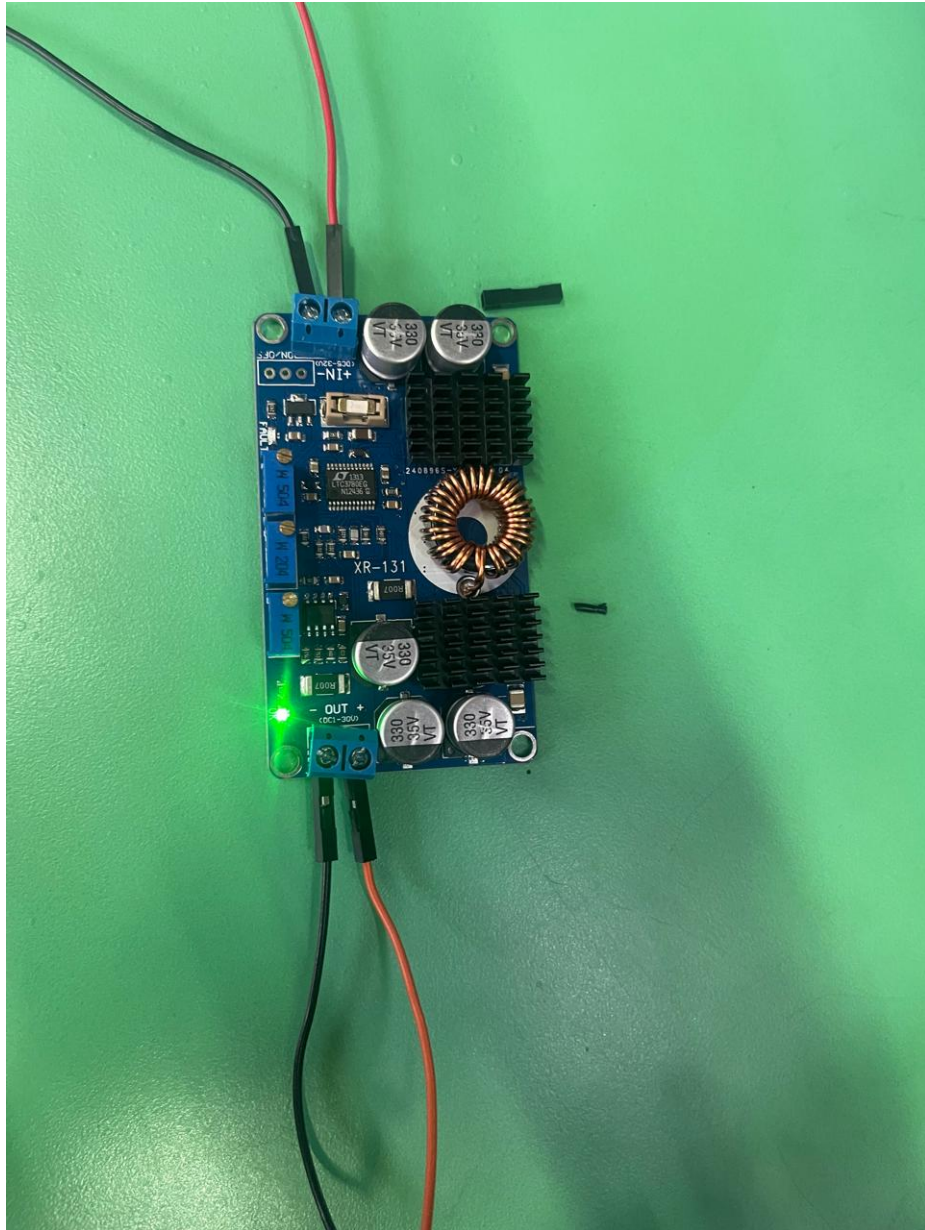
*Figura 4. Conexión de elementos sin suministro de tensión.  
Fuente: elaboración propia.*



*Figura 5. Conexión de batería con suministro de tensión.  
Fuente: elaboración propia.*



*Figura 6. Tensión de batería después de 5 minutos de carga.  
Fuente: elaboración propia.*



