



---

**Universidad de Valladolid**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS DOCTORAL:

**DISEÑO, VALIDACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS Y  
ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN Y CONTROL PARA LA  
INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y MOVILIDAD  
ELÉCTRICA EN MICRORREDES**

Presentada por Miguel Alberto Dávila Sacoto para  
optar al grado de  
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Ángel Luis Zorita Lamadrid

Luis Hernández Callejo

Luis Gerardo González Morales

A mi mamá, a mi abuelita, a mi esposa y a mi hija

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## **Agradecimientos**

---

La culminación de esta tesis doctoral no habría sido posible sin el apoyo, la guía y el aliento de numerosas personas e instituciones a lo largo de este desafiante pero gratificante camino.

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a mi tutor, el Ing. Ángel Luis Zorita Lamadrid, y a mis directores, el Ing. Luis Hernández Callejo y el Ing. Luis Gerardo González Morales. Su experiencia, orientación y apoyo incondicional han sido esenciales para la realización de este trabajo. Sus valiosas sugerencias y su paciencia inagotable han sido una fuente constante de inspiración y motivación.

Agradezco a la Universidad de Valladolid y a la Universidad de Cuenca por brindarme los recursos y el entorno necesarios para llevar a cabo esta investigación. La colaboración entre estas dos prestigiosas instituciones ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto. Agradezco también a los miembros del cuerpo docente y al personal administrativo de ambas universidades por su apoyo constante y sus aportes significativos.

A mi familia, gracias por su paciencia y comprensión. Su apoyo incondicional y su confianza en mí han sido fundamentales para alcanzar este logro. A mi esposa y a mi hija, gracias por su paciencia y por ser mi fuente de alegría y fortaleza durante estos años.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro es tanto suyo como mío.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Preámbulo

---

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de una transición hacia fuentes de energía sostenibles han impulsado el desarrollo y la integración de tecnologías renovables y de movilidad eléctrica en los sistemas energéticos. En este contexto, la energía solar fotovoltaica y los vehículos eléctricos (VEs) representan dos pilares fundamentales para construir un futuro energético más limpio y eficiente. Sin embargo, la intermitencia de la energía solar y la gestión de la carga de los VEs plantean desafíos significativos para la estabilidad y la eficiencia de la red eléctrica.

Este trabajo de investigación nace con el objetivo de abordar estos desafíos mediante el diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control que faciliten la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes.

El enfoque metodológico de este trabajo se estructura en varias fases, comenzando con una revisión del estado del arte y la recopilación de información teórica, seguida por el diseño e implementación de propuestas de control y algoritmos, y culminando con la validación experimental y el análisis de los resultados obtenidos. Este enfoque integral permite abordar los problemas desde múltiples perspectivas, asegurando que las soluciones propuestas sean robustas, eficientes y aplicables en entornos reales.

La colaboración entre la Universidad de Valladolid y la Universidad de Cuenca ha sido un componente clave en el desarrollo de esta investigación. La combinación de conocimientos y recursos de ambas instituciones ha permitido avanzar en la frontera del conocimiento y desarrollar soluciones innovadoras que contribuyen significativamente al campo de las energías renovables y la movilidad eléctrica. Así se aprovechó la vinculación entre las universidades para tener acceso al que es catalogado como uno de los mejores laboratorios de microrredes de Latinoamérica, el laboratorio de microrred de la Universidad de Cuenca, en el cual se pudieron ejecutar experimentos muy importantes utilizando tecnología de punta y vehículos eléctricos para complementar la fase práctica de esta tesis.

A través de este trabajo, se busca no solo contribuir al avance científico y tecnológico, sino también fomentar la adopción de tecnologías sostenibles que promuevan la transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente. Los resultados y las contribuciones de esta tesis tienen el potencial de impactar positivamente en la sociedad, mejorando la calidad de vida y contribuyendo a la lucha contra el cambio climático mediante la adopción segura de movilidad eléctrica.

Al amparo de la normativa vigente esta Tesis Doctoral se presenta como un compendio de publicaciones.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

A continuación, se detallan los artículos publicados incluidos en el compendio de publicaciones que han dado origen a la tesis, los cuales se presentan en el Capítulo II. Los artículos se han organizado siguiendo un orden conceptual que da sentido a la tesis doctoral.

Artículo 1: Publicado el 20 de junio de 2022.

Tipo	Artículo de investigación
Título	Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation
Autores	Ivania Aguirre, Miguel Dávila-Sacoto, L. G. González, Luis Hernández-Callejo, Óscar Duque-Pérez, Ángel Luis Zorita-Lamadrid and Juan L. Espinoza
Revista	Applied Sciences 2022, 12(12), 6246.
Edición especial	CITIES II: Energetic Efficiency, Sustainability; Infrastructures, Energy and the Environment; Mobility and IoT; Governance and Citizenship
Categoría Scopus	Engineering, General Engineering (73/302) Q1
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2022 - Impact Factor (IF):2,7(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2022 - 0,492 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/app12126246">https://doi.org/10.3390/app12126246</a>

Artículo 2: Publicado el 26 de mayo del 2023.

Tipo	Artículo de investigación
Título	Harmonic Distortion and Hosting Capacity in Electrical Distribution Systems with High Photovoltaic Penetration: The Impact of Electric Vehicles
Autores	Miguel Dávila-Sacoto, L. G. González, Luis Hernández-Callejo, Óscar Duque-Perez, Ángel L. Zorita-Lamadrid, Víctor Alonso-Gómez and J. L. Espinoza
Revista	Electronics 2023, 12(11), 2415.
Edición especial	Advances in Renewable Energy and Energy Storage
Categoría Scopus	Engineering, Electrical and Electronic (244/797) Q2
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):2,6(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,644 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/electronics12112415">https://doi.org/10.3390/electronics12112415</a>

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Artículo 3: Publicado el 06 de diciembre del 2023.

Tipo	Artículo de investigación
Título	Location of Electric Vehicle Charging Stations in Inter-Andean Corridors Considering Road Altitude and Nearby Infrastructure
Autores	Miguel Dávila-Sacoto, Marco A. Toledo, Luis Hernández-Callejo, L. G. González, Carlos Alvarez Bel and Ángel L. Zorita-Lamadrid
Revista	Sustainability 2023, 15(24),16582.
Categoría Scopus	Energy, Energy Engineering and Power Technology (69/272) Q2
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):3.3(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,672 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/su152416582">https://doi.org/10.3390/su152416582</a>

Artículo 4: Publicado el 10 de junio del 2024.

Tipo	Artículo de investigación
Título	Heterogeneous Communication Network Architecture for the Management of Electric Vehicle Charging Stations: Multi-Aggregator Management in Microgrids with High Photovoltaic Variability Based on Multiple Solar Radiation Sensors
Autores	Miguel Davila-Sacoto, Luis Hernández-Callejo, L. G. González, Óscar Duque-Perez, Ángel L. Zorita-Lamadrid and Danny Ochoa-Correa
Revista	Sensors 2024, 24(12), 3768.
Edición especial	Intelligent Sensors
Categoría Scopus	Engineering, Electric and Electronic Engineering (163/797) Q1
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):3.4(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,786 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/s24123768">https://doi.org/10.3390/s24123768</a>

Además de los artículos mencionados previamente, en el anexo A se incluyen otros trabajos que se llevaron a cabo dentro del contexto de esta línea de investigación y contribuyeron al desarrollo de esta tesis doctoral.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Artículo adicional 1: Publicado el 27 de mayo del 2021

Tipo de artículo	Artículo de investigación
Título	A Review of I–V Tracers for Photovoltaic Modules: Topologies and Challenges
Autores	José Ignacio Morales-Aragonés, Miguel Dávila-Sacoto, Luis G. González, Víctor Alonso-Gómez, Sara Gallardo-Saavedra and Luis Hernández-Callejo
Revista	Electronics 2021, 10(11), 1283.
Edición especial	Operation and Control of Power Systems
Categoría	Engineering, Electrical and Electronic Engineering (280/708) Q2
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2021 - Impact Factor (IF):2.69(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2021 - 0,628 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/electronics10111283">https://doi.org/10.3390/electronics10111283</a>

Artículo adicional 2: Publicado en noviembre del 2020

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Benefits of the integration of photovoltaic solar energy and electric mobility
Autores	Miguel Dávila-Sacoto, L.G. González, J.L. Espinoza, and Luis Hernández-Callejo
Conferencia	III Ibero-American Conference on Smart Cities (ICSC-2020)

Artículo adicional 3: Publicado en noviembre del 2021

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Charging control of electric vehicles in microgrids with high penetration of photovoltaic generation: an integrated simulation method with Python and OpenDSS
Autores	Miguel Davila, Oscar Duque Perez, Luis Hernández Callejo, Luis Gonzalez, Angel Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	IV Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2021)
ISBN	978-607-99960-0-0

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Artículo adicional 4: Publicado en noviembre del 2021

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Charge management of electric vehicles from undesired dynamics in solar photovoltaic generation
Autores	Ivania Aguirre, Miguel Davila, Luis Gonzalez, Luis Hernández Callejo and Juan Espinoza
Conferencia	IV Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2021)
ISBN	978-607-99960-0-0

Artículo adicional 5: Publicado en noviembre del 2022

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Development of Electric Vehicles Charging Corridors for Steep Elevation Highways. Case study: Cuenca-Ecuador
Autores	Miguel Davila, Marco Toledo, Luis Hernández Callejo, Luis Gonzalez and Carlos Alvarez
Conferencia	V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)
ISBN	978-9942-44-109-6

Artículo adicional 6: Publicado en noviembre del 2022

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Harmonic impact of Electric vehicles in Electrical Distribution Systems with high photovoltaic penetration
Autores	Miguel Davila, Luis González, Luis Hernández Callejo, Oscar Duque-Perez, Ángel L Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)
ISBN	978-9942-44-109-6

Artículo adicional 7: Publicado en noviembre del 2023

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Benefits of multiple Electric vehicle aggregators in mountainous areas with high variability of photovoltaic resources
Autores	Miguel Davila, Luis González, Luis Hernández Callejo, Oscar Duque-Pérez, Ángel L Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	VI Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2023)
ISBN	978-607-99960-1-7

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Contenido

Índice de tablas .....	9
Abstract .....	10
Resumen .....	11
<b>Capítulo I. Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Justificación .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Marco conceptual .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Hipótesis y objetivos .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4. Colaboración con Otros Grupos de Investigación .....</b>	<b>23</b>
1.4.1. Universidad de Valladolid y Universidad de Cuenca .....	23
1.4.2. Universidad de Valencia y Empresa Eléctrica Regional Centro Sur ..	23
1.4.3. Publicación y Difusión de Resultados .....	23
1.4.4. Transferencia de Tecnología .....	24
<b>1.5. Metodología .....</b>	<b>24</b>
1.5.1. Fases llevadas en la investigación .....	24
1.5.2. Revisión del Estado del Arte .....	26
1.5.3. Diseño y Simulación de Algoritmos de Control .....	28
1.5.4. Desarrollo de Arquitecturas de Comunicación .....	34
1.5.5. Diseño de software y hardware .....	46
1.5.6. Análisis del Impacto de los Armónicos .....	63
<b>1.6. Resultados y Discusión .....</b>	<b>65</b>
<b>1.7. Referencias .....</b>	<b>80</b>
<b>Capítulo II. Artículos Publicados .....</b>	<b>85</b>
<b>2.1. Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation .....</b>	<b>85</b>
<b>2.2. Harmonic Distortion and Hosting Capacity in Electrical Dis-tribution Systems with High Photovoltaic Penetration: The Impact of Electric Vehicles ..</b>	<b>85</b>
<b>2.3. Location of electric vehicle charging stations in inter-Andean corridors considering road altitude and nearby infrastructure .....</b>	<b>86</b>
<b>2.4. Heterogeneous Communication Network Architecture for the Management of Electric Vehicle Charging Stations: Mul-ti-Aggregator Management in Microgrids with High Photovol-taic Variability Based on Multiple Solar Radiation Sensors .....</b>	<b>87</b>
<b>Capítulo III. Conclusiones y trabajo futuro .....</b>	<b>88</b>

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Índice de tablas

Tabla 1. Sistemas de comunicación utilizados en VGI .....	38
Tabla 2. Modos de carga de vehículos eléctricos.....	54
Tabla 3. Autonomía de vehículos eléctricos en Ecuador .....	57
Tabla 4. Distancia en vehículo a diferentes ciudades.....	58
Tabla 5. Carga y descarga de vehículos .....	68
Tabla 6. Características de rutas analizadas.....	70
Tabla 7. Cantidad de estaciones usadas.....	71
Tabla 8. Magnitudes y ángulos de armónicos medidos en vehículos eléctricos .....	73
Tabla 9. Capacidad de alojamiento por armónico .....	76

## Abstract

---

The transition towards sustainable energy systems depends crucially on the effective integration of renewable energy sources and electric mobility. This PhD thesis focuses on the design, validation and implementation of communication and control algorithms and architectures that facilitate the integration of solar photovoltaic and electric vehicles (EVs) in microgrids. The research addresses key challenges such as solar power intermittency and EV load management, proposing solutions that improve grid stability and efficiency.

This PhD thesis presents a comprehensive approach for the design, validation and implementation of communication and control algorithms and architectures that facilitate the integration of solar PV and electric mobility in microgrids.

First, a review of the state of the art of solar energy and electric mobility technologies, as well as the control and management strategies used in these systems is carried out. This review includes the analysis of hybrid methodologies for energy management in microgrids, highlighting the role of EVs as energy storage systems that can mitigate fluctuations in PV generation.

Then, intelligent load control algorithms are developed and validated to optimize the use of EV batteries. These algorithms are designed to manage the charging and discharging of EVs based on variations in solar power generation and grid conditions. The algorithms are integrated into advanced simulation platforms, such as MATLAB and OpenDSS, to assess their impact on the power grid and enable the implementation of efficient charging strategies. Simulation results have shown that these algorithms can significantly reduce power fluctuations and improve grid stability.

Finally, a decentralized communication architecture is implemented and tested to facilitate the interaction between PV generators and local control systems in microgrids. This architecture is designed to support real-time power management, improving system response to variations in the PV resource considering high cloud cover conditions in areas where high PV penetration is expected. Simulations have shown that this architecture enables efficient and secure power management, reducing voltage fluctuations at customer terminals, i.e. improving power quality through the proper distribution of electric vehicle aggregators.

In addition, an analysis of the impact of harmonics generated by EV charging stations in grids with high PV penetration has been carried out. This analysis has revealed that the magnitude of the third harmonic can increase significantly, affecting the capacitance of the EVs.

## Resumen

---

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles depende crucialmente de la integración efectiva de fuentes de energía renovable y la movilidad eléctrica. Esta tesis doctoral se centra en el diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control que faciliten la integración de la energía solar fotovoltaica (PV) y los vehículos eléctricos (VEs) en microrredes. La investigación aborda desafíos clave como la intermitencia de la energía solar y la gestión de la carga de los VEs, proponiendo soluciones que mejoren la estabilidad y eficiencia de la red eléctrica.

Esta tesis doctoral presenta un enfoque integral para el diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control que faciliten la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes.

Primero, se realiza una revisión del estado del arte de las tecnologías de energía solar y movilidad eléctrica, así como las estrategias de control y gestión utilizadas en estos sistemas. Esta revisión incluye el análisis de metodologías híbridas para la gestión de energía en microrredes, destacando el papel de los VEs como sistemas de almacenamiento energético que pueden mitigar las fluctuaciones en la generación PV.

Después, se desarrollan y validan algoritmos de control de carga inteligente para optimizar el uso de las baterías de los VEs. Estos algoritmos están diseñados para gestionar la carga y descarga de los VEs en función de las variaciones en la generación de energía solar y las condiciones de la red. Los algoritmos se integran en plataformas de simulación avanzadas, como MATLAB y OpenDSS, para evaluar su impacto en la red eléctrica y permitir la implementación de estrategias de carga eficientes. Los resultados de las simulaciones han demostrado que estos algoritmos pueden reducir significativamente las fluctuaciones de potencia y mejorar la estabilidad de la red.

Finalmente, se implementa y prueba una arquitectura de comunicación descentralizada que facilitan la interacción entre los generadores fotovoltaicos y los sistemas de control local en las microrredes. Esta arquitectura está diseñada para soportar la gestión en tiempo real de la energía, mejorando la respuesta del sistema a las variaciones en el recurso fotovoltaico considerando condiciones de alta nubosidad en zonas donde se espera una alta penetración de energía fotovoltaica. Las simulaciones han demostrado que esta arquitectura permite una gestión eficiente y segura de la energía, reduciendo las fluctuaciones de tensión en bornes del cliente, es decir, mejorando la calidad de la energía mediante la distribución adecuada de los agregadores de vehículos eléctricos.

Además, se ha llevado a cabo un análisis del impacto de los armónicos generados por las estaciones de carga de VEs en redes con alta penetración fotovoltaica. Este análisis ha revelado que la magnitud del tercer armónico puede aumentar significativamente, afectando la capacidad de alojamiento de la red.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Los resultados obtenidos demuestran que la integración adecuada de estos sistemas puede reducir significativamente las fluctuaciones de tensión y potencia, mejorar la estabilidad de la red y la calidad de energía.

Esta investigación contribuye al avance científico y tecnológico en el campo de las energías renovables y la movilidad eléctrica, proporcionando herramientas y estrategias para una integración más eficiente y sostenible de estas tecnologías en los sistemas energéticos actuales. La colaboración internacional y la transferencia de conocimientos han sido fundamentales para el éxito de esta investigación, permitiendo compartir recursos y tecnologías, y promoviendo el desarrollo de soluciones prácticas y escalables que pueden ser adoptadas globalmente.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Capítulo I. Introducción

---

Esta tesis doctoral comienza con una introducción que justifica la conexión temática entre las publicaciones del compendio de publicaciones y la pertinencia de su contribución.

Para ello, en la primera sección se expone el marco conceptual utilizado para esta investigación y, a continuación, en la segunda, la justificación de la investigación. La tercera sección detalla los objetivos generales y específicos del estudio. Posteriormente, la cuarta sección describe las colaboraciones llevadas a cabo con el grupo de investigación de la Universidad de Cuenca. La siguiente sección se centra en las fases del proyecto y la metodología empleada, para culminar en la sexta sección con un resumen de los resultados más relevantes y su análisis.

### 1.1. Justificación

La integración de la energía solar fotovoltaica y los vehículos eléctricos en las microrredes es crucial para avanzar hacia un sistema energético más sostenible y eficiente. La justificación de este planteamiento se basa en varios aspectos clave que subrayan su importancia y necesidad.

El cambio climático y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero son problemas mundiales acuciantes. Las fuentes de energía renovables, como la solar fotovoltaica, ofrecen una solución limpia que reduce significativamente las emisiones de carbono en comparación con las fuentes de energía tradicionales basadas en combustibles fósiles. Al integrar los vehículos eléctricos, que también reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> al sustituir a los vehículos de combustión interna, se maximiza el impacto positivo sobre el medio ambiente.

Una microrred soluciona varios problemas asociados a la gestión y distribución de energía, especialmente en contextos donde la red eléctrica tradicional puede ser ineficiente, poco confiable o costosa. Una microrred es un sistema energético descentralizado que combina diversas fuentes de generación de energía, almacenamiento y consumo dentro de un área geográfica delimitada, como una comunidad, campus o complejo industrial. Funciona como una unidad independiente, capaz de operar conectada a la red eléctrica principal o de manera aislada, lo que le permite garantizar un suministro continuo de energía en caso de fallos en la red general.

Las microrredes suelen integrar tecnologías renovables como la energía solar o eólica, sistemas de baterías, y generadores convencionales, lo que permite optimizar el uso de energía y reducir las emisiones de carbono. Además, proporcionan flexibilidad y resiliencia energética, ya que pueden adaptarse a las necesidades específicas de la comunidad que abastecen y mejorar la gestión del consumo de energía en tiempo real.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Es una solución eficiente y sostenible para asegurar un suministro energético seguro y confiable, contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico y a la integración de fuentes de energía más limpias y económicas.

Las microrredes permiten una gestión eficiente y local de la energía mediante la integración de diversas fuentes de generación distribuida, como la solar y los VE. La capacidad de los vehículos eléctricos para participar en sistemas de vehículo a red (V2G) proporciona una flexibilidad adicional, permitiendo el ajuste dinámico de la demanda y el suministro de energía en función de las condiciones actuales de la red y las necesidades del sistema. Esto no sólo optimiza el uso de los recursos energéticos disponibles, sino que también reduce los costes de funcionamiento y mejora la eficiencia global del sistema eléctrico.

Las microrredes pueden funcionar de forma autónoma, desconectándose de la red principal en caso de emergencia o fallo de la red. Esta capacidad de funcionamiento en isla aumenta la resistencia del sistema eléctrico, garantizando un suministro continuo de energía incluso en situaciones adversas. La integración de la energía fotovoltaica y los vehículos eléctricos en microrredes mejora esta capacidad al proporcionar fuentes de energía locales y almacenamiento, reduciendo la dependencia de la red principal y aumentando la autonomía energética de las comunidades.

La intermitencia de la generación de energía solar plantea retos para la estabilidad de las microrredes. Los VE pueden actuar como sistemas de almacenamiento de energía, almacenando el exceso de energía generada durante los periodos de alta irradiación solar y devolviéndola a la red cuando la generación es baja. Esto ayuda a mitigar las fluctuaciones en la generación de energía, mejorando la estabilidad y fiabilidad de la red.

La investigación y el desarrollo en el campo de la integración fotovoltaica y de vehículos eléctricos en microrredes impulsan la innovación tecnológica. Esto no sólo mejora la gestión actual de la energía, sino que también abre nuevas oportunidades para el desarrollo de tecnologías avanzadas, como algoritmos de control y arquitecturas de comunicación. Estas innovaciones son esenciales para abordar los retos técnicos y operativos asociados a la integración de las energías renovables y la movilidad eléctrica en los sistemas energéticos modernos.

En conclusión, la integración de la energía solar fotovoltaica y los vehículos eléctricos en microrredes puede lograrse mediante la integración de la energía solar fotovoltaica y los vehículos eléctricos en microrredes.

## 1.2. Marco conceptual

La integración de la energía solar fotovoltaica (PV) y la movilidad eléctrica en microrredes plantea un reto importante en el diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control [1]. Las microrredes, con su capacidad para integrar diversas fuentes de energía y gestionar cargas, ofrecen una solución prometedora para la integración sin fisuras de sistemas solares fotovoltaicos y vehículos eléctricos (VE).

La naturaleza impredecible de las fuentes renovables, como la solar fotovoltaica [2], [3], unida a las demandas dinámicas de potencia de los vehículos eléctricos, hace necesario el desarrollo de estrategias de control que garanticen un funcionamiento estable y fiable. Este reto se ve agravado por la necesidad de coordinar los distintos componentes de la microrred, incluyendo el sistema solar fotovoltaico, el almacenamiento de energía y los vehículos eléctricos, para optimizar la generación, el almacenamiento y el consumo de energía dentro de la limitada infraestructura de una microrred. Abordar estos retos mediante el diseño y la implementación de algoritmos e infraestructuras de comunicación y control es crucial para el éxito de la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en las microrredes.

Un reto importante surge cuando tenemos una penetración considerable de fotovoltaicos en la microrred, debido a la variación del recurso fotovoltaico. La integración de sistemas solares fotovoltaicos con estaciones de recarga de vehículos eléctricos ofrece varias ventajas, como el uso de energía limpia y renovable y la posibilidad de reducir la tensión de la red durante las horas de máxima demanda. Sin embargo, la naturaleza intermitente de la energía solar puede introducir inestabilidad y fluctuaciones en el suministro eléctrico, lo que puede afectar negativamente al proceso de carga de los vehículos eléctricos [4].

Para hacer frente a este problema, varios países han implantado normativas que definen los límites permisibles para la tasa de variación de la potencia activa causada por la energía fotovoltaica, comúnmente denominada tasa de rampa en los sistemas fotovoltaicos [5]. Por ejemplo, la Asociación Alemana de Industrias de la Energía y el Agua especifica un límite de tasa de rampa del 1% de la capacidad nominal de la planta fotovoltaica por minuto. Del mismo modo, otros organismos reguladores también han establecido límites a la velocidad de rampa para garantizar la estabilidad y fiabilidad de la red. La Agencia Reguladora de la Energía de Rumanía, la Comisión Federal Reguladora de Estados Unidos y la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico han establecido un límite de velocidad de rampa del 10% de la potencia nominal de la planta fotovoltaica por minuto. Estas normativas ayudan a mitigar el impacto de la naturaleza intermitente de la energía solar en la red eléctrica y apoyan la integración fiable de los sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ayudar a gestionar y controlar el comportamiento dinámico de la generación fotovoltaica [6]. A medida que los

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

sistemas fotovoltaicos se imponen en las redes de distribución, se necesitan sistemas de almacenamiento de energía de gran capacidad conectados al punto de acoplamiento común para garantizar la estabilidad de la red y permitir la adopción generalizada de la energía fotovoltaica. Una opción de contar con esta alta capacidad de baterías conectadas al sistema radica en los vehículos eléctricos, así, la gestión eficaz de la carga del banco de baterías de los vehículos eléctricos es crucial para este fin.

Se han desarrollado varias técnicas para controlar la carga de los vehículos eléctricos y suavizar las variaciones de la potencia fotovoltaica. Los enfoques más comunes incluyen el control de la tasa de rampa, la media móvil y el filtrado de paso bajo [7]. Estas técnicas ayudan a mitigar la intermitencia de la generación solar fotovoltaica y garantizan un suministro eléctrico estable para la carga de vehículos eléctricos. Además, algunos estudios han explorado el uso de técnicas de promediado de ventana móvil para proporcionar servicios auxiliares y de suavizado de la producción de energía fotovoltaica durante periodos prolongados de más de 15 minutos [8]. Esto ayuda a estabilizar aún más el suministro eléctrico y a mantener una experiencia de carga consistente para los usuarios de vehículos eléctricos, incluso durante periodos de fluctuación de la generación solar fotovoltaica.

La integración con éxito de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes requiere un enfoque global que aborde los retos técnicos, económicos y sociales. El diseño, la validación y la aplicación de algoritmos y arquitecturas avanzados de comunicación y control son cruciales en este empeño, ya que permiten coordinar diversas fuentes de energía, sistemas de almacenamiento y cargas dentro de la infraestructura de microrredes. Al aprovechar las estrategias de control distribuido, como el control predictivo explícito de modelos, y las tecnologías de electrónica de potencia, las microrredes pueden adaptarse mejor a la naturaleza intermitente de la generación solar fotovoltaica y a las demandas dinámicas de energía de los vehículos eléctricos, lo que conduce a un futuro energético más sostenible, fiable y resistente [9].

Algo para tener en cuenta es el impacto que la implantación de vehículos eléctricos y estaciones de recarga puede tener en el sistema eléctrico debido a la integración de convertidores CC/CC en cada nodo del sistema. Existen estudios que han examinado el impacto de los vehículos eléctricos en los sistemas de distribución eléctrica, analizando tanto la penetración de los vehículos eléctricos como los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, existen pocos estudios de casos que investiguen la integración de estas tecnologías en redes eléctricas con una alta concentración de sistemas fotovoltaicos.

Se ha demostrado que la presencia de vehículos eléctricos en la red eléctrica influye en la distorsión armónica total, ya que una mayor penetración de vehículos eléctricos en un alimentador provoca un aumento de la distorsión armónica [10]. Además, la investigación ha explorado el impacto de la ubicación del equipo de suministro de vehículos eléctricos en el alimentador, encontrando que el valor más alto de distorsión

armónica total se produce al final del alimentador, y la tensión en los terminales del usuario disminuye cuando el EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment, o estación de carga) se encuentra más lejos del origen del alimentador [11]. Estas conclusiones tienen implicaciones significativas para el despliegue de la infraestructura de recarga de VE en la red eléctrica, ya que la ubicación estratégica de las EVSE puede ayudar a mitigar los efectos negativos de los VE en la distorsión armónica.

Además, estos hallazgos enfatizan la necesidad de seguir investigando sobre la influencia de los VE en la red eléctrica y el desarrollo de estrategias que garanticen la integración fiable y efectiva de los vehículos eléctricos en la red. La optimización de la ubicación de los EVSE y la comprensión del impacto de la integración de los VE en la capacidad de acogida de la red serán pasos cruciales para facilitar la adopción generalizada de los vehículos eléctricos, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad y fiabilidad de la red.

Un obstáculo clave para la adopción generalizada de los vehículos eléctricos es la limitada disponibilidad de infraestructuras de recarga que puedan adaptarse a las diversas necesidades de los usuarios de vehículos eléctricos. La colocación estratégica de estaciones de carga que tengan en cuenta las características únicas de sus ubicaciones es crucial para abordar este requisito. En Ecuador, la elevación variable a lo largo de las carreteras es un factor adicional a tener en cuenta a la hora de ubicar las estaciones de carga, ya que afecta a la eficiencia del frenado regenerativo [12]. Las regiones montañosas de la red de carreteras de Ecuador a menudo carecen de destinos turísticos convenientes que podrían servir como lugares de acogida para las estaciones de carga y proporcionar actividades de ocio complementarias durante las sesiones de carga de VE. Esta falta de lugares adecuados para la infraestructura de carga plantea un reto importante, especialmente para los viajeros de larga distancia, que pueden necesitar oportunidades de carga más frecuentes para completar sus viajes. Abordar este reto mediante el despliegue de estaciones de carga bien planificadas, teniendo en cuenta tanto los factores geográficos como demográficos, será esencial para impulsar la adopción generalizada del VE en Ecuador.

El establecimiento de estaciones públicas de recarga de VE en Ecuador está impulsado principalmente por iniciativas gubernamentales, que abordan los costes sustanciales y los estudios preliminares esenciales necesarios. En este contexto, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. ha liderado el desarrollo de un corredor de transporte que conecta las ciudades de Cuenca y La Troncal, así como los centros urbanos cercanos dentro de su área de servicio. Estas ciudades fundamentales sirven de base para el marco tecnológico necesario para apoyar la proliferación de vehículos eléctricos. Aunque la electromovilidad sigue estando en sus primeras etapas en Cuenca, debido a los avances tecnológicos relativamente cortos de la región y del país, este paisaje emergente presenta un terreno fértil para que las instituciones académicas y públicas emprendan esfuerzos de investigación centrados en la movilidad de los vehículos eléctricos. Estos estudios pueden explorar las múltiples implicaciones para la

sociedad, incluidas las infraestructuras eléctricas y de telecomunicaciones, así como los posibles beneficios medioambientales y económicos de la adopción generalizada del VE. El compromiso del gobierno de impulsar la adopción del VE mediante el desarrollo de infraestructuras y el apoyo a la investigación indica un reconocimiento de las ventajas a largo plazo de la transición hacia opciones de transporte sostenibles, que podrían tener repercusiones de gran alcance en el panorama energético y la huella de carbono de Ecuador.

Un factor muy poco estudiado y que se trata en esta tesis es el efecto de los retardos de comunicación y hardware sobre los parámetros eléctricos de la microrred. Para esto se diseñó un controlador de estación de carga que permite la variación de la potencia con lo que se cargan los vehículos eléctricos con el objetivo de determinar los retardos existentes en hardware, y, además, mediante simulación, se diseñó un ambiente de co-simulación con Python y OpenDSS para introducir los retardos de comunicaciones. Se observó que estos retardos tienen un efecto en la tensión en bornes de los usuarios de la microrred, lo cual sumado al efecto de nubosidad refuerza el requerimiento de un control descentralizado.

Otro inconveniente ante la gestión de microrredes con vehículos eléctricos radica en el control de las estaciones de carga. El tiempo de conexión y desconexión de vehículos depende del usuario y sus costumbres de carga, por lo que los sistemas de control centralizado demandan un problema adicional. Además, cuando esto se integra a sistemas de alta penetración fotovoltaica, la nubosidad de la zona juega un papel importante por el efecto de sombreado que ocasiona, así, una estrategia centralizada tiene otro inconveniente que debe ser sorteado. Ante esto, un enfoque para abordar estos retos es la implementación de una estrategia de Control Predictivo de Modelo Explícito Distribuido, tal y como se propone en [13]. Este esquema de control avanzado pretende optimizar la gestión de la microrred mediante la definición de referencias de corriente óptimas para los distintos componentes energéticos y en naturaleza intermitente de la producción fotovoltaica. Sin embargo, el estudio de sombreado por nubosidad y su integración con electromovilidad no se ha estudiado a profundidad.

El problema de esta diversidad en la red, es decir, el efecto de una microrred con alta penetración fotovoltaica y presencia de vehículos eléctricos demanda también una estructura de comunicación acorde a las necesidades de control. En este aspecto, se ha observado que una estrategia descentralizada permite mejorar la respuesta de la red eléctrica, por lo que es necesario un análisis de las tecnologías de comunicación basadas en diferentes tecnologías que permitan este tipo de arquitectura. Las redes de comunicación heterogéneas proporcionan una infraestructura adecuada para abordar los diversos requisitos de la gestión de microrredes [14]. Estas redes facilitan la integración sin problemas de los vehículos eléctricos en la red eléctrica, permitiendo el ajuste fino de los procesos de carga y descarga de los vehículos en función de la disponibilidad de recursos renovables, las condiciones de la red y otros factores dinámicos. Investigaciones recientes han puesto de relieve la importancia de una infraestructura de

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

comunicaciones avanzada para optimizar los sistemas vehículo-red. Por ejemplo, algunos estudios han analizado el papel de las técnicas de control distribuido en microrredes heterogéneas, haciendo hincapié en la importancia de los protocolos de comunicación fiables para mejorar el rendimiento y la resistencia del sistema [15].

Mediante la integración de esta infraestructura de comunicación y control, la microrred puede adaptarse mejor a la naturaleza intermitente de la generación solar fotovoltaica y a las demandas dinámicas de energía de los vehículos eléctricos, dando lugar a un sistema energético más resistente y sostenible. Además, el marco de planificación de la operación presentado en [16] captura los objetivos heterogéneos de varias entidades de generación y demanda dentro de la microrred, a la vez que presenta un intercambio de información limitado entre estas entidades que interactúan en el control del sistema, esto es, el control centralizado del sistema de distribución y los agregadores de vehículos eléctricos.

Este enfoque descentralizado puede ayudar a mitigar los efectos adversos de la generación fotovoltaica intermitente en el perfil de tensión de la red de distribución, garantizando el funcionamiento fiable y estable de la microrred. Al optimizar la coordinación de diversos recursos energéticos y cargas, este marco puede mejorar la flexibilidad y resistencia del sistema, permitiendo la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica dentro de la infraestructura de la microrred.

Otro factor importante para tener en cuenta es el impacto en la red eléctrica a la hora de implantar estas arquitecturas de sistemas eléctricos y de telecomunicaciones. Para ello es importante conocer la ubicación de las estaciones de recarga. Considerando que parte de esta tesis doctoral se realizó en la ciudad de Cuenca - Ecuador, ciudad andina con alta variación fotovoltaica, se analizó la ubicación de las estaciones para mitigar el impacto en el sistema eléctrico, lo cual se trabajó en conjunto con la empresa distribuidora de energía de la ciudad y con el grupo de investigación de la Universidad de Valencia.

### **1.3. Hipótesis y objetivos**

#### **1.3.1. Hipótesis**

La hipótesis central de esta investigación es que la implementación de algoritmos de control avanzados y arquitecturas de comunicación puede mejorar significativamente la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes, reduciendo la intermitencia y mejorando la estabilidad de la red. Esta hipótesis se basa en la premisa de que los vehículos eléctricos pueden actuar como sistemas de almacenamiento de energía, mitigando las fluctuaciones en la generación solar y

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

proporcionando servicios auxiliares a la red y que su control puede hacerse de manera descentralizada.

### **1.3.2. Objetivos**

#### **Objetivo general**

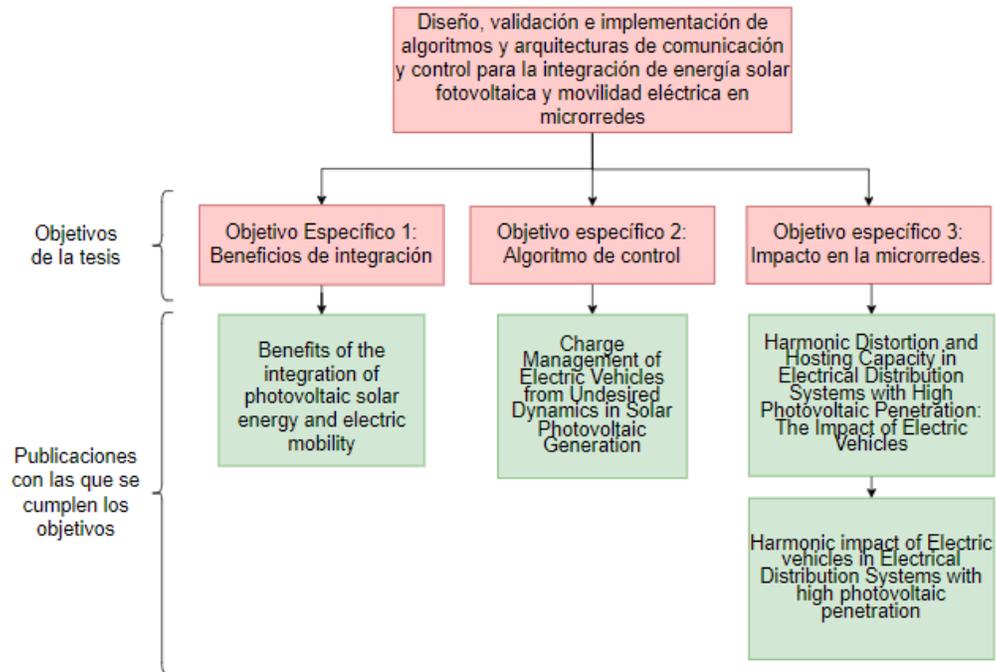
Diseñar, validar e implementar algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de la energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en una microrred.