*Figura 7. Convertidor DC/DC  
Fuente: elaboración propia.*

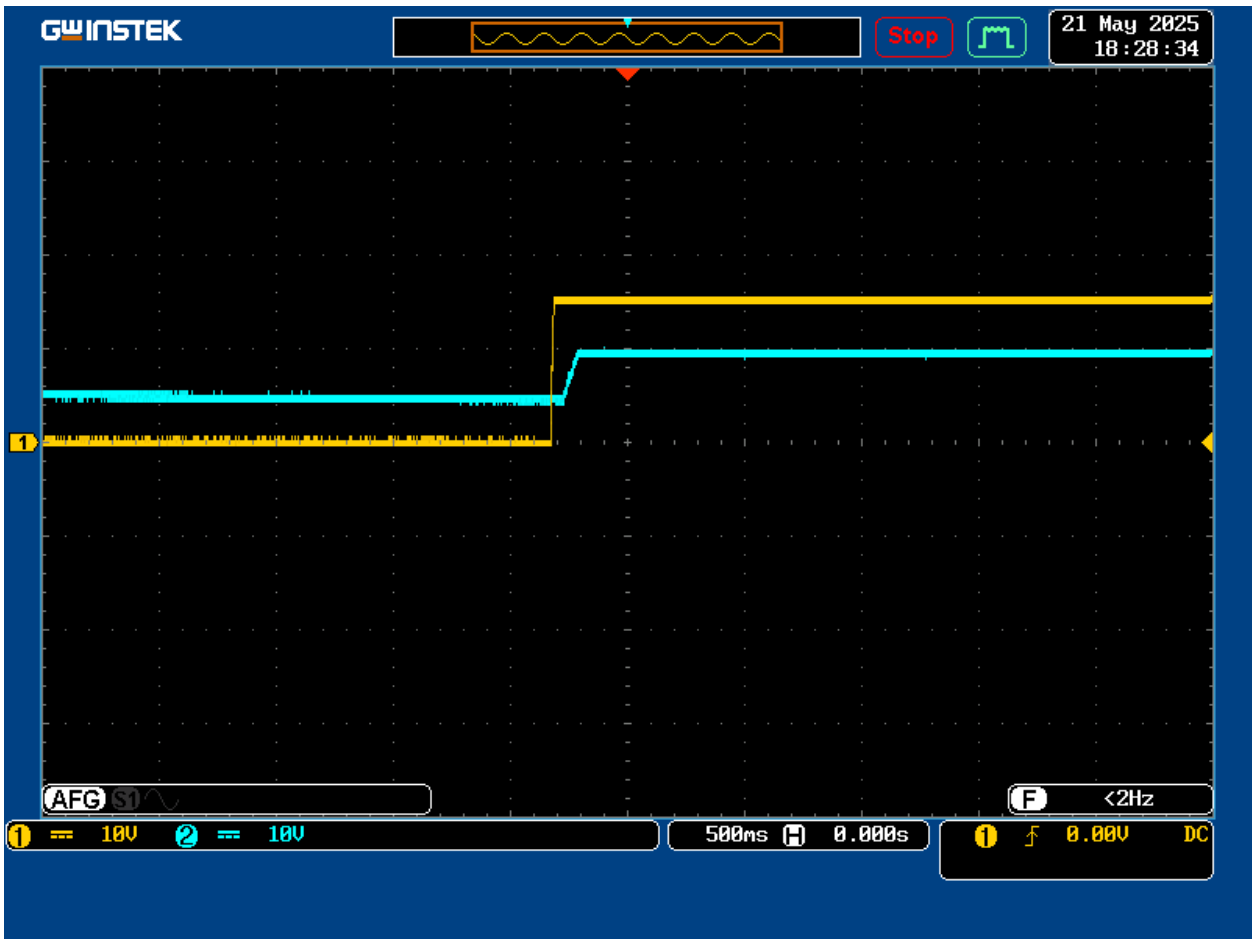
### **6.1.2. Registros de Voltaje y Gráficas de Osciloscopio**

Las siguientes capturas muestran el comportamiento de la señal de voltaje en diferentes configuraciones, registradas con multímetro digital y osciloscopio:

Los resultados obtenidos en la implementación del sistema de control para convertidores DC/DC aplicado a la carga de baterías en vehículos eléctricos. Se realizaron pruebas con diferentes niveles de voltaje de salida (10V, 15V y 30V) manteniendo una entrada constante de 15V, evaluando parámetros como eficiencia energética, estabilidad del sistema y tiempo de respuesta.