#### **Objetivos específicos**

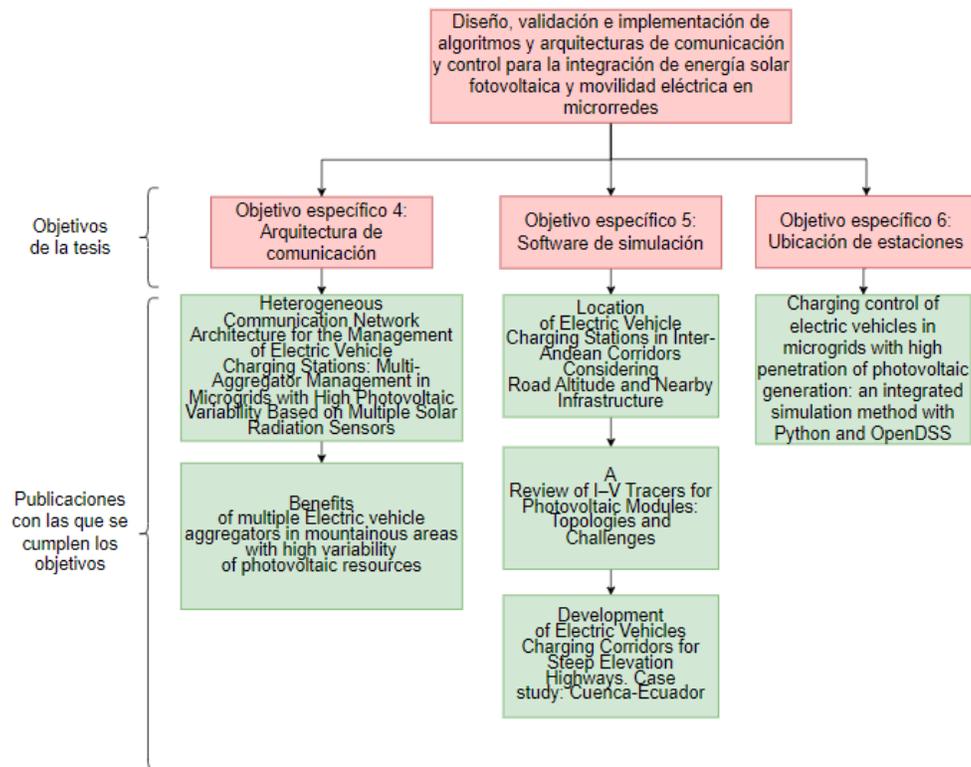
1. Analizar los beneficios de la integración de VEs y energía solar en una microrred
2. Diseñar y validar un algoritmo de control de VEs en una microrred
3. Verificar el impacto del control de vehículos eléctricos a la microrred cuando se utilizan las baterías de VEs con carga inteligente como sistemas de respaldo de energía.
4. Diseñar y validar una arquitectura de comunicación para el control de VEs en una microrred con alta penetración fotovoltaica.
5. Diseñar y validar una metodología de ubicación de estaciones de carga de VEs basada en el estado de carga.
6. Diseñar un software de simulación para el análisis de impacto de la integración de VEs, algoritmos de control y arquitecturas de comunicaciones en microrredes

En la Figura 1 se muestra la relación de las publicaciones y los objetivos planteados en la investigación:

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(a)



(b)

Figura 1. Relación de publicaciones (a) Objetivos del 1 al 3 (b) Objetivos del 4 al 6

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

#### **1.4. Colaboración con Otros Grupos de Investigación**

La colaboración con otros grupos de investigación ha sido fundamental para el desarrollo y éxito de este proyecto. La integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes requiere un enfoque multidisciplinario y la cooperación entre diferentes instituciones y expertos. A continuación, se detallan las principales colaboraciones establecidas durante esta investigación:

##### **1.4.1. Universidad de Valladolid y Universidad de Cuenca**

La colaboración principal se ha llevado a cabo entre la Universidad de Valladolid y la Universidad de Cuenca. Esta alianza ha permitido el intercambio de conocimientos, recursos y tecnologías, enriqueciendo el desarrollo de la investigación. Ambas instituciones han aportado su experiencia y capacidades en el campo de la energía renovable y la movilidad eléctrica.

- Universidad de Valladolid: Ha contribuido con su experiencia en la gestión de energía solar fotovoltaica, siendo la entidad principal donde se llevó a cabo la investigación.
- Universidad de Cuenca: Ha proporcionado el acceso al laboratorio de microrred del campus Balzay y a los vehículos eléctricos en los cuales se realizaron los experimentos. Además, proporcionó datos meteorológicos para la evaluación del comportamiento dinámico de la generación de energía solar en la región andina.

##### **1.4.2. Universidad de Valencia y Empresa Eléctrica Regional Centro Sur**

Se realizó una investigación conjunta con la Universidad de Valencia para la ubicación de las estaciones de carga en la ciudad de Cuenca-Ecuador. La colaboración se dio en el marco del congreso CITITES llevado a cabo en la Universidad de Cuenca y también contó con la colaboración de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, empresa distribuidora de energía de la ciudad. La investigación llevada a cabo entre las tres entidades dio como resultado la implementación del primer corredor de carga de vehículos eléctricos en el Ecuador, y permitió la investigación de los criterios de ubicación de estaciones de carga considerando parámetros técnicos exclusivos de zonas montañosas y ciudades de altura.

##### **1.4.3. Publicación y Difusión de Resultados**

Para asegurar la transferencia de conocimientos y fomentar la colaboración, los resultados de la investigación se han presentado en conferencias internacionales y se

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

han publicado en revistas científicas de alto impacto. Esto no solo ha permitido compartir los hallazgos con la comunidad científica global, sino que también ha facilitado la retroalimentación y la mejora continua de la investigación.

Las investigaciones han sido difundidas en el Congreso iberoamericano de ciudades inteligentes CITIES.

#### **1.4.4. Transferencia de Tecnología**

La colaboración con las empresas distribuidoras del Ecuador y otras instituciones académicas ha facilitado la transferencia de tecnología desarrollada durante esta investigación. Esto incluye implementación de metodología para ubicar estaciones de carga y del primer corredor de carga de vehículos eléctricos en el Ecuador.

La colaboración con otros grupos de investigación ha sido esencial para el éxito de esta tesis. Estas alianzas han permitido abordar el problema desde múltiples perspectivas, mejorar la calidad de la investigación y asegurar que las soluciones desarrolladas sean prácticas y aplicables en diversos contextos.

### **1.5. Metodología**

La metodología adoptada en esta tesis doctoral se estructura en varias fases. Cada fase está diseñada para abordar aspectos específicos del problema y contribuir al objetivo general de la investigación. A continuación, se describen las fases metodológicas, apoyadas en documentos analizados y artículos científicos recientes.

#### **1.5.1. Fases llevadas en la investigación**

##### **Primera fase**

La primera fase, de carácter más teórico y analítico, consistió en analizar el estado del arte, haciendo una revisión exhaustiva de la literatura para analizar los trabajos previos relativos al tema con la intención de averiguar y analizar qué autores han trabajado, qué información han utilizado, qué variables han tomado como referencia, cómo han elaborado el estudio y a qué conclusiones han llegado.

Una vez conocidos los antecedentes del tema podrá tenerse un conocimiento en profundidad del estado actual del mismo y podrá definirse el modelo teórico que englobará la tesis. Será a partir de este momento cuando podrá tener lugar la aportación de nuevas ideas, tanto a nivel teórico como práctico.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

La recopilación de información teórica se basó en la revisión de artículos científicos publicados en revistas con un alto factor de impacto, así como en libros y otras fuentes de información como artículos de conferencias o congresos.

En esta fase se realizó una revisión exhaustiva de la literatura, analizando bases como scopus y web of science. Para esto se utilizaron herramientas de análisis bibliométrico como VOSViewer, el cual es un software especializado para estudios de coocurrencia en documentación científica.

Para seleccionar los artículos relevantes, se realizó una selección basada en el impacto (índice de citas y factor de impacto de las revistas), con lo cual se identificaron tendencias y vacíos en la investigación actual.

## **Segunda fase**

La segunda fase que se basó en el diseño y validación de algoritmos de control de carga inteligente en redes eléctricas con alta penetración de generación fotovoltaica y el diseño tanto de hardware para la carga de vehículos eléctricos como el de una plataforma de simulación para ejecutar pruebas de concepto que consideren parámetros eléctricos del sistema de distribución, de telecomunicaciones para la transmisión de datos y en los perfiles de carga de los vehículos eléctricos.

En esta fase se realizó el diseño de un algoritmo de control de tasa de cambio, promedio móvil y filtrado de paso bajo para mitigar las fluctuaciones de potencia fotovoltaica y optimizar la carga de vehículos eléctricos. Para esto se utilizaron herramientas de análisis como MATLAB, Python y Open DSS para simulaciones y automatización de cambios de condiciones de circuitos, incluyendo diferentes niveles de penetración fotovoltaica.

Así, se evaluaron criterios de estabilidad de la red, reducción de fluctuaciones de potencia, niveles de tensión dentro de parámetros seguros para el sistema eléctrico y las cargas conectadas.

## **Tercera fase**

Durante la tercera se realizó el análisis del impacto de armónicos generados sobre la red eléctrica.

Para esto se utilizaron métodos analíticos cuantitativos de evaluación de distorsión armónica total generada por las estaciones de carga y los vehículos eléctricos conectados a la red en un contexto de alta penetración fotovoltaica. Esto se realizó en el software de simulación, y con herramientas como MATLAB y OpenDSS, con lo cual se realizó una evaluación del nivel de distorsión armónica considerando la presencia de vehículos eléctricos, la implementación de algoritmos de control, y el cumplimiento de límites de distorsión armónica establecidos por normativas internacionales.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## **Cuarta fase**

En esta fase se realizaron análisis de retardos en los sistemas de comunicaciones entre las estaciones de carga de vehículos eléctricos y se revisaron aspectos sobre el control de los sistemas y el impacto en las redes eléctricas de alta penetración fotovoltaica.

En esta fase se llevó a cabo el diseño de la red de comunicación heterogénea que considera retardos de telecomunicaciones causados por varias tecnologías como LoRaWAN, IoT, entre otras. Para esto se diseñó una herramienta de análisis de co-simulación con Python y OpenDSS, utilizando un modelo de red de comunicación y sus interacciones con el sistema eléctrico. Para esto se evaluó la eficiencia en la transmisión de datos, la estabilidad del sistema ante variabilidad fotovoltaica y la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de la red eléctrica y ubicación de generadores fotovoltaicos.

### **1.5.2. Revisión del Estado del Arte**

La primera fase de la investigación se centró en la revisión del estado del arte sobre la integración de energías renovables y vehículos eléctricos (VEs) en microrredes. Se revisaron artículos científicos sobre el tema para identificar las tendencias actuales, desafíos y soluciones propuestas en este campo.

- Se analizaron estudios sobre la gestión de energía en microrredes con vehículos híbridos enchufables y otras tecnologías de almacenamiento de energía.
- Revisión de metodologías híbridas para la gestión de energía en microrredes, incluyendo fuentes fotovoltaicas y pequeñas hidroeléctricas.
- Evaluación de modelos de integración de VEs en microrredes y su impacto económico y operativo.

Mediante un análisis de coocurrencia como se muestra en la figura, el cual parte de un análisis de palabras clave Electric AND Vehicle AND PV AND SOLAR AND MICROGRID, el permitió determinar las relaciones entre artículos existentes. Se observó que los enlaces bibliográficos más importantes se daban en el uso de vehículos eléctricos para la administración de energía en las microrredes y en la calidad de potencia en el sistema.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

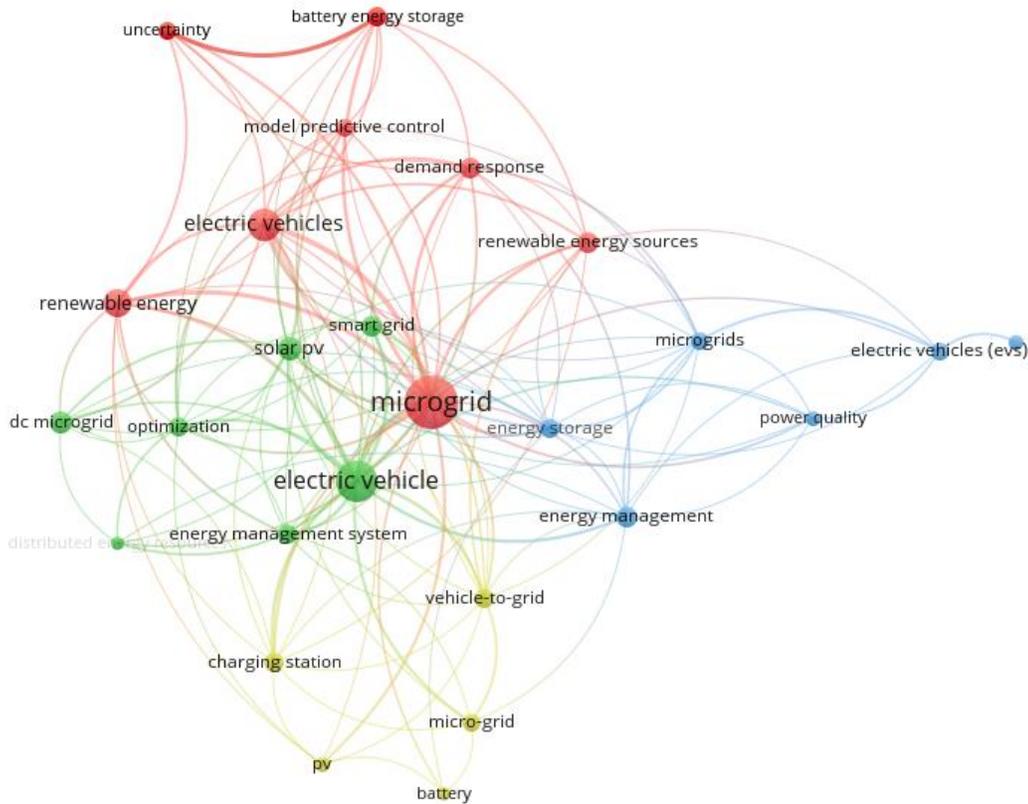


Figura 2. Análisis de coocurrencia bibliográfica

Una vez conocida la coocurrencia entre fuentes relevantes, se realizó una primera parte de análisis de algoritmos de control en microrredes, en el cual se encontró como uno de los factores principales la intermitencia del recurso fotovoltaico en microrredes debido a las fluctuaciones de la radiación solar.

En esta parte se encontró que una de las soluciones a la fluctuación de potencia y tensión causadas por la intermitencia solar era el uso de servicios auxiliares dados por elementos de baterías, en este caso en particular, los vehículos eléctricos, que pueden entregar energía a la red o desconectarse de manera dinámica para evitar una inestabilidad de tensión.

Este primer estado del arte centrado en servicios auxiliares dados por los vehículos eléctricos forma parte del artículo:

*Benefits of multiple Electric vehicle aggregators in mountainous areas with high variability of photovoltaic resources (Anexo A, Artículo 7)*

Una Segunda parte del estado del arte se realizó para las arquitecturas de comunicaciones. En este sentido se analizaron artículos que mencionaban arquitecturas

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

comunes, sin embargo, resaltó el uso de redes heterogéneas debido a su aplicación a sistemas eléctricos con medidores inteligentes. Además, no se encontraron artículos que analicen a profundidad los efectos de retardo de comunicaciones y otras partes de potencia del sistema de carga de vehículos sobre parámetros eléctricos de la microrred, razón por la cual la investigación se llevó por ese lado.

Este segundo estado del arte forma parte del artículo:

*Charging control of electric vehicles in microgrids with high penetration of photovoltaic generation: an integrated simulation method with Python and OpenDSS (Anexo A, Artículo 3)*

### **1.5.3. Diseño y Simulación de Algoritmos de Control**

En esta fase se analizaron los algoritmos control de carga para vehículos eléctricos en microrredes, específicamente los optimizados para gestionar la intermitencia de la generación fotovoltaica y las condiciones variables de la red eléctrica.

Se ejecutaron las siguientes actividades:

- Se implementó un algoritmo de control de tasa de cambio para mitigar las fluctuaciones en la generación PV
- Se desarrollo el modelo para la gestión de la carga de VEs en escenarios de alta penetración de energías renovables.
- Se realizó la simulación utilizando herramientas como MATLAB, python y OpenDSS para evaluar el rendimiento de los algoritmos en diferentes condiciones operativas y ambientales.

Se observó que los sistemas de almacenamiento de energía también pueden jugar un papel importante en la regulación y control de la generación fotovoltaica. Con la creciente adopción de sistemas PV en las redes de distribución, se hace cada vez más necesaria la integración de ESS de alta capacidad de forma temporal en el punto de conexión común (PCC). Un estudio reciente que analiza la combinación de sistemas PV y vehículos eléctricos en la red de Portugal revela que la sincronización entre la carga de los vehículos y la producción PV ayuda a reducir significativamente el excedente de energía [17]. Esto sugiere que para mantener la estabilidad de la red y promover una mayor integración de sistemas PV, es crucial gestionar eficientemente el proceso de carga de los vehículos eléctricos.

Para abordar este desafío, se han propuesto diversas técnicas que permiten controlar la carga de los vehículos eléctricos con el fin de suavizar las fluctuaciones de la energía PV. Entre las más utilizadas están las técnicas de control de tasa de cambio,

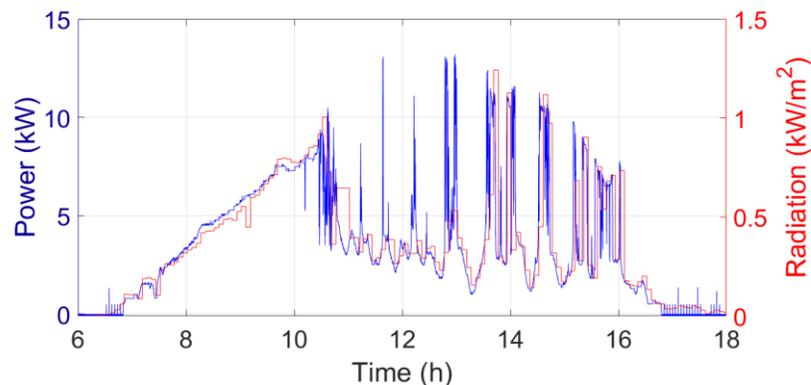
Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

promedio móvil y filtros de paso bajo. También existen estudios que implementan promedios móviles deslizantes para suavizar la salida de energía PV, lo que permite ofrecer servicios auxiliares en generación renovable durante intervalos de más de 15 minutos [18].

Además, se observó en la bibliografía que se han desarrollado métodos basados en metaheurísticas para optimizar el uso de sistemas de almacenamiento de baterías y minimizar las variaciones de potencia PV. Sin embargo, estas soluciones pueden requerir una alta capacidad de procesamiento computacional en ciertos casos [19].

En relación con el control de la tasa de cambio, se han explorado enfoques como promedios móviles simples, simétricos, exponenciales y jerárquicos, además de algoritmos basados en filtros de Kalman y estimadores de mínimos cuadrados [20]. De estos métodos, el promedio móvil exponencial se destaca por requerir una mayor capacidad de almacenamiento en baterías, lo que permite que la energía PV se entregue a la red con mínimas pérdidas [21].