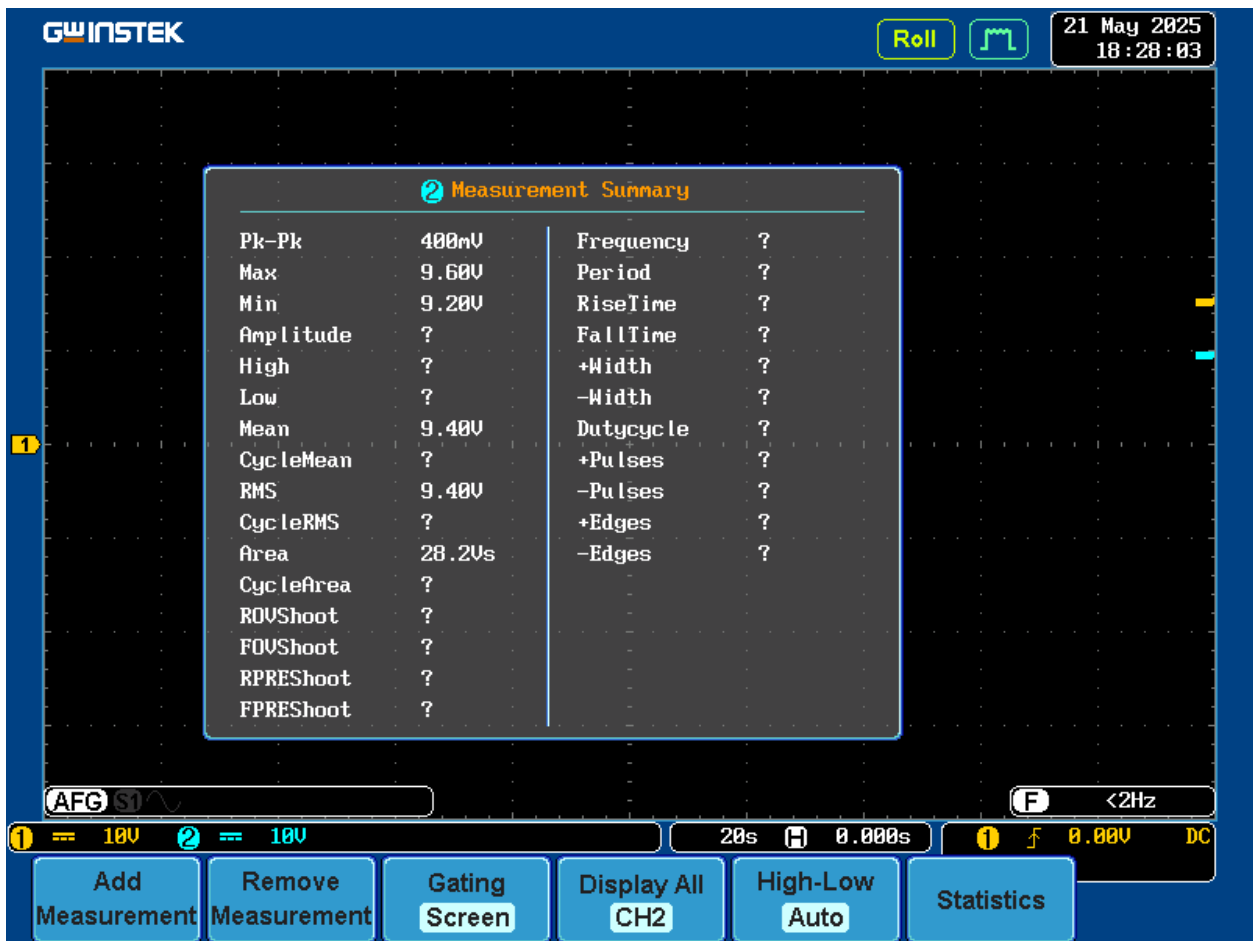
#### **6.1.2.1. Desempeño del sistema con salida de 10V**

La primera prueba se realizó configurando el convertidor para obtener una salida de 10V. En la Figura 8 se observa la gráfica de comportamiento de tensión, donde se destaca una respuesta estable con pequeñas oscilaciones transitorias durante el arranque.



*Figura 8. Gráfica de salida a 10V con entrada de 15V - Motor  
Fuente: elaboración propia  
Nota: se observa respuesta estable con bajo ripple de salida.*

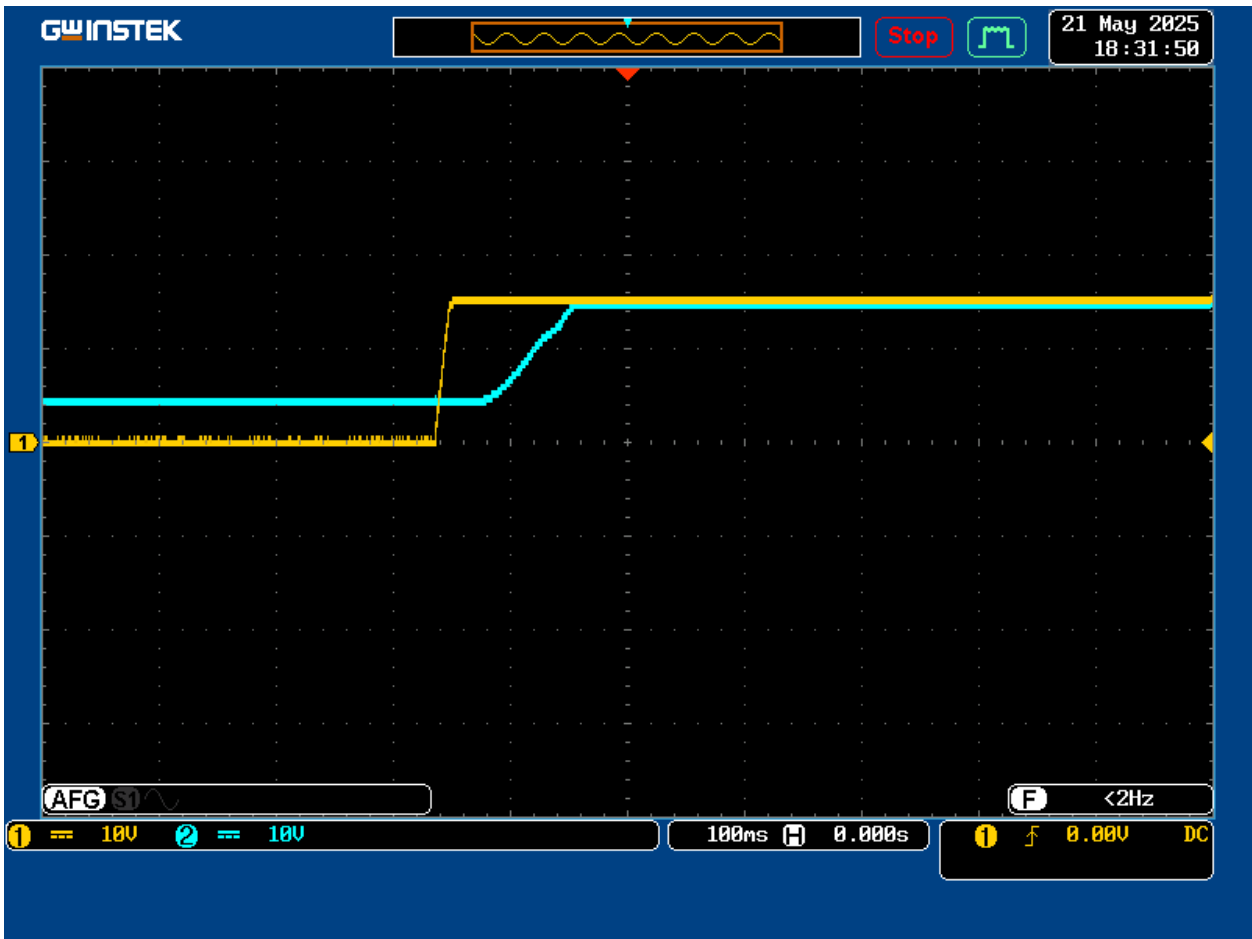
En la Tabla 1 se resumen los valores medidos de entrada, salida, corriente y potencia, los cuales evidencian un rendimiento estable en condiciones de baja demanda energética.