En esta tesis se analizó el comportamiento dinámico de la generación solar PV en zonas montañosas de los Andes, caracterizadas por una alta variabilidad en la irradiancia solar debido a la nubosidad. El comportamiento de la radiación solar en el área de estudio presenta fluctuaciones que ocurren en intervalos de horas, minutos e incluso segundos. Estas variaciones están mayormente influenciadas por la densidad de las nubes y tienen un patrón inusual, como se puede observar en la Figura 3. Los datos representados en esta figura fueron recopilados de la estación meteorológica ubicada en el laboratorio de microrredes de la Universidad de Cuenca, en el Campus Balzay, situado en la ciudad de Cuenca, Ecuador, en la región andina, en las coordenadas  $2^{\circ}53'31.0''$  S y  $79^{\circ}02'18.7''$  O.



*Figura 3. Radiación solar en Cuenca, tomada de la estación meteorológica del laboratorio del campus Balzay.*

Para mitigar estas fluctuaciones de potencia, se propuso una estrategia de control que incorpora ESS con baterías de vehículos eléctricos. El análisis se realizó con datos de la ciudad de Cuenca, y como resultado, se desarrolló un sistema de gestión de energía

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

(EMS) que optimiza las variaciones de potencia PV aplicando un algoritmo específico que ajusta la carga de los vehículos eléctricos según las directrices del EMS.

El sistema de gestión de energía (EMS) que se muestra en la Figura 4 toma como base los datos históricos del sistema fotovoltaico, que se obtienen a través del sistema SCADA del laboratorio de microrredes de la Universidad de Cuenca [22]. Este sistema fotovoltaico, instalado en el laboratorio, cuenta con cuatro grupos de 15 paneles de tipo poli-Si conectados en serie, cada uno con una potencia nominal de 250 Wp, sumando un total de 15 kWp. La gestión de este conjunto de paneles se realiza mediante un convertidor trifásico de corriente continua a corriente alterna (DC/AC) de dos niveles, controlado con modulación por ancho de pulso [23]. El sistema está vinculado directamente a la red de distribución y opera bajo un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia.

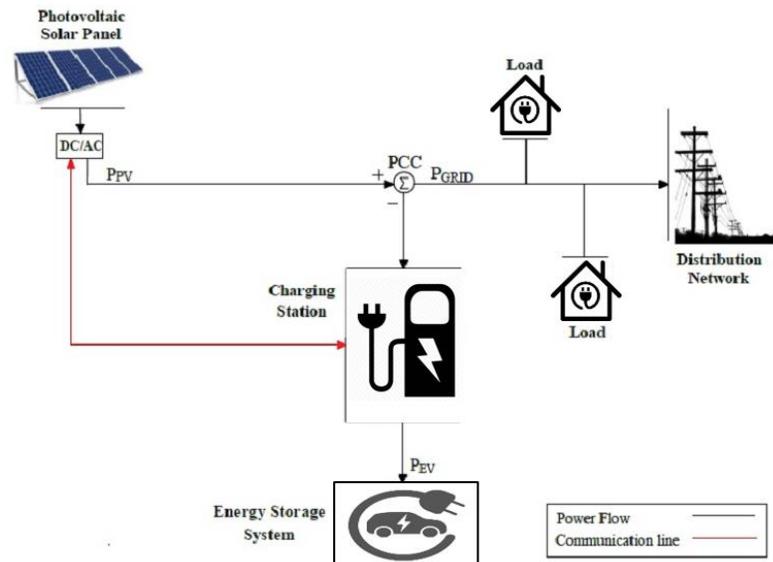


Figura 4. Sistema de administración de energía (EMS)

El rango de variación de la potencia de carga de los vehículos eléctricos (PEV) debe mantenerse dentro de los límites establecidos, que se determinan a partir de las características eléctricas del modelo del vehículo y las especificaciones de la norma SAE J1772 [24]. La potencia máxima de carga sigue el estándar de carga lenta monofásica de algunos modelos de vehículos eléctricos. Por otro lado, la potencia mínima de carga considera la potencia necesaria para iniciar el proceso de carga con el nivel más bajo de corriente. De este modo, el rango de variación se establece entre 7.2 kW y 1.32 kW, debido a las restricciones de la norma J1772. Además, se utiliza el 50% del rango de potencia como nivel de referencia para la variación; por ejemplo, si un vehículo eléctrico tiene una potencia máxima de carga de 6.5 kW, el valor de referencia sería 3.91 kW.

Los cambios en la PEV no siempre se reflejan de inmediato en el sistema de baterías del vehículo eléctrico, como se observó en un estudio donde se realizaron pruebas con dos modelos diferentes de vehículos eléctricos. El objetivo era evaluar el tiempo de respuesta de sus sistemas de baterías [25]. Ante una variación del ciclo de trabajo entre el 30% y el 50%, el sistema reaccionó en 2 segundos y 0.68 segundos, respectivamente. Por lo tanto, el tiempo de reacción de este parámetro en el estudio dependerá de diferentes valores según lo siguiente:

$$R_{PV} = \frac{\Delta P_{PV}}{\Delta t} = \frac{P_{PV}[n] - P_{PV}[n-1]}{t[n] - t[n-1]} \left[ \frac{W}{\min} \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$R_{Lim} = 10\% \frac{P_{PV \text{ nom}}}{\min} = 10\% \frac{15 \text{ kW}}{\min} = 1500 \frac{W}{\min} \quad (25 \text{ W/s}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

El método desarrollado para el algoritmo de control de la tasa de variación calcula la tasa de cambio de potencia fotovoltaica (RPV) y la limita al valor máximo permitido para este caso de estudio (RLIM). La condición de RLIM es mantener la variación de potencia activa por debajo del 10% de la potencia nominal por minuto. El algoritmo de control de tasa de variación aplicado en el estudio se presenta en la Figura 5.

Siguiendo el proceso de operación del algoritmo de control de la tasa de cambio (RR) mostrado en la Figura 5, este comienza leyendo la potencia de salida del sistema fotovoltaico. Luego, establece el límite de la tasa de cambio (RLIM). Según la Ecuación 2, con una capacidad de generación solar de 15 kWp, la máxima tasa de variación permitida en este estudio es  $|RR| < 1.5 \text{ kW/min}$ . El algoritmo verifica si la tasa de cambio de la potencia fotovoltaica (RPV) es mayor o menor que el límite establecido para estimar las fluctuaciones dinámicas de potencia en el punto de acoplamiento común (PCC). Como resultado de esta evaluación, la potencia de carga del vehículo eléctrico (PEV) puede aumentar, disminuir o permanecer sin cambios.

Cuando la condición  $RPV > |RLIM|$  se cumple, la PEV ajusta su valor de acuerdo con la potencia fotovoltaica limitada, siguiendo el comportamiento instantáneo de la pendiente de la salida fotovoltaica. Por el contrario, si RPV es menor que RLIM, entonces la potencia de carga no se modifica. Finalmente, la potencia fotovoltaica en el PCC se obtiene de la diferencia entre la potencia de salida del sistema PV y la potencia de carga del vehículo eléctrico.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

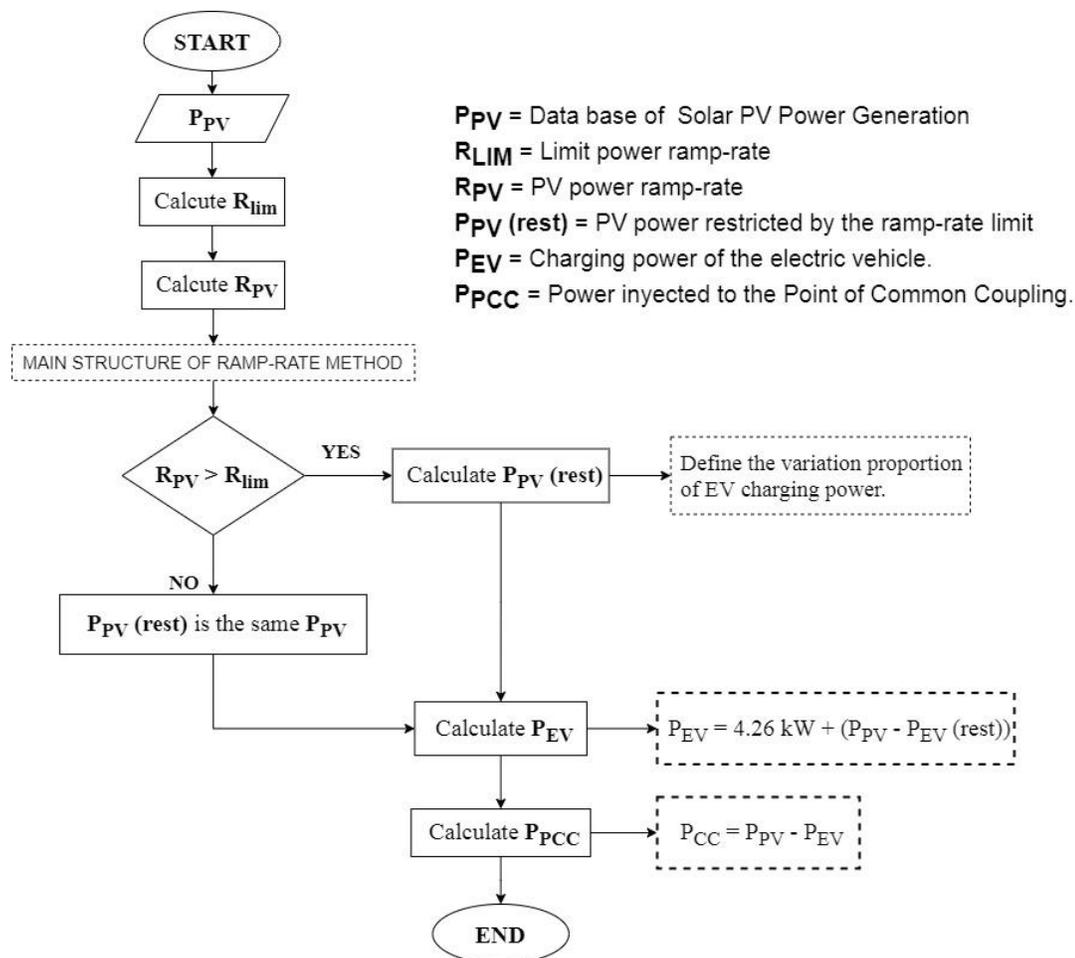


Figura 5. Algoritmo implementado de control de tasa de rampa

El algoritmo de control de la tasa de cambio (RR), comienza leyendo la potencia generada por el sistema fotovoltaico y luego establece un límite para la tasa de variación (RLIM). En este caso, para una capacidad de generación solar de 15 kWp, la máxima tasa de cambio permitida es  $|RR| < 1.5 \text{ kW/min}$ , según la Ecuación 2. El algoritmo analiza si la tasa de variación de la potencia fotovoltaica (RPV) excede o se encuentra por debajo del límite definido, con el objetivo de estimar las fluctuaciones dinámicas en el punto de acoplamiento común (PCC). Dependiendo de esta evaluación, la potencia de carga del vehículo eléctrico (PEV) puede incrementarse, reducirse o mantenerse igual.

Si se cumple la condición de que R<sub>PV</sub> es mayor que |R<sub>LIM</sub>|, la PEV se ajusta siguiendo la potencia fotovoltaica limitada y refleja el comportamiento instantáneo de la pendiente de la salida de energía PV. Por el contrario, si R<sub>PV</sub> es inferior al límite establecido (RLIM), la potencia de carga permanece sin cambios. Al final, la potencia en el PCC es el resultado de restar la potencia utilizada por el vehículo eléctrico de la potencia generada por el sistema PV (ver Figura 6).

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

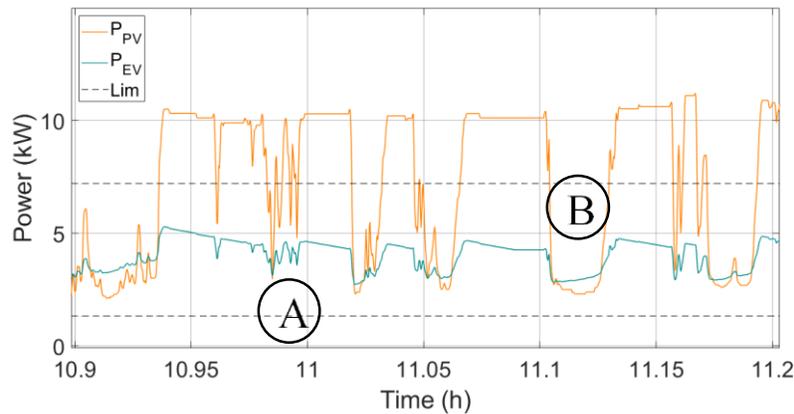


Figura 6. Potencia del generador fotovoltaico y potencia de carga del vehículo eléctrico

Al simular los dos casos indicados, se obtuvieron los resultados correspondientes a la potencia de la subestación y a los voltajes en las barras del cliente 349. Las pruebas incluyeron: el caso base (Base); el caso donde los vehículos eléctricos están conectados sin generación fotovoltaica ni control (Solo VEs); pruebas del caso 1, en el que los VE están conectados al sistema con generación fotovoltaica, pero sin el algoritmo de control de carga (VE sin control y PV caso 1); y pruebas donde los VE, la generación fotovoltaica y el algoritmo de control están conectados tanto para el caso 1 como para el caso 2.

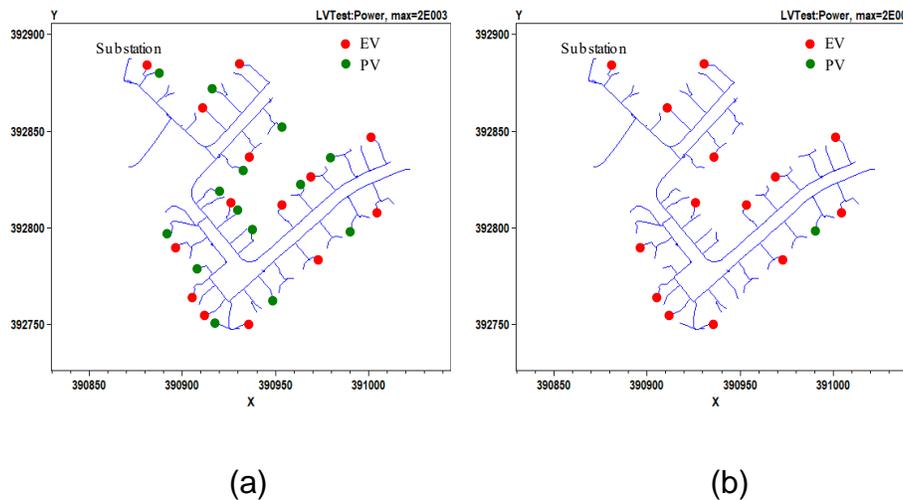


Figura 7. Casos de simulación (a) VE y PV distribuidos (b) VE distribuidos, un solo PV

Los escenarios analizados fueron:

- Caso base;
- Caso base solo con vehículos eléctricos conectados, sin generación fotovoltaica ni control;

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

- Caso 1 (vehículos eléctricos y PV distribuidos) sin control de carga;
- Caso 1 (vehículos eléctricos y PV distribuidos) con control de carga;
- Caso 2 (vehículos eléctricos y PV distribuidos) con control de carga.

La aplicación del algoritmo forma parte del artículo:

*Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation*

#### **1.5.4. Desarrollo de Arquitecturas de Comunicación**

Esta fase se centró en el diseño y desarrollo de arquitecturas de comunicación que permitieran la interacción eficiente entre los VEs y los sistemas de control de las microrredes en sistemas de alta penetración PV.

Los avances recientes en tecnologías de telecomunicaciones para sistemas de microrredes han sido ampliamente revisados. Por ejemplo, en [26], los autores destacan la importancia de infraestructuras de comunicación robustas para mantener la estabilidad y eficiencia de las microrredes interconectadas. Esta revisión resalta la necesidad de contar con canales de comunicación seguros y confiables para facilitar el intercambio de datos en tiempo real y las operaciones de control en entornos de redes eléctricas inteligentes.

El uso de sistemas de comunicación basados en LoRaWAN para facilitar la interacción entre agregadores y vehículos eléctricos en el contexto de marcos V2G (Vehicle to Grid) donde el vehículo entrega energía a la microrred ha sido bien documentado. LoRaWAN se reconoce por su enfoque económico, caracterizado por su amplio alcance y bajo consumo de energía, lo que lo hace adecuado para implementaciones a gran escala tanto en áreas urbanas como rurales [27]. Además, el Narrowband IoT (NB-IoT) ha surgido como una alternativa poderosa para las comunicaciones en V2G, ofreciendo ventajas como una mayor penetración y eficiencia energética, factores clave para asegurar comunicaciones fiables en entornos urbanos densos donde es necesario penetrar edificios. Ambas tecnologías muestran un gran potencial para reducir significativamente los costos operativos y mejorar la eficiencia en la transmisión de datos en entornos de redes inteligentes.

Estos estudios ofrecen una visión integral de cómo diversas tecnologías de comunicación pueden optimizarse para satisfacer las necesidades específicas de la gestión de la carga de vehículos eléctricos dentro de los sistemas V2G. La integración de estas tecnologías en una red heterogénea abre el camino para establecer una infraestructura de comunicación flexible y resiliente.

Una red de comunicación heterogénea es capaz de adaptarse a los variados requisitos de la administración de microrredes, mejorando la integración fluida de los VEs en la red eléctrica [28]. Esto permite ajustar el proceso de carga y descarga de los vehículos en función de la disponibilidad de recursos renovables, el estado de la red y otros factores dinámicos. Estudios recientes han destacado la relevancia de infraestructuras de comunicación avanzadas para optimizar los sistemas V2G. Por ejemplo, [29] analiza el papel de las técnicas de control distribuido en microrredes heterogéneas, subrayando la importancia de protocolos de comunicación confiables para mejorar el rendimiento y la resiliencia del sistema. Otros estudios se centran en la implementación de hardware; por ejemplo, [30] explora el uso de antenas electrónicamente direccionables en redes de comunicación heterogéneas, demostrando su potencial para ofrecer servicios de alta capacidad y baja latencia, críticos para aplicaciones en microrredes.

Además, [31] examina los requisitos de comunicación y protocolos necesarios para una operación segura y eficiente en microrredes distribuidas, destacando los avances en las tecnologías de comunicación para redes inteligentes. Por último, [32] pone énfasis en la integración de microrredes interconectadas mediante redes IoT heterogéneas, mostrando su impacto en la mejora del control y los paradigmas de comunicación de la red. En conjunto, estos estudios subrayan la importancia de infraestructuras de comunicación confiables y eficientes para lograr la integración fluida de los VEs en la red eléctrica, optimizando la gestión de la energía y aumentando la resiliencia del sistema.

En esta tesis se analizó los efectos de un modelo de gestión con múltiples agregadores dentro de microrredes que cuentan con una alta penetración de energía solar fotovoltaica. Se consideraron factores como los retrasos en los sistemas de comunicación, el impacto del movimiento de las nubes y los ajustes en los puntos de referencia de potencia, así como el papel de los agregadores de vehículos eléctricos para mitigar las fluctuaciones de voltaje en la red.

La investigación profundizó en cómo diferentes tecnologías de comunicación pueden generar retrasos en la interacción entre un agregador y un vehículo eléctrico. Además, se demuestra que el modelo de gestión con múltiples agregadores es eficaz en microrredes con alta penetración de energía solar, abordando cuestiones clave como los retrasos en las comunicaciones, el impacto de las nubes y los ajustes en la potencia.