*Tabla 1. Mediciones con entrada de 15V y salida de 10V  
Fuente: elaboración propia*

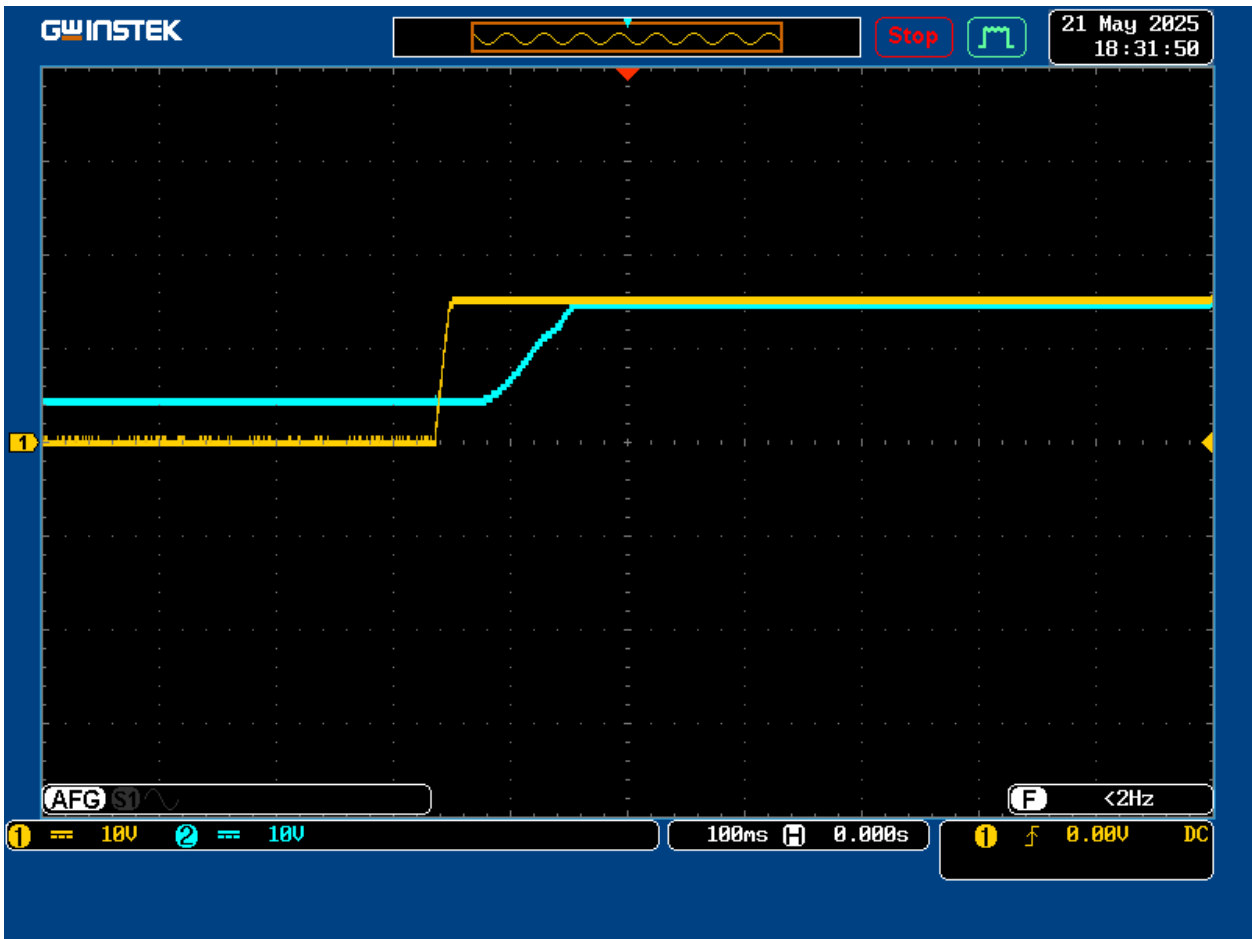
### 6.1.2.2. Desempeño del sistema con salida de 15V

La configuración de salida de 15V mostró una eficiencia considerablemente alta, con mínimas pérdidas por conmutación. Como se aprecia en la Figura 9, el sistema mantuvo la salida sin fluctuaciones relevantes, lo que sugiere un buen desempeño en términos de regulación de voltaje.



*Figura 9. Gráfica de salida a 15V con entrada de 15V - Motor  
Fuente: elaboración propia  
Nota: No se presenta overshoot ni subidas abruptas de tensión.*

En la Figura 10 se consolidan las mediciones obtenidas durante este ensayo, en donde se ratifica una eficiencia cercana al 97 %.

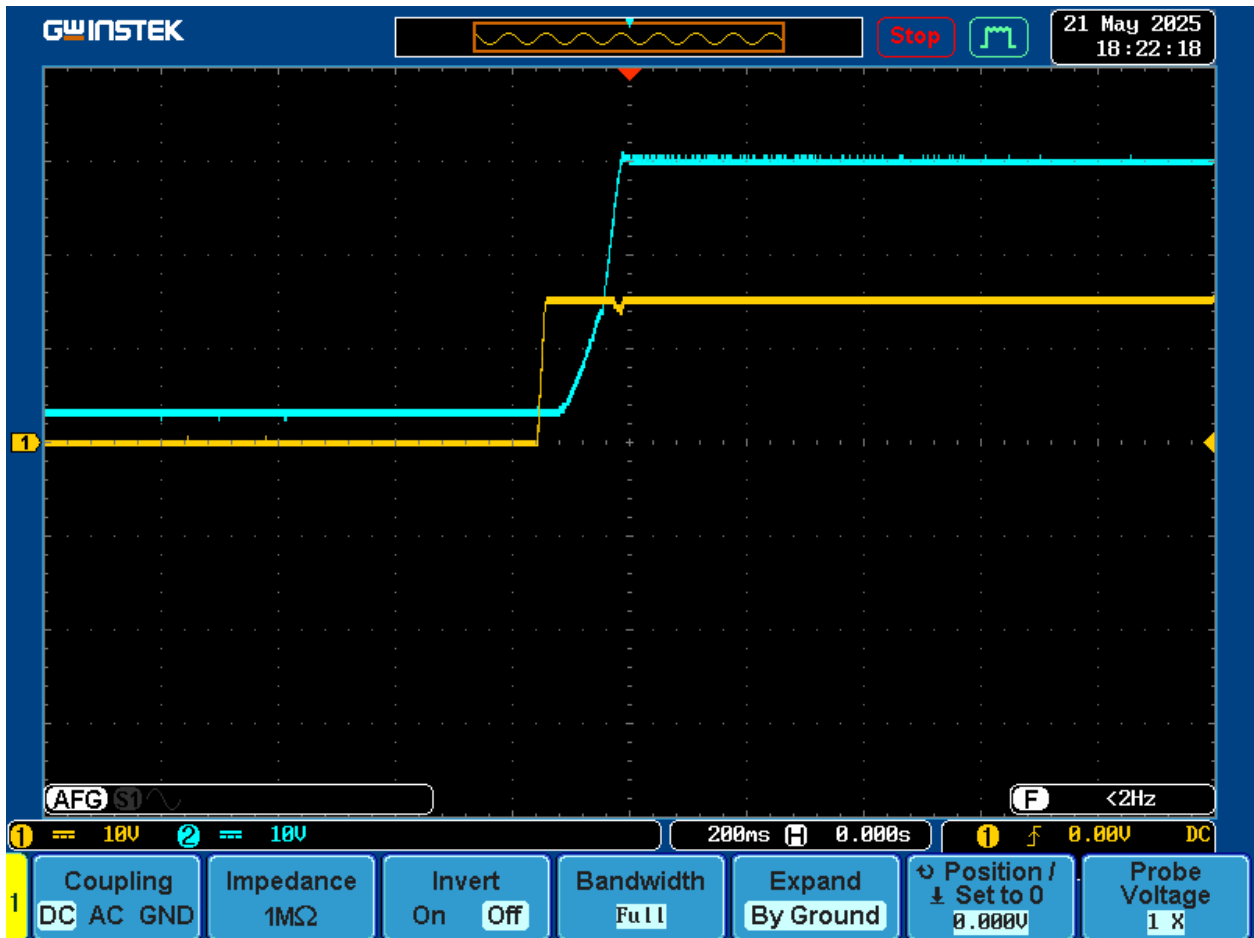


*Figura 10. Mediciones con entrada de 15V y salida de 15V  
Fuente: elaboración propia*

### 6.1.2.3. Desempeño del sistema con salida de 30V

Finalmente, se probó el sistema configurando la salida a 30V, duplicando el voltaje de entrada. En la Figura 11 se ilustra el comportamiento del sistema, que evidencia un breve

sobrepico al iniciar la operación, pero luego logra estabilizarse de forma eficiente.