El enfoque metodológico para la ubicación estratégica de los agregadores de VEs que se propuso para dar los siguientes beneficios a la microrred:

- **Mejora en la regulación del voltaje:** Al ubicar estratégicamente los agregadores de VE, se logra una mejora significativa en los niveles de voltaje en los puntos de conexión de los usuarios.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

- **Reducción de la demanda de carga:** La metodología permitió optimizar el flujo de energía entre los vehículos eléctricos y la red, reduciendo así la demanda de potencia desde la subestación. Esto alivia la carga sobre las subestaciones y mejora la estabilidad y eficiencia general de la red eléctrica.
- **Mayor resiliencia del sistema:** La colocación estratégica de agregadores de VE actúa como amortiguador ante las fluctuaciones generadas por la intermitencia de los recursos solares, lo que aumenta la resiliencia de la red frente a cambios inesperados en la generación de energía.
- **Optimización del uso energético:** Al emplear múltiples agregadores de VE que hacen referencia a señales diversas de radiación solar, se maximiza el aprovechamiento tanto de los vehículos eléctricos como de los sistemas fotovoltaicos, lo que incrementa la eficiencia energética y optimiza el uso de las fuentes de energía distribuidas.
- **Adaptabilidad a la variabilidad geográfica:** La metodología toma en cuenta la distribución geográfica de los recursos fotovoltaicos, haciéndola particularmente efectiva en regiones con importantes variaciones topográficas y meteorológicas, como las áreas montañosas.

La variabilidad del recurso solar fotovoltaico también debe tener en cuenta el movimiento de las nubes en el área de la microrred. El efecto de retraso causado por el desplazamiento de las nubes se midió comparando datos de dos generadores fotovoltaicos equipados con estaciones meteorológicas y sensores de radiación solar, identificados como PV1 y PV2 en la Figura 8. Los generadores están ubicados en la ciudad de Cuenca, Ecuador, en las coordenadas  $2^{\circ}53'52.80''S$  y  $79^{\circ}0'52.64''O$ , respectivamente. Los generadores, PV1 y PV2, están separados por una distancia de 5.6 km. PV1 pertenece al laboratorio de microrredes de la Universidad de Cuenca y tiene una potencia pico de 35 kW, mientras que PV2 es propiedad de la Empresa Eléctrica de la ciudad y opera con una potencia pico de 15 kW.

La imagen satelital de Cuenca muestra una nube cubriendo parte de la ciudad. Incluso en un día parcialmente despejado, las nubes proyectan sombras en diferentes áreas de la ciudad, lo que resalta la variabilidad espacial de la radiación solar. Es importante señalar que la presencia de nubes puede tener un impacto significativo en la generación de energía solar, ya que las sombras reducen la cantidad de radiación solar que incide sobre los paneles fotovoltaicos, afectando la producción de energía. Ahora, si se imagina el movimiento de una nube desde el noreste hacia el noroeste a una velocidad  $v$ , la nube cubrirá distintas partes de la ciudad a su paso. En este escenario, la nube cubriría primero PV2 y, después de un tiempo  $t$ , llegaría a cubrir PV1.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

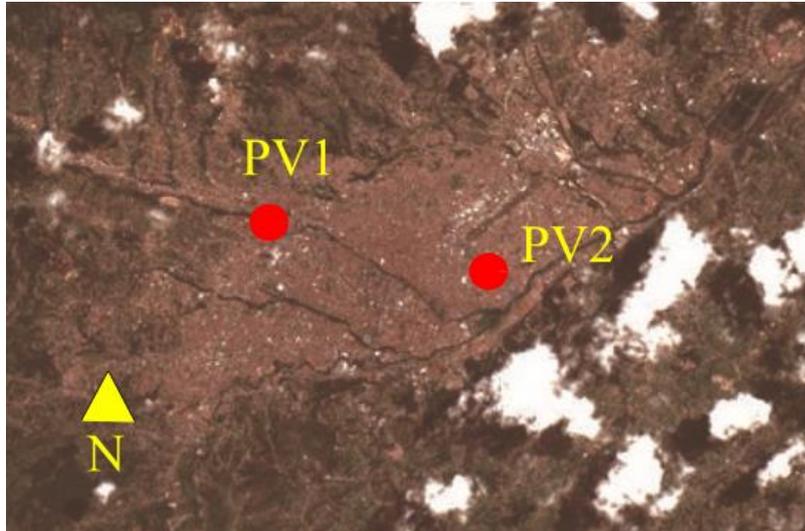


Figura 8. Ubicación de sistemas fotovoltaicos

Los valores de potencia generada por PV1 y PV2 se muestran en la Figura 9. Se observa que existe un desfase entre ambos generadores, el cual se puede atribuir directamente a la nubosidad presente en la zona. En este caso, el retraso promedio registrado es de 20 minutos.

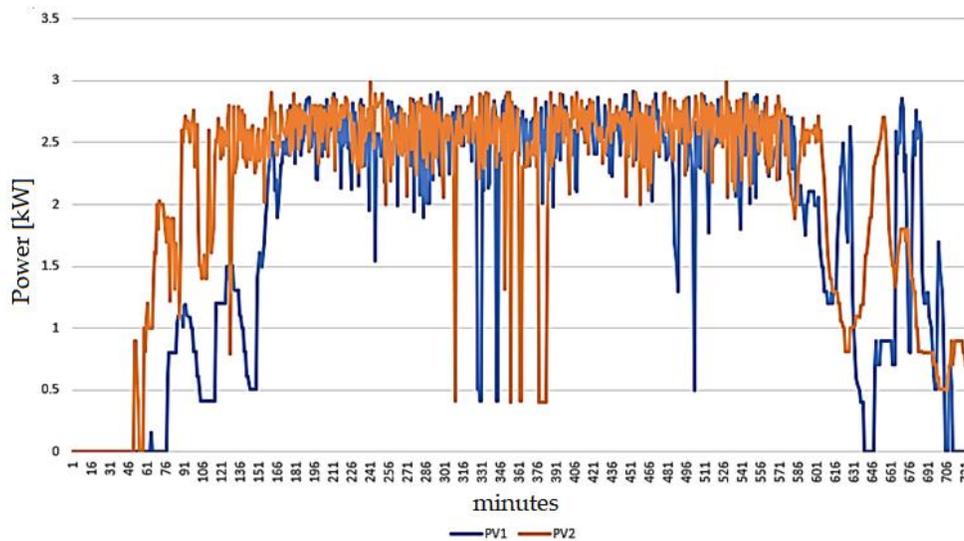


Figura 9. Perfil de producción fotovoltaica de las dos instalaciones analizadas

### Retardos de telecomunicaciones

Uno de los grandes desafíos es la plataforma de comunicación que gestiona la interacción entre los vehículos eléctricos y los agentes de control de la red. Esto requiere

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

una infraestructura de comunicación que responda adecuadamente a las señales del controlador del sistema para garantizar la calidad de la energía [33].

Para lograrlo, se emplean diversas tecnologías de comunicación. Por ejemplo, [34] utiliza el Internet Industrial como canal de comunicación entre el centro de distribución o despacho y los vehículos; [27] emplea un sistema de radiofrecuencia basado en LoRaWAN; mientras que [35] adopta un enfoque híbrido donde una red 5G actúa como punto de conexión principal, facilitando las interacciones inalámbricas entre los vehículos y la empresa distribuidora de energía. La efectividad de este modelo híbrido depende de la capacidad de la red 5G para transmitir mensajes con un retraso mínimo. En la Tabla 1 se comparan los sistemas de comunicación más utilizados en la integración de vehículos a la red (VGI).

*Tabla 1. Sistemas de comunicación utilizados en VGI*

Sistema de comunicación	LoRaWAN	Zigbee	4G	5G	Ethernet	Fibra óptica
<b>Tipo</b>	Inhalámbrica	Inhalámbrica	Inhalámbrica	Inhalámbrica	Cable	Cable
<b>Tasa de datos</b>	50kbps	250kbps	1Mbps	100Mbps	100Mbps	10Gbps
<b>Sensitividad</b>	-142dBm	-126dBm	-117dBm	-113dBm	-31dBm	-19dBm
<b>Rango</b>	3km	300m	2.5km	45km	100m	100km (single mode)
<b>Tiempo promedio de respuesta</b>	22.95ms	10ms	50ms	5ms	100ms	0.1ms per 10km

Otro factor clave es el retraso en la comunicación entre el agregador o la oficina central del Operador del Sistema de Distribución (DSO) y las estaciones de carga. La Figura 10 muestra dos opciones comunes de infraestructuras de comunicación utilizadas en este tipo de redes. En ella se ilustran los retrasos entre los diferentes equipos y fases de la red, donde se espera utilizar una red de área amplia (WAN) de radiofrecuencia para las comunicaciones de última milla. Además, se presentan dos opciones de comunicación: una utiliza la red de un proveedor de internet estándar, que puede ser del usuario o del mismo distribuidor, para comunicarse directamente con el equipo de carga de vehículos eléctricos, y la otra opción emplea la estructura de la red de área de campo (FAN), aprovechando la red de medición inteligente (AMI) para la comunicación con el EVSE (ver Figura 11). Los tiempos de retraso se calculan utilizando la ecuación (3).

$$d = \sum_{i=1}^i d_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

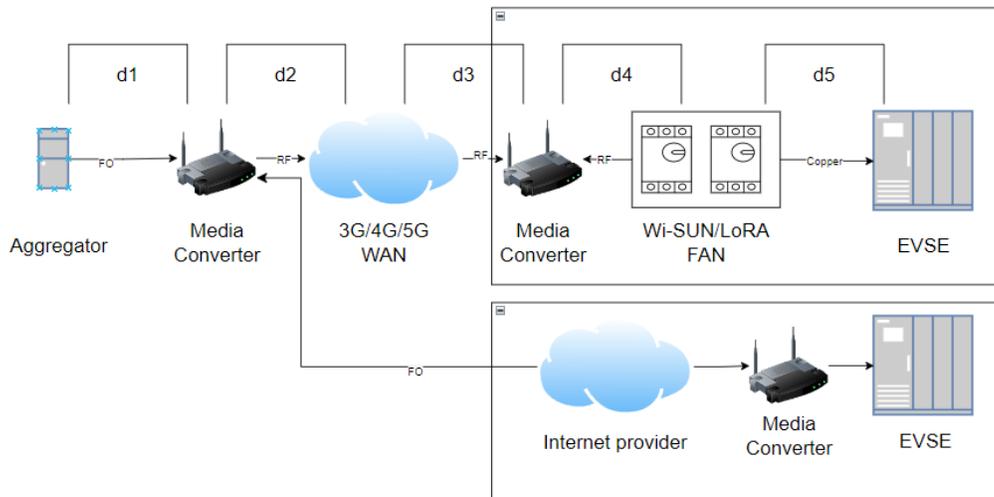


Figura 10. Retardos de comunicaciones

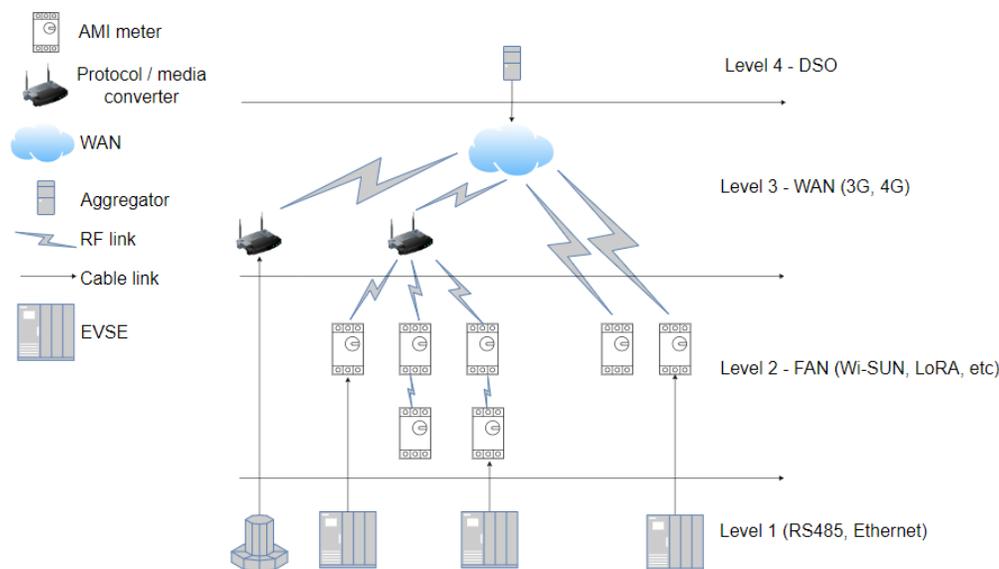
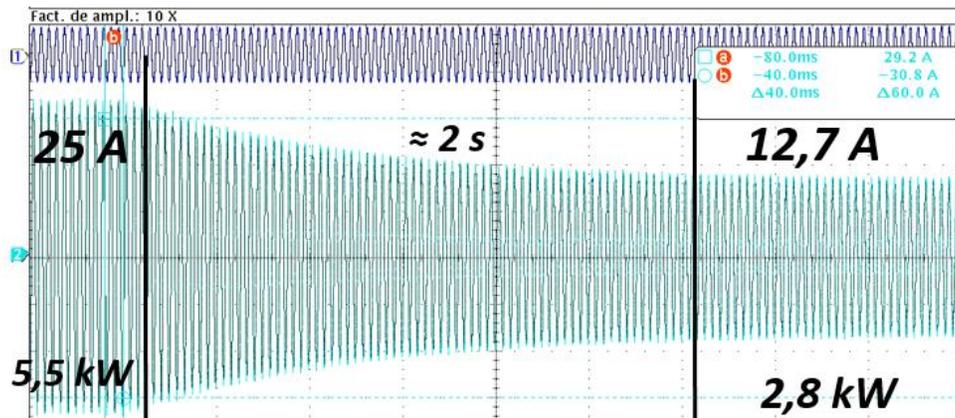


Figura 11. Capas de comunicación

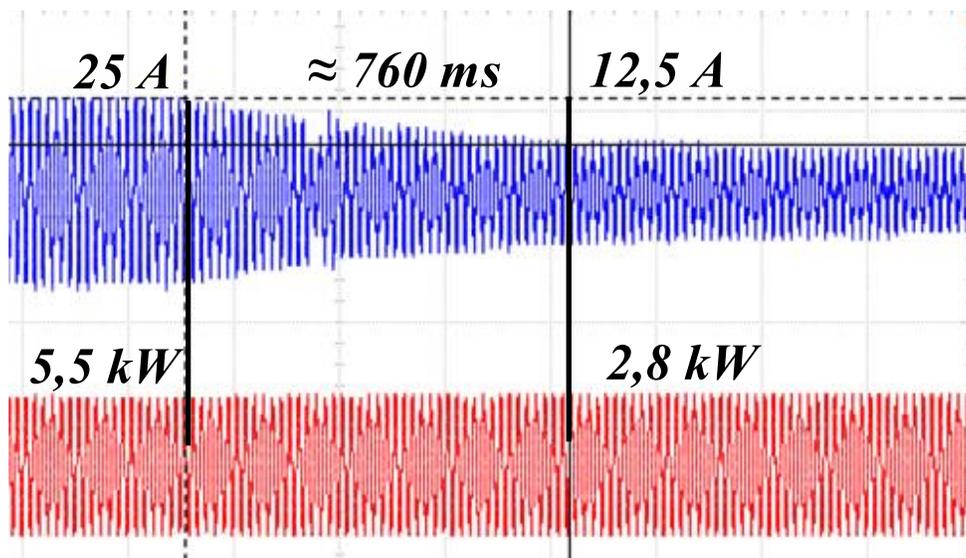
## Retardos de Hardware

En aplicaciones relacionadas con el control de voltaje o potencia, es crucial que los ajustes en el punto de consigna de carga del vehículo se realicen de manera rápida. Este aspecto fue investigado analizando los tiempos de respuesta de dos vehículos eléctricos, un KIA Soul EV y un BYD E5 400. Se realizaron pruebas para determinar sus tiempos de reacción ante cambios en los puntos de consigna de carga. Los resultados mostraron que los vehículos presentaron respuestas dinámicas variadas; por ejemplo,

un VE ajustó su carga de un 50% a un 30% en aproximadamente 2 segundos, mientras que otro logró una respuesta en 0.68 segundos, como se muestra en la Figura 12. Además, el proceso de carga comienza a 5.5 kW y luego cambia a 2.8 kW (modo de carga lenta), centrando la medición en el tiempo que tarda el controlador de carga del vehículo en ajustarse al nuevo punto de consigna.



(a)



(b)

Figura 12. Comportamiento dinámico de carga de vehículos eléctricos ante cambios de consigna de potencia de carga (a) VE No. 1 (a) VE No. 2

La integración de vehículos eléctricos en microrredes con alta penetración de energía solar fotovoltaica ha sido poco explorada en la literatura. Además, no se han analizado adecuadamente los efectos de pequeños retrasos causados por comunicaciones en redes heterogéneas, los retrasos en el hardware debido a cambios

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

en los puntos de consigna de potencia en los VE, ni el impacto del movimiento de nubes en redes que utilizan un único sensor PV para el control de la configuración de potencia, lo cual es crucial en aplicaciones de V2G. Para abordar estos escenarios, se desarrolló una plataforma de simulación completa utilizando Python y OpenDSS. Esta herramienta permitió modelar detalladamente los sistemas eléctricos y de comunicación en una microrred, facilitando el análisis de cómo interactúan estos sistemas y afectan el rendimiento general. La simulación se basó en los siguientes puntos clave:

- **Desarrollo de una plataforma de simulación:** Se creó una plataforma de simulación con Python y OpenDSS para modelar el sistema eléctrico considerando los retrasos en las telecomunicaciones. Esta plataforma permite analizar en detalle los sistemas eléctricos y de comunicación de una microrred, evaluando cómo los retrasos en las comunicaciones y la capacidad de respuesta del hardware afectan la integración de los VEs y los sistemas fotovoltaicos. El desarrollo de esta herramienta se muestra en el siguiente subcapítulo.
- **Análisis del efecto de múltiples sensores PV:** El estudio también evaluó el impacto de utilizar múltiples sensores PV dentro de la red para cumplir con las directrices de V2G. Este enfoque ayuda a comprender cómo la distribución espacial de los sensores puede mitigar los efectos del movimiento de nubes y otros factores ambientales, mejorando la precisión y eficiencia de la generación de energía fotovoltaica y su integración en la red.

Esta herramienta, que está en desarrollo continuo por parte de la Universidad de Valladolid y la Universidad de Cuenca, está disponible para descarga en <https://github.com/davilamds/EVPVSimulation>. La plataforma evalúa el impacto de la integración de sistemas PV y VE, estableciendo parámetros para la activación del sistema (para análisis preliminares) y gestionando la comunicación y funcionalidad de cada componente (ver Figura 13).