*Figura 11. Gráfica de salida a 30V con de 15V - Motor*

*Fuente: elaboración propia*

*Nota: No se presenta overshoot inicial, pero la salida se estabiliza rápidamente.*

La Tabla 2 muestra el conjunto de datos que respaldan este comportamiento, incluyendo la potencia de salida, la cual alcanzó su valor máximo en esta configuración.



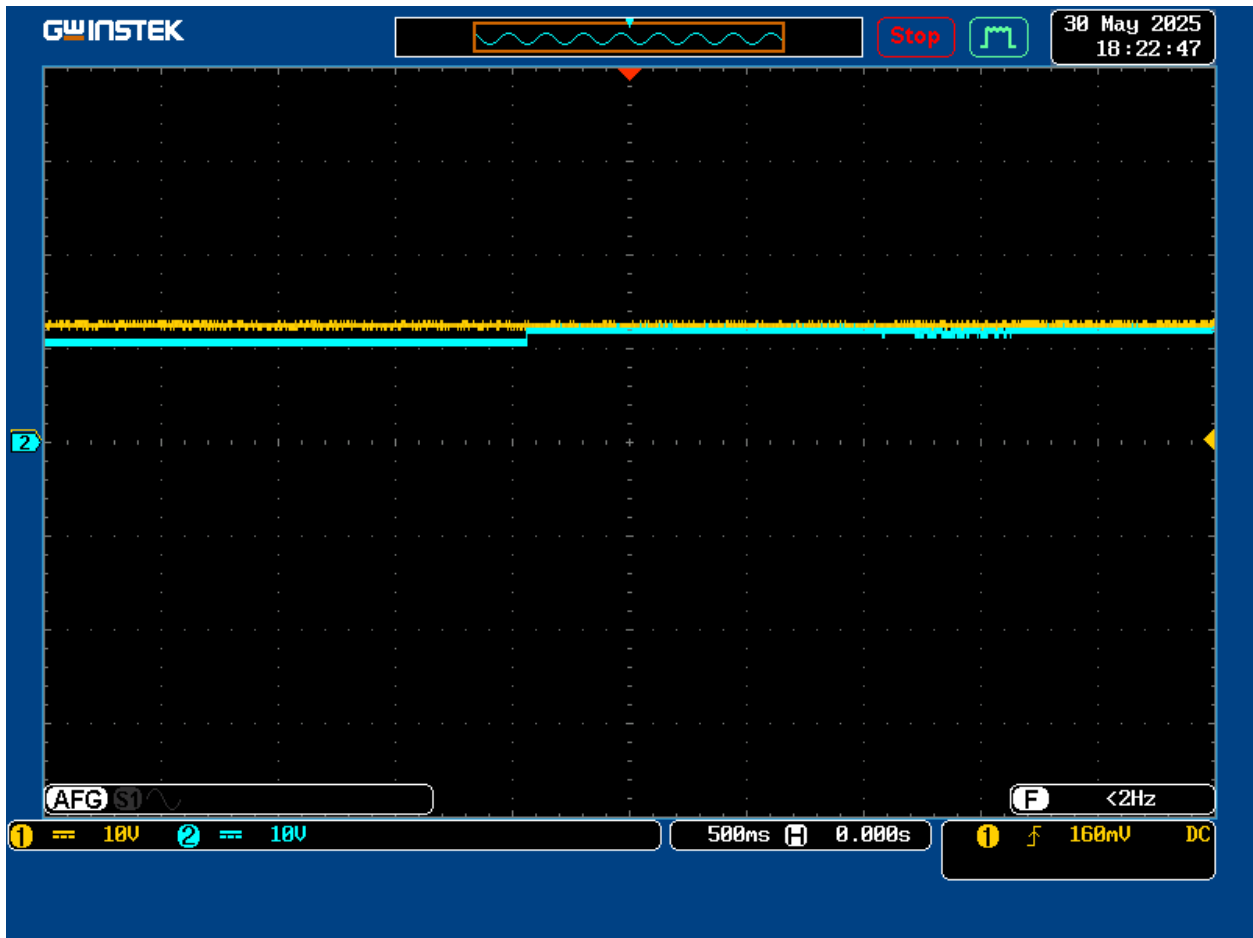
Tabla 2. Mediciones con entrada de 15V y salida de 30V  
Fuente: elaboración propia

### 6.1.3. Análisis comparativo

Al comparar las tres configuraciones evaluadas, se concluye que la eficiencia del sistema fue mayor cuando la relación de entrada y salida era 1:1 (15V–15V), seguida por la configuración en modo reductor (15V–10V). La configuración en modo elevador (15V–30V) presentó un rendimiento ligeramente inferior, principalmente debido a las mayores exigencias energéticas y el estrés sobre los componentes.

Este comportamiento confirma la viabilidad del sistema de control implementado y su capacidad para adaptarse a diferentes requerimientos de carga, manteniendo una alta eficiencia y estabilidad, como lo requería el diseño del proyecto.

### 6.1.3.1 Desempeño del sistema con Batería tipo TB12-7



*Figura 12. Grafica de batería tipo TB12-7  
Fuente: elaboración propia*

El voltaje registrado se mantuvo dentro del rango esperado para una carga segura de baterías de plomo-ácido selladas (13.8–14.4V). Este resultado valida la capacidad del sistema para operar en condiciones reales, confirmando la confiabilidad de la estrategia de control aplicada.

El comportamiento observado refuerza los resultados previos y demuestra que el sistema puede responder de manera estable a la naturaleza dinámica del proceso de carga, adaptándose a las características internas de la batería y conservando su integridad.

## **6.2. Recomendaciones para Pruebas Futuras:**

A partir de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes consideraciones y recomendaciones técnicas para la mejora y ampliación de futuras evaluaciones:

**6.2.1. Pruebas a temperatura controlada:** Realizar ensayos con sensores de temperatura incorporados en el entorno de carga permitirá medir el impacto térmico de cada configuración y evaluar la necesidad de disipadores adicionales.

**6.2.2. Registro de corriente de carga:** Incluir un sensor de corriente de precisión en serie con la batería para graficar el comportamiento conjunto voltaje-corriente y calcular con mayor exactitud la eficiencia energética del sistema.

**6.2.3. Pruebas en ciclo completo de carga-descarga:** Simular escenarios de uso real mediante ciclos automáticos permitirá analizar la durabilidad del sistema y el comportamiento de la batería ante múltiples cargas.

**6.2.4. Uso de otros tipos de batería:** Ampliar las pruebas con baterías de litio-ion o LiFePO<sub>4</sub> para comparar comportamientos y validar la versatilidad del convertidor en diferentes contextos tecnológicos.

**6.2.5. Ensayos con cargas dinámicas:** Incluir un motor DC conectado directamente al convertidor como carga activa para medir la capacidad del sistema ante fluctuaciones instantáneas del consumo.

**6.2.6. Evaluación de eficiencia por etapa:** Separar las pérdidas en la fuente, convertidor y batería mediante medición diferencial para conocer el rendimiento en cada punto del sistema.

Estas recomendaciones permitirán profundizar el análisis técnico del sistema propuesto y elevar el nivel de validación experimental hacia aplicaciones reales en infraestructura de carga para vehículos eléctricos.

## 7. Conclusiones

La selección de la tipología de convertidor más adecuada se realizó con base en criterios de eficiencia, versatilidad y compatibilidad con diferentes configuraciones de carga. El convertidor tipo buck-boost demostró ser el más funcional para adaptarse a distintas marcas y tecnologías de vehículos eléctricos, permitiendo operar en modos reductor, elevador y lineal según las necesidades de voltaje. Esta decisión fue clave para garantizar la aplicabilidad del sistema en escenarios diversos y para asegurar la interoperabilidad del sistema de carga con distintas plataformas tecnológicas.

El sistema de control diseñado, basado en un microcontrolador embebido, permitió una regulación precisa del voltaje y la corriente de salida, asegurando un proceso de carga seguro, eficiente y adaptado a las características específicas de baterías tipo plomo-ácido (como la TB12-7). La implementación de estrategias como modulación por ancho de pulso (PWM) y control proporcional permitió mantener una señal de salida estable, incluso ante variaciones en la carga. Esta solución no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también protege la vida útil de los dispositivos conectados, cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo de diseño del sistema de control avanzado.

La implementación del sistema en un entorno de pruebas controlado permitió evaluar de forma precisa su comportamiento ante diferentes condiciones de operación. Los ensayos realizados con tensiones de salida de 10V, 15V y 30V, así como con una batería TB12-7 de 12V, evidenciaron un desempeño confiable, estable y energéticamente eficiente. La respuesta dinámica del sistema fue positiva, logrando estabilización rápida sin sobrepicos críticos. Estas pruebas validaron la adaptabilidad del sistema ante condiciones variables y confirmaron su viabilidad para aplicaciones reales en la infraestructura de carga para vehículos eléctricos.

## 8. Agradecimientos

Agradecemos profundamente a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto de grado. En primer lugar, extendemos nuestra gratitud a nuestros docentes y asesores académicos, quienes con su guía, conocimientos y orientación nos acompañaron en cada etapa de este proceso formativo. Su experiencia fue clave para el desarrollo riguroso y ético de esta investigación.

Queremos destacar también el apoyo brindado por nuestras familias, quienes, con su comprensión, paciencia y motivación constante, fueron un pilar fundamental para afrontar los retos académicos y personales que implicó esta etapa.

Asimismo, reconocemos el valioso respaldo de la Institución Universitaria Pascual Bravo y de la Facultad de Ingeniería, por brindarnos las herramientas, recursos y espacios necesarios para la ejecución del proyecto. Su compromiso con la investigación y el desarrollo tecnológico ha sido fuente de inspiración y crecimiento profesional.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación titulado “Regulación de frecuencia eléctrica empleando resortes eléctricos en sistemas con alta penetración de energías renovables”, con código PCT0003, de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Nos honra contribuir con esta investigación institucional, cuyo enfoque innovador busca fortalecer la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos en el contexto colombiano.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de manera directa o indirecta, aportaron a la consolidación de este trabajo. Cada contribución, por pequeña que haya sido, tuvo un impacto significativo en nuestro proceso formativo y en los logros alcanzados.