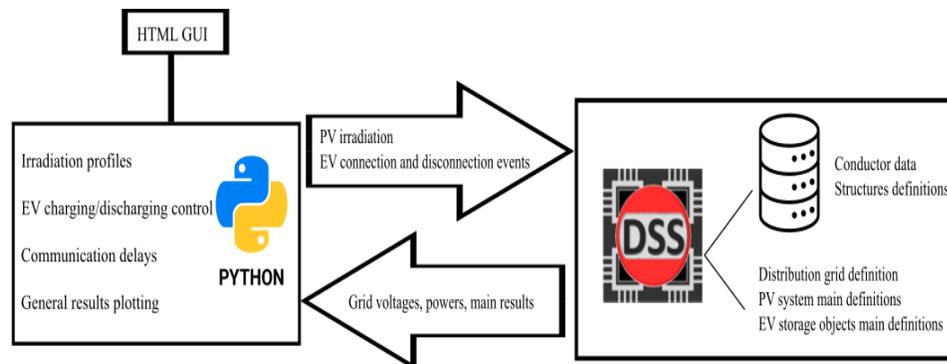
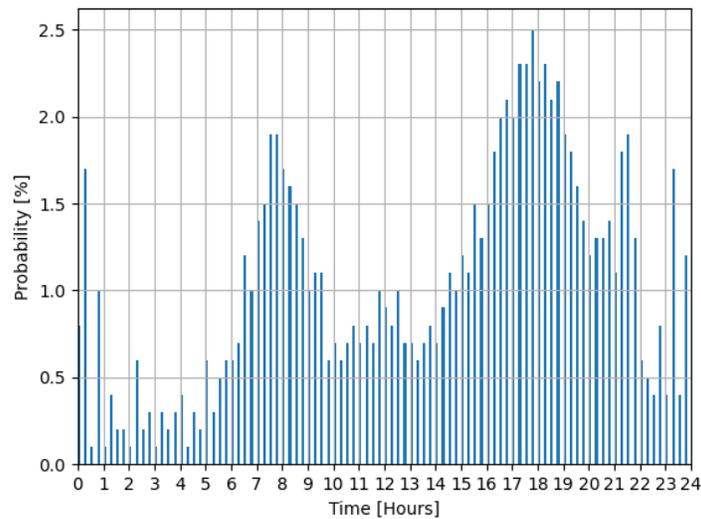


Figura 13. Sistema de co-simulación

Para determinar el momento en que ocurren los eventos de conexión de los vehículos eléctricos, el estudio utiliza una curva de probabilidad bimodal. Este enfoque permite generar automáticamente las probabilidades de conexión, destacando dos picos distintos que reflejan los patrones típicos de conexión de los usuarios de VE (ver Figura 14). Además, se tiene en cuenta el tiempo de retraso asociado a los cambios en los comandos de potencia de carga de los VE. Esta consideración es fundamental para modelar y predecir con precisión el comportamiento de los VE en la red eléctrica, asegurando que las simulaciones se asemejen lo más posible a situaciones reales.



*Figura 14. Distribución de probabilidad de conexión de vehículos eléctricos*

En cuanto a los parámetros de comunicación, la plataforma tiene en cuenta el retraso entre el agregador y la estación de carga del vehículo eléctrico. Calcula los retrasos de transmisión y propagación, además de considerar los retrasos por cola y procesamiento (ver Figura 15). Estos retrasos dependen principalmente de las características del medio de transmisión y del número de nodos de comunicación involucrados.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

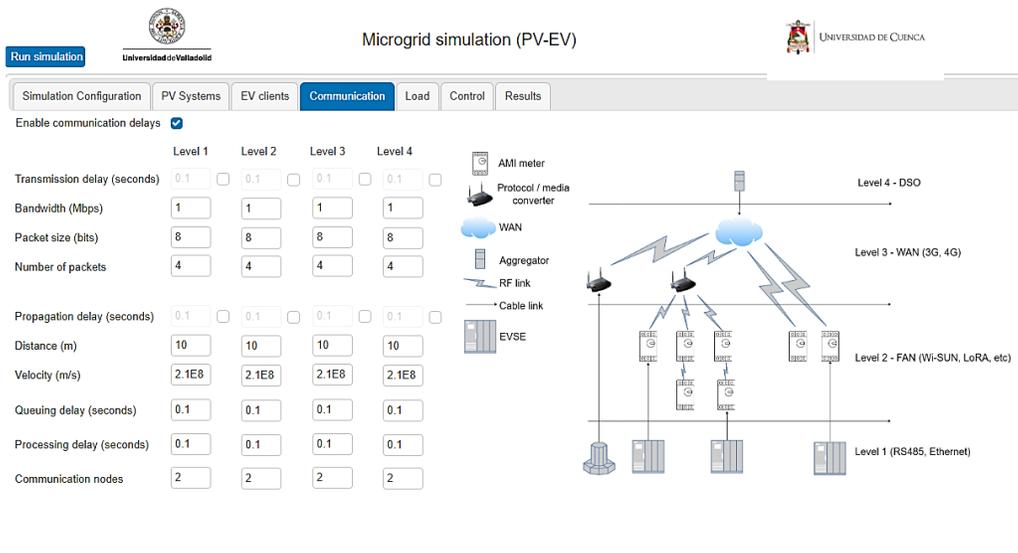


Figura 15. Configuración de parámetros de retardos

Una estrategia identificada como eficaz para mitigar las fluctuaciones en los niveles de voltaje y potencia, causadas por la variabilidad de los recursos solares fotovoltaicos, es el uso de sistemas de agregadores de vehículos eléctricos. Estos sistemas coordinan la implementación de V2G para corregir las variaciones observadas en el sistema [36]. En esta tesis, se planteó la que un agregador de este tipo debería ser capaz de adaptarse a los cambios en la disponibilidad de los recursos solares fotovoltaicos, atribuidos al movimiento de nubes sobre una determinada área.

Para este análisis, se identificaron tres áreas geográficas, denominadas Z1, Z2 y Z3, donde se monitorea el patrón de movimiento de la radiación solar a lo largo de un período de tres horas. Las características de estas zonas y la dinámica del movimiento de la radiación solar se ilustran en la Figura 16. La integración de esta dinámica en el diseño y funcionamiento del agregador de VE introduce una estrategia novedosa para mitigar la variabilidad en la generación PV y mejorar la capacidad de adaptación del sistema eléctrico a los cambios meteorológicos. Esta investigación amplía nuestro entendimiento sobre cómo gestionar las variaciones espaciales y temporales de la radiación solar en sistemas energéticos que dependen significativamente de la energía solar fotovoltaica.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

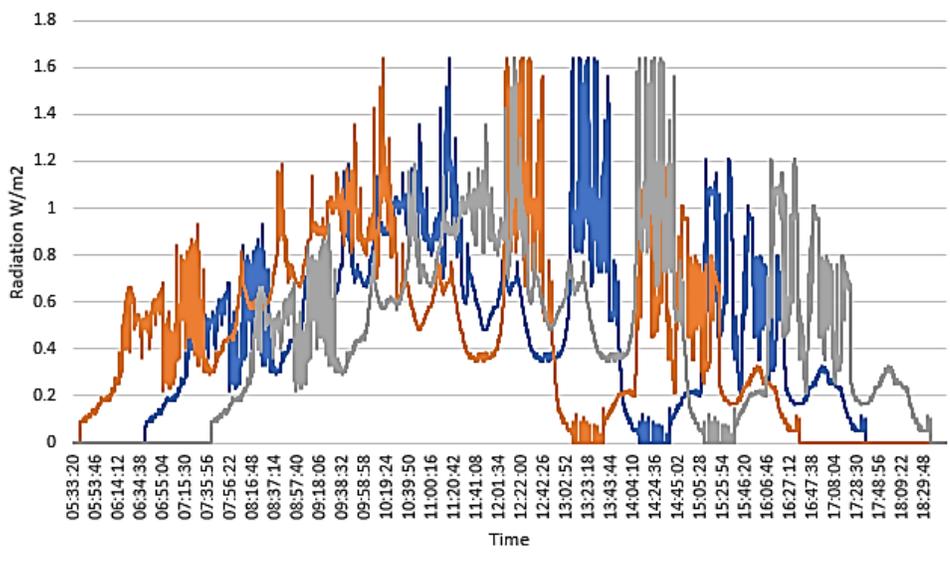


Figura 16. Radiación solar por movimiento de las nubes

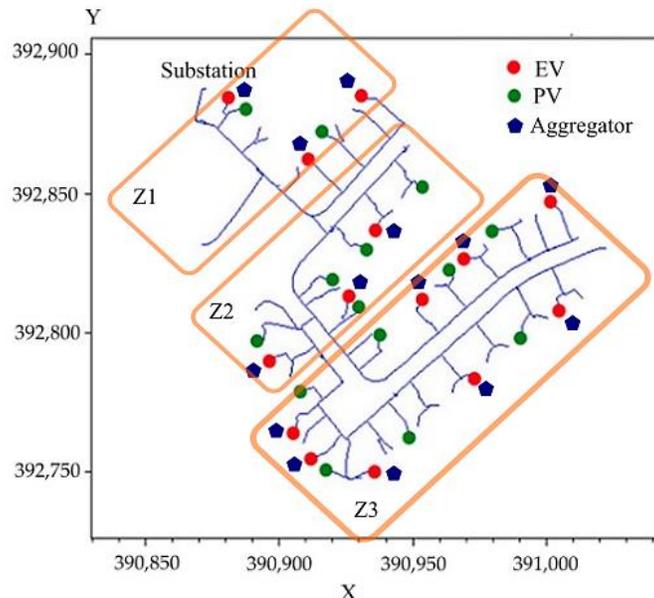
Además, en relación con el control implementado por el agregador, se examinaron los siguientes escenarios:

1. Un único agregador gestionando todos los vehículos eléctricos en un alimentador, utilizando una única señal de recurso fotovoltaico como referencia.
2. Varios agregadores gestionando diferentes segmentos de VE en un alimentador, todos basados en una única señal de recurso PV.
3. Varios agregadores gestionando segmentos de VE en un alimentador, cada uno utilizando múltiples señales de recurso PV como referencias.

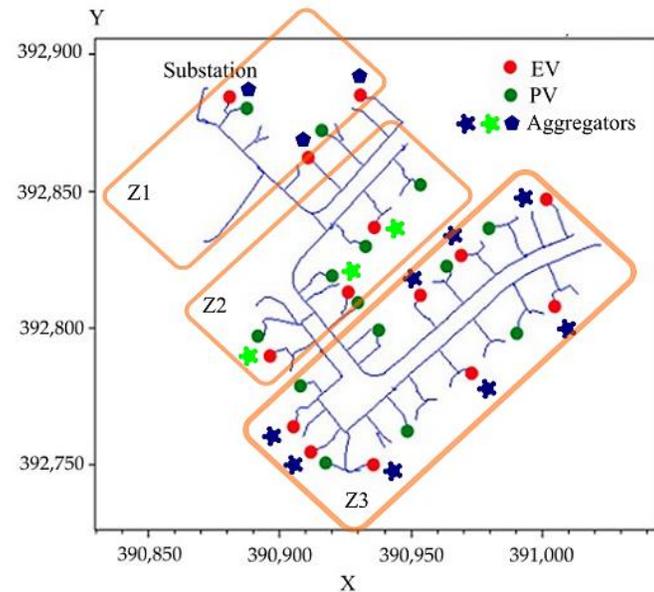
Este análisis se llevó a cabo utilizando el sistema de prueba de baja tensión europeo de IEEE, configurado con 14 VEs, cada uno con una capacidad de potencia de 7.4 kW, y 14 sistemas PV, cada uno con una capacidad de 1 kVA. Estos valores de potencia fueron seleccionados para demostrar los efectos estudiados, evitando al mismo tiempo una distorsión excesiva del caso IEEE analizado, dado que se trata de un sistema subterráneo con cargas muy bajas. Los VE fueron simulados como baterías, mientras que los agregadores de VE fueron simulados como controladores de almacenamiento. Para los sistemas PV, se utilizó el modelo predeterminado del simulador (ver Figura 17). Los VE se programaron para conectarse entre las 13:00 y las 17:00, imitando un patrón típico de conexión observado en áreas de estacionamiento público durante su segunda

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

fase de conexión al sistema. Este horario de conexión también se alineó deliberadamente con las fluctuaciones en la disponibilidad de los recursos PV.



(a)



(b)

Figura 17. Sistema con zonas de movimiento de nubes y agregadores de vehículos eléctricos (a) Caso 1 y (b) Caso 2 y 3

El análisis se muestra en el artículo:

*Heterogeneous Communication Network Architecture for the Management of Electric Vehicle Charging Stations: Multi-Aggregator Management in Microgrids with High Photovoltaic Variability Based on Multiple Solar Radiation Sensors.*

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

En el sistema planteado se desarrolló lo siguiente:

- Se implementó un sistema que considera retardos de comunicación considerando características de los medios de transmisión de datos entre y los componentes de la microrred.
- Se ejecutaron simulaciones para evaluar la arquitectura en diferentes escenarios.

### **1.5.5. Diseño de software y hardware**

#### **Diseño de una plataforma de simulación integrada con Python y OpenDSS**

Las redes eléctricas están enfrentando nuevos desafíos debido a la integración de vehículos eléctricos y la generación distribuida (GD), lo que está modificando los paradigmas clásicos del análisis de redes de distribución de energía. Para evaluar el impacto de estas tecnologías emergentes, se requieren herramientas de diseño que incorporen modelos realistas y parámetros específicos de los VE, la generación fotovoltaica, los usuarios residenciales y la infraestructura de comunicación de la red. En general, la simulación de fuentes de generación distribuida (DGS) y VEs requiere plataformas que consideren tanto los parámetros eléctricos del sistema como el comportamiento de los usuarios. Sin embargo, son pocas las plataformas tradicionales que incluyen estos parámetros adicionales y que permiten simulaciones en diferentes escalas de tiempo, como diarias, semanales, mensuales o anuales [37]. Además, muchos de estos programas están orientados a la integración de generación en niveles de media o alta tensión, y existen pocas herramientas que analicen los sistemas de distribución de baja tensión. La integración de modelos de simulación que consideren la red de baja tensión, específicamente en el punto de conexión del usuario final, se ha vuelto crucial, por lo que los programas de simulación deben contemplar estos parámetros.

De manera similar, la creciente adopción de VEs y su conexión a la red de distribución debe modelarse adecuadamente, ya que esta carga no solo aumenta considerablemente dentro del sistema, sino que también es difícil de predecir debido a su dependencia de los hábitos de los usuarios.

En la última década, se han desarrollado simuladores especializados para el análisis de DGS y VEs, muchos de los cuales son de código abierto, lo que permite su integración con herramientas tradicionales. Por ejemplo, estudios como [38], [39] integran sistemas de información geográfica (GIS) con OpenDSS, un simulador de código abierto para el análisis de redes de distribución, y en [40] se diseña una herramienta para crear series temporales que describen la movilidad de los VEs, considerando aspectos como los frenos regenerativos y la disponibilidad de estaciones de carga. Asimismo, en el caso de la DGS, se utilizan paquetes de simulación de código

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

abierto, como en [41], donde los autores presentan una opción de co-simulación para redes de distribución con generación PV, analizando los tiempos de procesamiento.

La simulación de DGS y el control de carga de VEs permite evaluar la respuesta de la red ante variaciones en el punto de consigna de carga, pero las plataformas de simulación actuales carecen de módulos específicos para configurar este comportamiento, lo que demanda una solución integral.

Este estudio propone un entorno de co-simulación para integrar diferentes parámetros de simulación de DGS con alta penetración de PV y VE, considerando escenarios de operación real, en particular los retrasos de comunicación entre el agregador para el control de carga de los VEs y las estaciones de carga. La simulación se realiza utilizando OpenDSS y Python, controlados a través de una interfaz web, y está disponible para su descarga en <https://github.com/davilamds/EVPVSimulation>.

Para que el sistema de simulación funcione con parámetros realistas, se consideró el uso de un sistema de agregador como el principal agente de control de carga de los vehículos eléctricos en la red eléctrica. El agregador se comunica con el operador del sistema de distribución, quien se encarga de gestionar los sistemas de generación fotovoltaica y las cargas residenciales. En algunos sistemas de mercado eléctrico, el agregador puede controlar la carga según el precio actual de la energía. Sin embargo, en el caso propuesto, el agregador puede modificar el punto de consigna de carga utilizando V2G o V1G, junto con una señal de control basada en la radiación solar, como se muestra en la Figura 18.

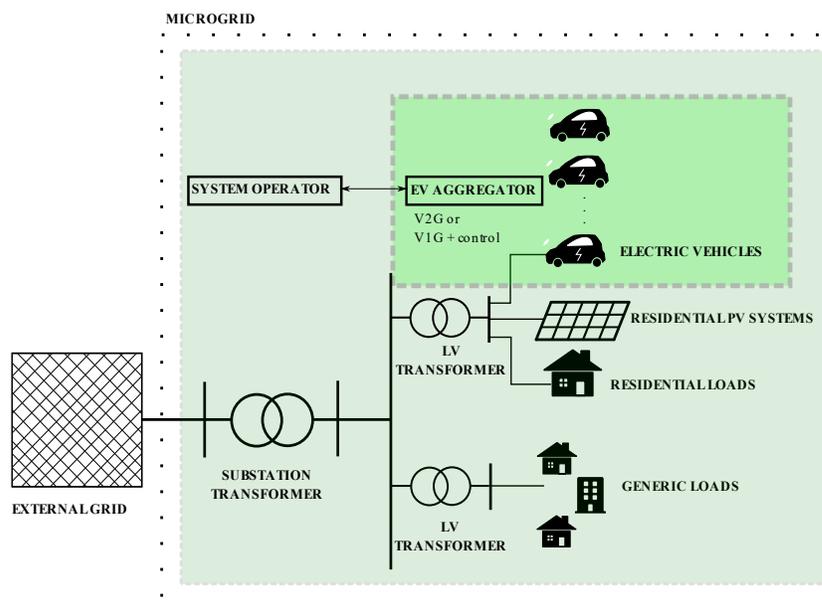


Figura 18. Áreas de control usadas en la plataforma de simulación

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

La plataforma de co-simulación incluye parámetros que pueden ser modificados por el usuario final, lo que permite analizar tanto la penetración de sistemas fotovoltaicos como de vehículos eléctricos, y principalmente los retrasos en la comunicación. La Figura 19 muestra los parámetros modificables considerados en el software. Durante el diseño de la plataforma, se tuvieron en cuenta aspectos que el usuario final puede ajustar para analizar el efecto de la penetración de sistemas PV y VE, así como parámetros para la habilitación de los sistemas (para un análisis preliminar) y la comunicación y operación de cada elemento.

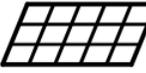
 Aggregator Communication and control	Charging control strategies Number of communication nodes Transmission delay Propagation delay Queuing delay Processing delay
 Electric Vehicles	Setpoint change delay EV penetration Enable or disable EVs Charge event probability distribution function -User defined -Generated with peak hours
 PV systems	PV penetration Enable or disable PV systems Irradiation profile Efficiency profile P-T profile Temperature profile
 Residential loads	Load profile

Figura 19. Parámetros modificables por el usuario

La plataforma considera el impacto de la integración de sistemas fotovoltaicos y vehículos eléctricos, configurando parámetros para la activación del sistema (para análisis preliminares) y gestionando la comunicación y funcionalidad de cada componente. La interacción entre Python y OpenDSS se desarrolló considerando los siguientes aspectos:

- **Inicialización de datos y entrada:** Python se utilizó para inicializar los parámetros de simulación, incluyendo la configuración de la microrred, la ubicación de los agregadores de VE y la distribución de los sistemas PV. Estos parámetros se pasaron a OpenDSS para configurar el modelo de la red eléctrica.
- **Control de la simulación:** Los scripts de Python controlaron el proceso de simulación en OpenDSS, lo que incluyó iniciar y detener la simulación, ajustar los pasos de tiempo y modificar los parámetros del sistema en tiempo real según los

escenarios predefinidos y eventos dinámicos, como los movimientos de nubes y las demandas de carga de VE.