## 9. Referencias Bibliográficas

- Arxiv. (2022). *Integrated Multiport Bidirectional DC-DC Converter for HEV/FCV Applications*. Recuperado de <https://arxiv.org>
- Banco Mundial. (2022). *Vehículos eléctricos: Beneficios económicos y ambientales para los países en desarrollo*. Recuperado de <https://www.bancomundial.org>
- Blog del Transporte e Infraestructura. (2023). *Movilidad eléctrica en Colombia*. Universidad Externado de Colombia. Recuperado de <https://dertransporte.uexternado.edu.co/movilidad-electrica-en-colombia>
- Cárdenas, J., González, L., & Ríos, A. (2017). *Tendencias científicas y tecnológicas de las baterías para vehículos eléctricos, a través de la aplicación de vigilancia tecnológica*. Repositorio ALTEC.
- Carga.com.co. (2024). *La transición energética vehicular en Colombia: Un reto impostergable*. Recuperado de <https://carga.com.co>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Ley 1964 de 2019*. Recuperado de <https://www.congresocolombia.gov.co>
- Core.ac.uk. (2020). *Vehículos eléctricos: Historia, estado actual y retos futuros*. Recuperado de <https://core.ac.uk>
- Dols Ruis, J. F. (2012). El futuro del vehículo ¿eléctrico?. Etrasa. Publicado en línea el 12 de mayo de 2012.
- Enel X. (2023). *Análisis de la movilidad eléctrica en Colombia*. Recuperado de <https://www.enelx.com/>
- Goldman, A. R., Rotondo, F. S., & Swallow, J. G. (2019). *The electric vehicle battery supply chain*. En *Lithium ion battery industrial base in the U.S. and abroad*. Institute for Defense Analyses. Recuperado de <http://www.jstor.com/stable/resrep22804.5>
- IEEEExplore. (2023). *A Review on DC-DC Converters Used in Electric Vehicles*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org>

IEEE. (2020). *Bidirectional DC-DC Resonant Converter Design for Electric Vehicle Charging Stations Integration to MVDC Grids*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9242656>

International Energy Agency. (2023). *Eficiencia energética y beneficios económicos de los vehículos eléctricos*. Recuperado de <https://www.iea.org>

International Energy Agency. (2023). *Global EV Outlook 2023*. Recuperado de <https://www.iea.org/>

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Estrategia Nacional para la Infraestructura de Carga para vehículos eléctricos*. Recuperado de <https://www.minenergia.gov.co>

Natural Resource Governance Institute. (2021). *Cadena global de suministro para baterías de vehículos eléctricos: Implicaciones de gobernanza. En Minerales estratégicos, cadenas de suministro y gobernanza en los Andes: Hacia una agenda de incidencia de la sociedad civil*. Natural Resource Governance Institute. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/resrep42307.7>

Noesis UIS. (2015). *Convertidores DC-DC en sistemas fotovoltaicos: estrategias de control para el seguimiento del punto de máxima potencia*. Recuperado de Noesis UIS.

RACE. (2023). *Costos operativos y mantenimiento de los vehículos eléctricos*. Recuperado de <https://www.race.es>

Redalyc. (2010). *Controlador robusto basado en la técnica QFT para convertidores DC-DC Buck-Boost en sistemas fotovoltaicos*. Recuperado de [Redalyc](https://www.redalyc.org/).

Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2024). *Informe sobre la infraestructura de carga en Colombia*. Recuperado de <https://www.runt.com.co>

Repositorio Comillas. (2018). *Análisis de la evolución y el impacto de los vehículos eléctricos en la sociedad*. Recuperado de <https://repositorio.comillas.edu>

Ride. (2023). *El vehículo eléctrico: Una solución sostenible para el futuro del transporte*. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es>

Scielo. (2010). *Implementación de una nueva técnica de control digital para convertidores DC-DC y DC-AC*. Recuperado de [Scielo](#).

Scielo.org.mx. (2020). *Tecnologías en los sistemas de propulsión híbridos: Revisión de literatura*. Recuperado de <https://scielo.org.mx>

Scielo.org.mx. (2019). *Vehículos eléctricos: ¿Una solución para reducir los gases de efecto invernadero?*. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx>

Udec. (2021). *Topologías y estrategias de control de convertidores DC/DC de potencia parcial para sistemas fotovoltaicos*. Recuperado de Udec.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2024). *Análisis de viabilidad de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos en Colombia*. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co>

Universidad Externado de Colombia. (2023). *Movilidad eléctrica en Colombia*. Blog del Transporte e Infraestructura. Recuperado de <https://dertransporte.uexternado.edu.co>

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2023). *Vehículos eléctricos: La ruta hacia el futuro*. Recuperado de <https://ciencia.unam.mx>