- **Intercambio y procesamiento de datos:** Durante la simulación, OpenDSS generó datos eléctricos detallados, incluyendo niveles de voltaje, flujos de potencia y demandas de carga en varios nodos. Python recuperó estos datos a través de interfaces COM, los procesó y analizó para evaluar el rendimiento del sistema. Las capacidades de manejo de datos de Python permitieron evaluar los efectos de los retrasos en las telecomunicaciones y la respuesta del hardware.
- **Integración de múltiples sensores PV:** Python gestionó la integración de varios sensores PV, simulando sus lecturas e incorporándolas en el control de OpenDSS. Estas lecturas se utilizaron para ajustar los puntos de consigna de carga y descarga de los VE, asegurando que el sistema respondiera de manera dinámica a los cambios en la irradiancia solar.
- **Evaluación de retrasos en comunicación y hardware:** La plataforma incluyó diversas características de retraso. Los scripts de Python introdujeron estos retrasos en la simulación, permitiendo analizar su impacto en el rendimiento del sistema. OpenDSS procesó las señales retrasadas para reflejar los efectos en tiempo real sobre la regulación de voltaje y el flujo de potencia.
- **Simulación del control de agregadores de VE:** Los scripts de Python implementaron la lógica de control para los agregadores de VE, gestionando la activación y desactivación de los vehículos en OpenDSS.

## Modelamiento de microrred

Para considerar diferentes topologías de red, se propone un paradigma de modelado de la red eléctrica basado en módulos, que son gestionados por el script principal de OpenDSS. Este script carga por separado los archivos de líneas, transformadores, curvas, cargas, vehículos eléctricos y sistemas fotovoltaicos (ver Figura 20a). Elementos como los sistemas PV y los VE deben estar conectados a todos los buses del sistema y pueden ser habilitados o deshabilitados en el script de Python (ver Figura 20b). En la interfaz HTML, el usuario puede configurar el archivo maestro de OpenDSS con el que trabajará, modificar el tiempo de simulación, el número de simulaciones de Monte Carlo y seleccionar si la simulación corresponde a un día laboral o un fin de semana, para aplicar diferentes curvas de comportamiento de conexión de los VE (ver Figura 20c).

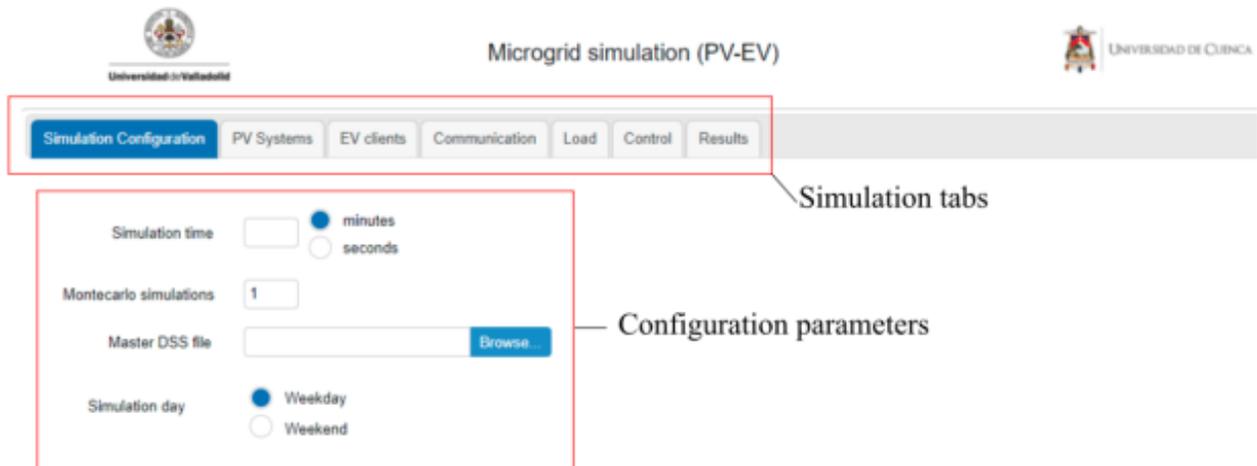
Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

```
clear  
new circuit.FEL basekV=230 pu=1.0 angle=0 frequency=60 phases=3  
set defaultBaseFrequency=60, set EarthModel=Carson  
redirect LinesMV.dss, redirect Transformers.dss, redirect LinesLV.dss  
redirect Loadshapes.dss, redirect Loadshapes_PV.dss, redirect LoadsLV.dss  
redirect Curves.dss, redirect EV_Storage.dss
```

(a)

```
new PVSystem.pv_client_1 bus1=loadbus_client_1.1.2 kv=0.24 phases=1 kVA=3.00 pf=1  
conn=wye irradi=1 Pmpp=3.00 temperature=14 effcurve=EffvsP P-TCurve=PvsT Daily=Rad  
TDaily=Temp %cutin=0  
new storage.EV_1 bus1=loadbus_client_1.1.2 phases=2 model=1 kW=7.2 kV=0.24 pf=1  
kWrated=7.2 kWhrated=24 %reserve=0 %stored=0 %EffCharge=100 %IdlingkW=0  
Chargetrigger=0 dischargetrigger=0 enabled=yes state=idling
```

(b)



(c)

Figura 20 Definición de la microrred en el software (a) librerías (b) definición de sistemas fotovoltaicos y vehículos eléctricos (c) parámetros configurables

## Modelamiento de vehículos eléctricos, control de carga y comunicación

Los vehículos eléctricos se modelan como baterías bidireccionales en OpenDSS, mientras que Python gestiona tanto la penetración del sistema como los eventos de conexión. La penetración de los VE puede configurarse a través de la interfaz HTML y

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

se considera como la relación entre la potencia total de los VE conectados al sistema y la potencia de las cargas residenciales (Ecuación 4).

$$VE_{\text{penetracion}} = \frac{\sum P_{VE}}{\sum P_{\text{Cargas}}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para determinar los eventos de conexión de los vehículos eléctricos, se utiliza una curva de probabilidad binomial basada en el comportamiento real de los sistemas de carga [42], la cual puede ser generada o definida por el usuario (ver Figura 21). Además, se tiene en cuenta el tiempo de retraso en los cambios de los comandos de carga de los VE, como se muestra en [43].



Figura 21. Parámetros configurables para vehículos eléctricos

El control de la carga de los vehículos eléctricos se realiza de manera similar a lo indicado en [43]. En la Figura 22 se muestra un ejemplo de un filtro Savitsky-Golay para suavizar las variaciones del recurso fotovoltaico. El punto de consigna de la potencia de carga se aplica a los VE del sistema, considerando el tiempo indicado en la curva de probabilidad de eventos de conexión, lo que reduce el consumo de energía de los VE cuando varía el recurso fotovoltaico, minimizando el impacto en los voltajes de los buses. La aplicación de estos algoritmos es crucial en redes con alta penetración de generación fotovoltaica, ya que estos sistemas proporcionan una inercia muy baja [44].

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

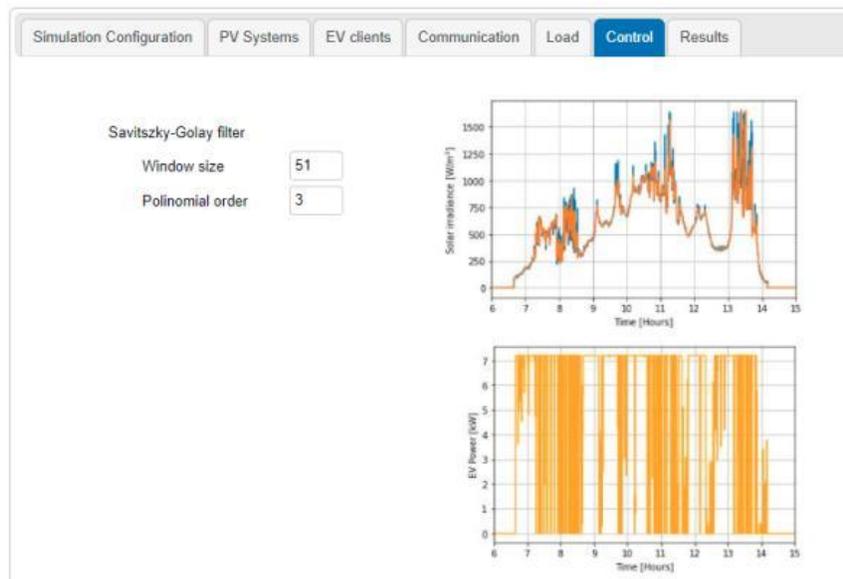


Figura 22. Parámetro de control

En cuanto a los parámetros de comunicación, la plataforma tiene en cuenta el retraso entre el agregador y la estación de carga de los vehículos eléctricos. Calcula los retrasos de transmisión y propagación, además de considerar los retrasos en las colas y el procesamiento (ver Figura 23). Estos retrasos se determinan principalmente por las características del medio de transmisión y la cantidad de nodos de comunicación presentes. Esta consideración es especialmente crítica en redes con alta penetración de VEs, ya que las solicitudes para modificar el punto de consigna de carga pueden generar tiempos significativos de procesamiento y encolado.

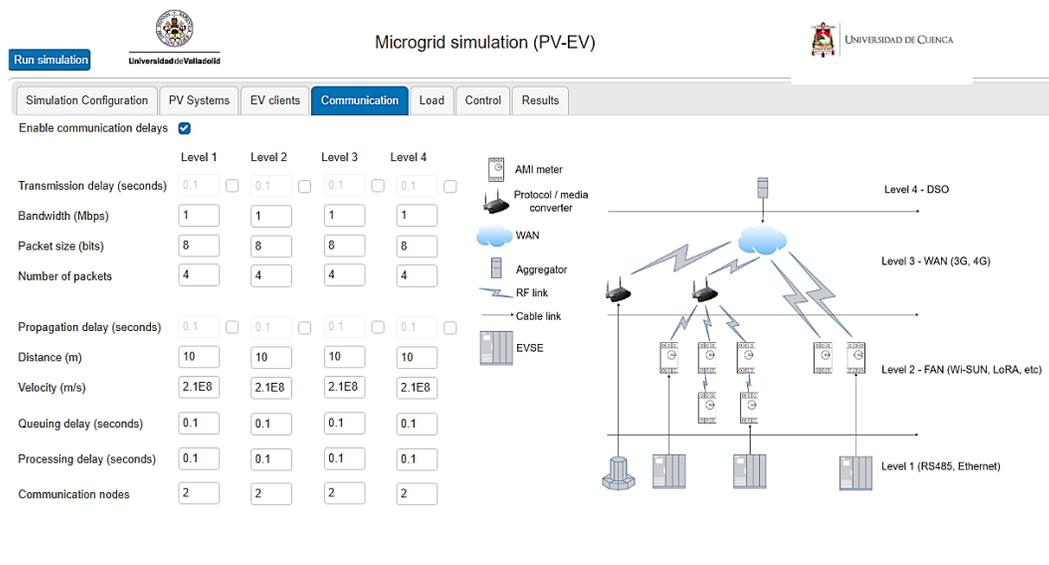


Figura 23. Parámetros configurables de retardos de telecomunicaciones

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Sistemas fotovoltaicos

En el caso de los sistemas de generación fotovoltaica, la interfaz HTML permite al usuario configurar el grado de penetración y definir curvas de operación específicas, como las de irradiación, eficiencia y temperatura (ver Figura 24).

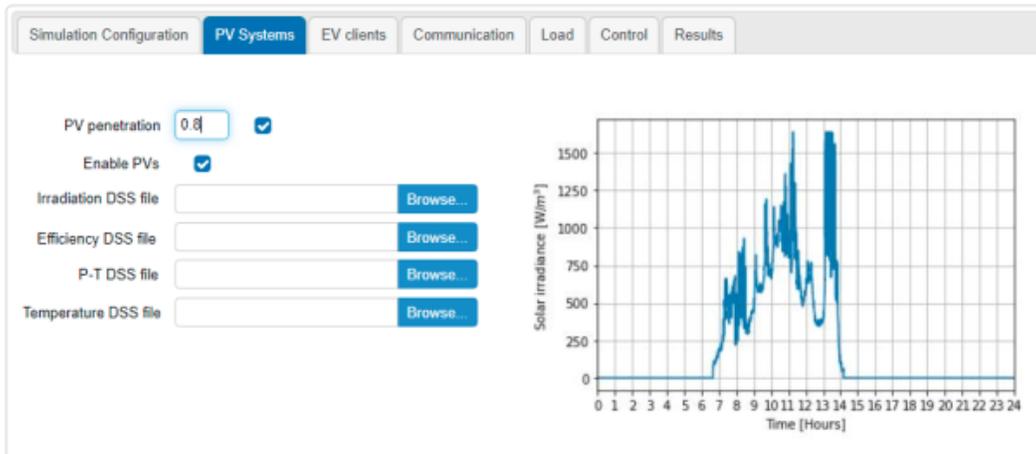


Figura 24. Parámetros configurables de sistemas fotovoltaicos

## Cargas residenciales

Finalmente, el perfil de carga de las cargas residenciales conectadas al sistema de distribución puede modificarse a través de la interfaz HTML (ver Figura 25). La curva se define en valores por unidad.

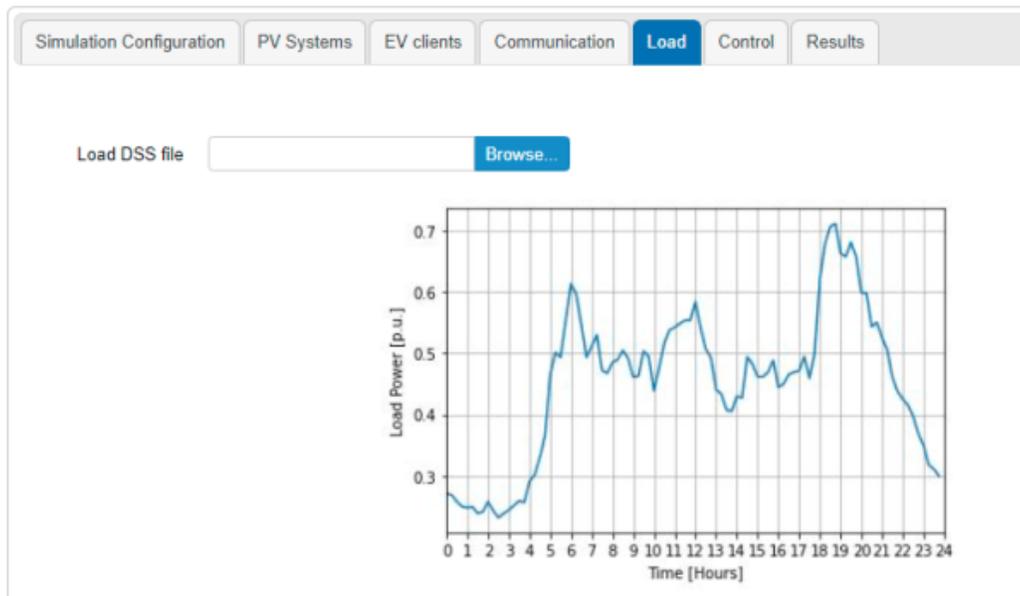


Figura 25. Parámetros configurables de cargas residenciales

El análisis se muestra en el artículo:

*Charging control of electric vehicles in microgrids with high penetration of photovoltaic generation: an integrated simulation method with Python and OpenDSS*

## Diseño de estación

Para realizar el proceso de carga de un VE se han establecido varios estándares que especifican tanto conectores como los parámetros eléctricos requeridos para el proceso. La estandarización de la carga de VEs responde al incremento de la penetración masiva de esta tecnología, sin embargo, hasta el momento están divididos en zonas geográficas y los conectores utilizados son físicamente diferentes.

Según [45] el tiempo de carga de un VE depende de múltiples factores, como el State of Charge (SOC) inicial y final, el cual está limitado por la tasa de carga que puede soportar la batería y el equipo de carga EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment). Así, los modos de carga para un VE están especificados en el estándar IEC 61851 [2] y se clasifican según la conexión del vehículo a la red eléctrica del usuario final. En cuanto a los conectores de existen el tipo 1 y tipo 2 los cuales están especificados en los estándares SAE J1772 y IEC 62196 respectivamente, los conectores GB/T y CHAdeMO. En la Tabla 2 se muestra una comparación entre los diferentes modos de carga.

*Tabla 2. Modos de carga de vehículos eléctricos*

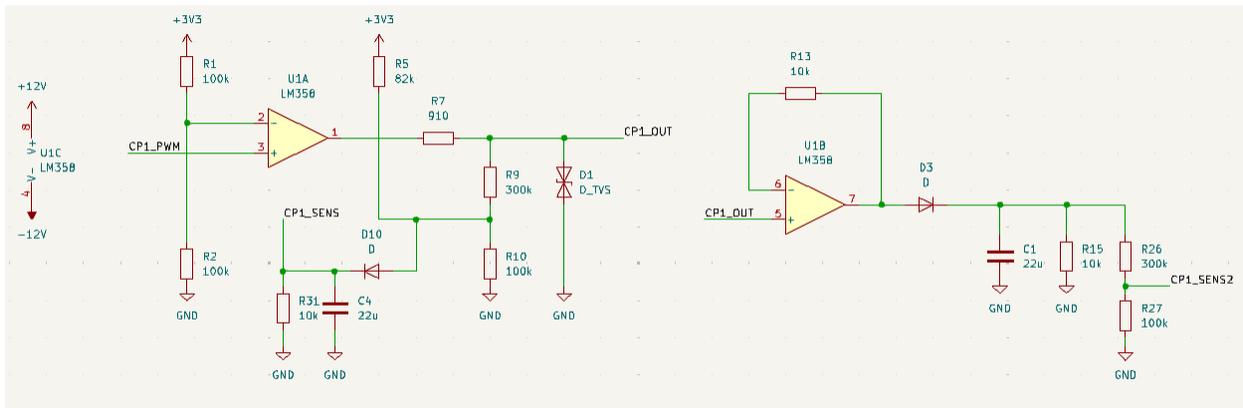
Modo	Descripción	Potencia máxima [kW]	Control de carga	Conector	Corriente y tensión máxima
1	Conexión entre una toma de corriente estándar de una red de alimentación de CA y VE sin comunicación	3	No	SAE J1772, IEC 62196, GB/T	16A/250VAC 1 fase
		10			16A/480VAC 3 fases
2	Conexión entre una toma de corriente estándar de una red de alimentación de CA y un vehículo eléctrico con comunicación	7	Yes	SAE J1772, IEC 62196, GB/T	32A/250VAC 1 fase
		24			32A/480VAC 3 fases
3	Conexión de un VE a un EVSE de CA con comunicación	43.5	Yes	SAE J1772, IEC 62196, GB/T	63A/480VAC 3 fases
4	Conexión de un VE a una red de alimentación de CA o CC utilizando un EVSE de CC, con comunicación	187.5	Yes	GB/T	250A/750VDC
		400		CCS Type1/2, CHAdeMO 1.2 & 2.0	400A/1kVDC
		900		GB/T, ChaoJi (CHAdeMO 3.0)	600A/1.5kVDC

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

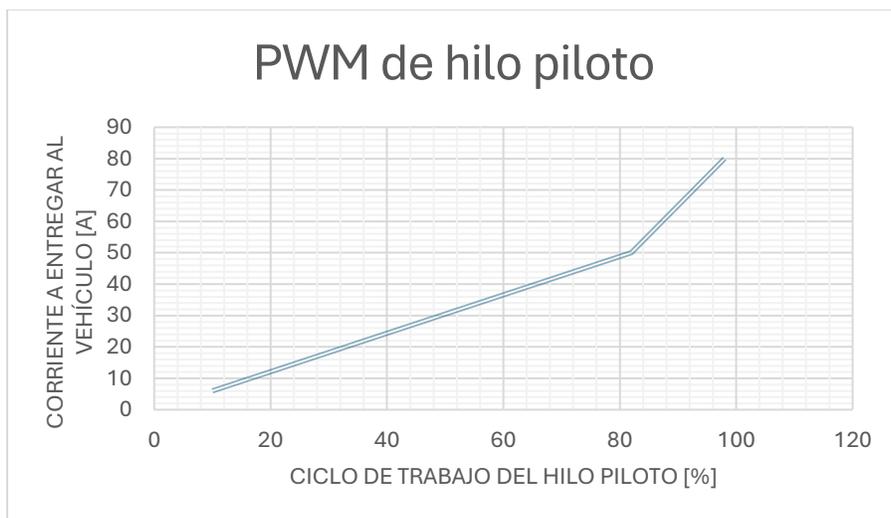
Para realizar el control de carga de vehículos eléctricos se diseñó una estación de carga de modo 2 según la norma SAE J1772. El circuito utilizado se muestra en la Figura 26a. El circuito se basa en el control del hilo piloto o pin de control del vehículo eléctrico y permite el control de la potencia de carga mediante la variación del ciclo de trabajo del PWM que se entrega al controlador interno del vehículo eléctrico [46] (ver Figura 26b) y se calcula según la ecuación 5.

$$\text{Amperios} = \text{porcentaje de ciclo de trabajo} * 0.6 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Las mediciones del hilo piloto pueden observarse en la Figura 26c. El circuito está disponible en [https://github.com/davilamds/evse\\_esp32](https://github.com/davilamds/evse_esp32).

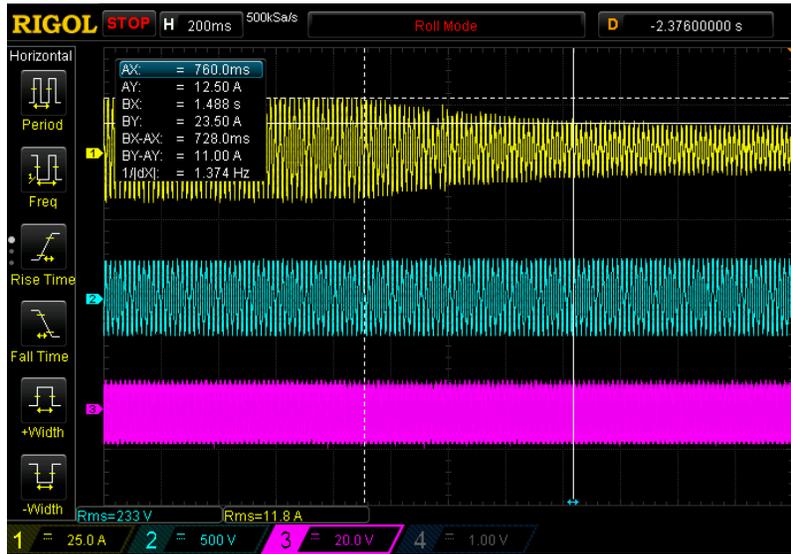


(a)



(b)

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(c)

Figura 26. Circuito de control de carga

Las pruebas de medición y control de carga se realizaron en el laboratorio de microrred del campus Balzay de la Universidad de Cuenca (ver Figura 27)



Figura 27. Medición de carga de vehículo eléctrico

## Ubicación de estaciones

En Ecuador, la integración de vehículos eléctricos aún se encuentra en una etapa incipiente. Hasta agosto de 2022, había 1,170 VE registrados de un total de 2,361,175 vehículos motorizados en el país, lo que representa aproximadamente el 4.95% de la flota vehicular total [7]. Cabe destacar que estos datos provienen de revistas independientes, ya que no se dispone de métricas oficiales sobre la adopción de VE. No obstante, estas cifras coinciden con las proyecciones establecidas en la estrategia nacional de electromovilidad.

La Tabla 3 proporciona información sobre la autonomía de los modelos de VE más vendidos en el mercado ecuatoriano, con un promedio de 308.66 km. Es importante señalar que esta cifra suele ser la especificada por los fabricantes, pero hay poca información sobre el desempeño de estos vehículos en regiones montañosas o con variaciones significativas de altitud. Los VE pequeños, de corto alcance y sin carga inteligente, son populares para el transporte urbano, pero no fueron considerados en este estudio porque no están diseñados para uso en autopistas. Conducir en autopistas requiere una mayor autonomía y capacidades de carga rápida, características que estos vehículos no suelen ofrecer. También se muestran los modelos más vendidos en Estados Unidos según [47], para comparar la autonomía promedio, lo que indica que, en el caso de Ecuador, la autonomía promedio de los VE más vendidos es considerablemente menor. Esto sugiere que las estaciones de carga deberán ubicarse a distancias más cortas.

*Tabla 3. Autonomía de vehículos eléctricos en Ecuador*

País	Marca	Modelo	Autonomía [km]
Estados Unidos	Tesla	Model Y	524
Estados Unidos	Tesla	Model 3	568
Estados Unidos	Chevrolet	Bolt	416
Estados Unidos	Ford	Mustang	370
Mean			469.50
Ecuador	KIA	Soul	276
Ecuador	BYD	E5	300
Ecuador	Dongfeng	RichEV	350
Promedio			308.66

Como se observa, la autonomía promedio de 308.66 km permitiría teóricamente a los vehículos eléctricos llegar a ciudades cercanas sin dificultades. Sin embargo, esto no es así debido a las grandes variaciones de altitud en las carreteras andinas.

Los estudios sobre la ubicación de estaciones de carga para viajes largos en corredores suelen basar la selección de puntos de interés en los costos [48] o dividiendo el trayecto en N segmentos correspondientes a la autonomía promedio de los vehículos

[49]. Sin embargo, la carga de vehículos en viajes largos a través de terrenos montañosos, con variaciones significativas de elevación, ha recibido poca atención, y solo existen modelos generales para la ubicación de estaciones de carga. En el contexto de países como Ecuador, atravesados por la cordillera de los Andes, son escasos los estudios específicos sobre este tema.

El caso de Cuenca es un ejemplo valioso para el análisis de la ubicación de infraestructura de carga en corredores andinos. La ciudad se encuentra a una altitud de 2,500 metros sobre el nivel del mar, lo que presenta desafíos particulares para la carga de vehículos eléctricos. La Tabla 2 muestra las ciudades más visitadas por los habitantes de Cuenca, Ecuador. Estas ciudades están incluidas en el plan de movilidad de la ciudad, que identifica los corredores y nodos de transporte más importantes de la región [50].

La variación de altitud en los Andes es una característica distintiva de la región. Como se muestra en la Tabla 4, es posible viajar desde una altitud de 2,500 metros sobre el nivel del mar en Cuenca hasta una altitud cercana al nivel del mar en La Troncal en solo 2 horas y 38 minutos. Este cambio rápido de altitud puede tener un impacto significativo en el rendimiento de los vehículos, incluidos los VE.

*Tabla 4. Distancia en vehículo a diferentes ciudades*

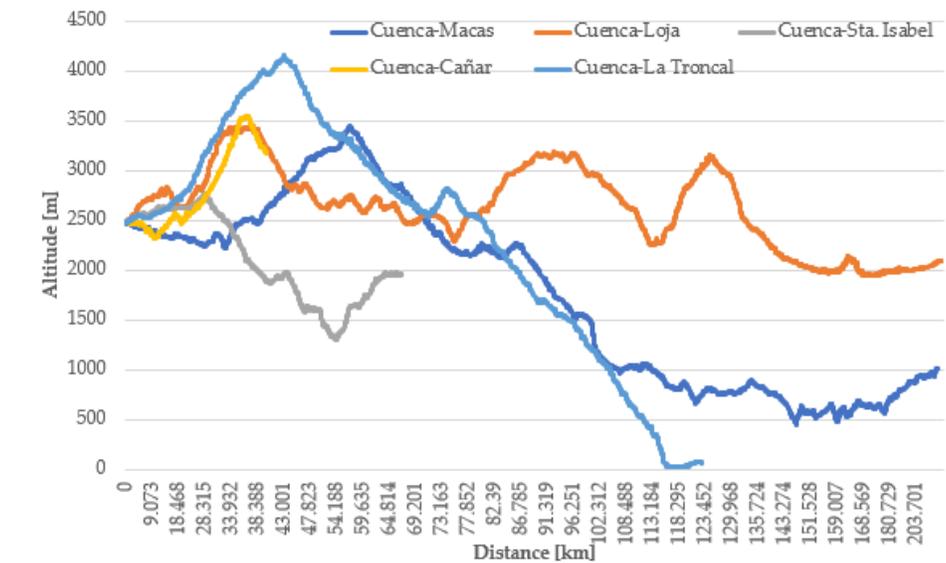
<b>Ciudad</b>	<b>Distancia [km]</b>	<b>Tiempo promedio de viaje [h]</b>	<b>Altitud</b>	<b>Región</b>
La Troncal	156	2h 38m	66	Costa
Macas	217	4h 15m	1011	Amazonia
Santa Isabel	85	1h 23m	1964	Montaña
Loja	204	3h 47m	2099	Montaña
Cañar	63	1h 8m	3172	Montaña

En cuanto a la ciudad de Cuenca, varias carreteras la conectan con las ciudades de Guayaquil, La Troncal, Loja, Cañar y Santa Isabel. Estas rutas atraviesan la cordillera de los Andes para llegar a la costa ecuatorial. El recorrido abarca altitudes que van desde los 2500 m, alcanzando una elevación máxima de 4157 m (como se muestra en la Figura 4).

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(a)



(b)

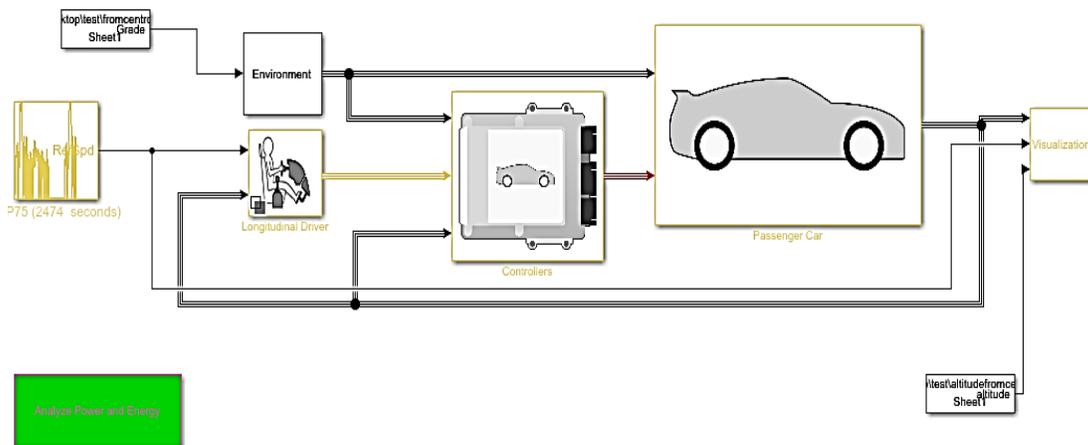
Figura 28. Rutas de conexión con vehículos (a) ubicación y ruta (b) elevación

La ubicación de las estaciones de carga se determinó en base a varios criterios, incluyendo la distancia recorrida, la infraestructura eléctrica existente, la infraestructura hotelera, entre otros. Se dio prioridad a las instalaciones cercanas a las redes eléctricas ya existentes de la empresa distribuidora de energía. La determinación de las ubicaciones intermedias de las estaciones consideró varios aspectos clave:

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

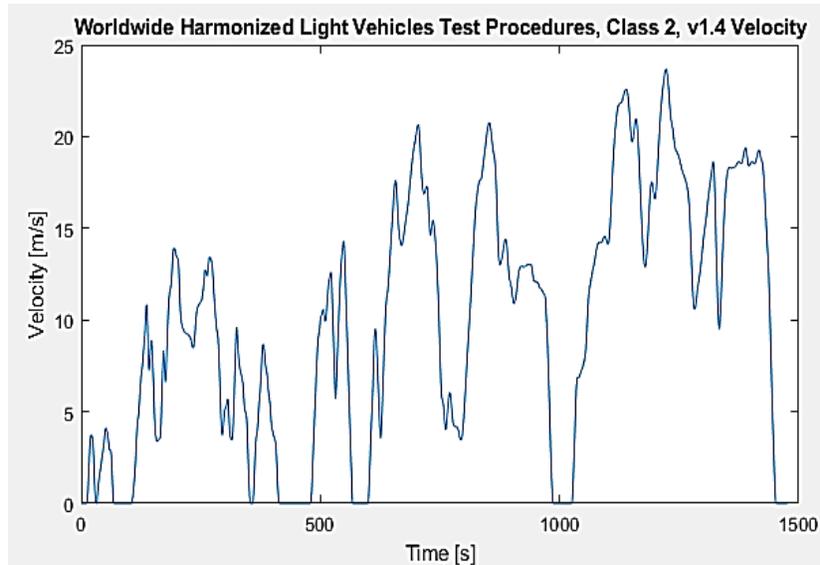
- Análisis de la percepción de los VEs: Se evaluó la percepción y aceptación de los vehículos eléctricos en la región para medir la preparación del mercado local para la infraestructura de VE.
- Autonomía promedio de los VEs existentes: Se tuvo en cuenta la autonomía promedio de los VEs disponibles actualmente para asegurar que las estaciones estén ubicadas a distancias óptimas que se ajusten a las capacidades de los vehículos.
- Infraestructura turística cercana: Se consideró la presencia de infraestructura y atracciones turísticas cercanas, aumentando el atractivo de las estaciones de carga y proporcionando incentivos adicionales para que los viajeros las utilicen.
- Efecto de la altitud en la autonomía de los VEs: Se consideró el impacto de las variaciones de altitud en la autonomía de los VEs, para asegurar que las estaciones estén ubicadas estratégicamente y puedan mitigar las limitaciones de rango, especialmente en regiones con cambios significativos de elevación

Además, se realizó un modelamiento del vehículo y se utilizó la elevación como factor para ubicar las estaciones. La simulación se realizó utilizando MATLAB e integró los componentes fundamentales del modelo de un vehículo eléctrico, como se muestra en la Figura 29a. Este modelo incluyó elementos como un controlador de batería, un selector de ciclo de conducción y las condiciones ambientales, teniendo en cuenta la elevación de la ruta [51]. Para simular el efecto de los cambios de altitud, se incorporó el perfil de elevación de la carretera al modelo. Además, se utilizó un ciclo de conducción de la Clase 2 del Procedimiento Mundial Armonizado de Pruebas de Vehículos Ligeros (WLTP), como se ilustra en la Figura 29b, ya que se ajusta al límite de velocidad máximo de 90 km/h.



(a)

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(b)

*Figura 29. Modelo en Matlab para la simulación (a) Modelo de vehículo eléctrico considerando la elevación de la vía (b) ciclo de manejo en la simulación*

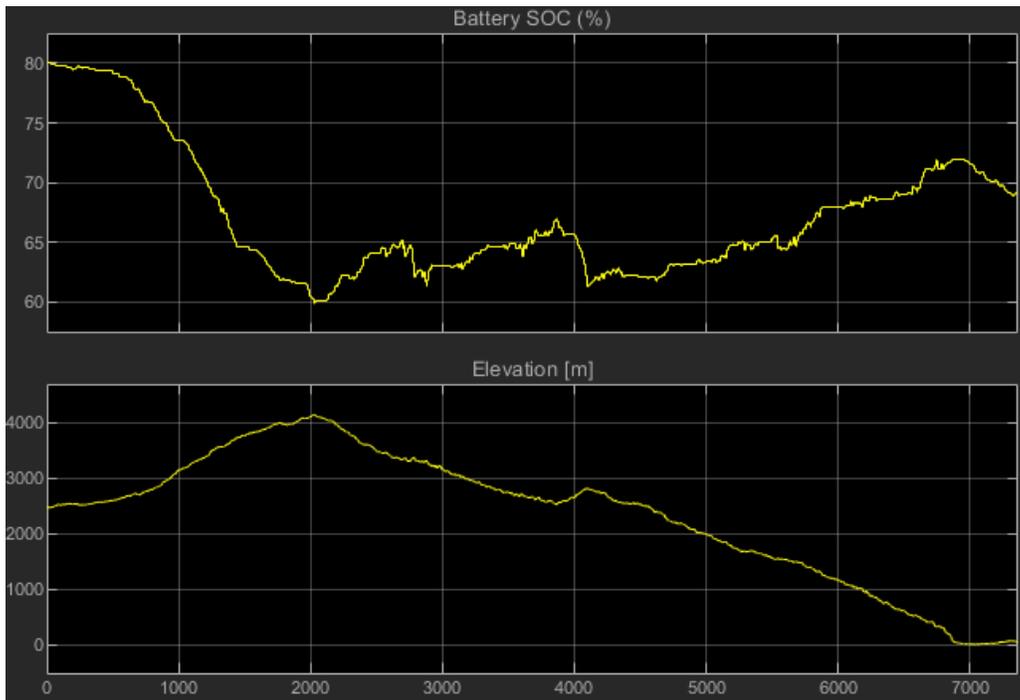
Las simulaciones se llevaron a cabo considerando tanto los escenarios de ida como de regreso para cada ciudad. En todos los casos, se asumió un estado inicial de carga (SOC) del 80% de la batería del vehículo eléctrico al inicio del viaje.

La Figura 30a muestra el comportamiento del estado de carga (SOC) en relación con la altitud a lo largo de la ruta Cuenca-La Troncal en función del tiempo de simulación, mientras que la Figura 30b ilustra el viaje de regreso de La Troncal a Cuenca. En el primer caso, se observa que el vehículo eléctrico llega a su destino sin necesidad de recargar, alcanzando un nivel mínimo de SOC del 60%. Sin embargo, en el viaje de regreso, el SOC cae a un valor mínimo de 3.8%, lo que podría dañar la batería. Si bien es cierto que el vehículo podría llegar a su destino con un SOC del 8.8%, es importante reconocer que este resultado depende de varios factores, como el ciclo de conducción específico y variables externas como las condiciones climáticas, el tráfico, entre otros. Debido a esta variabilidad, se hace evidente la necesidad de una estación de carga intermedia, y su selección debe estar basada en los parámetros detallados en las secciones anteriores. Por lo tanto, la instalación de una estación de carga intermedia se vuelve imprescindible.

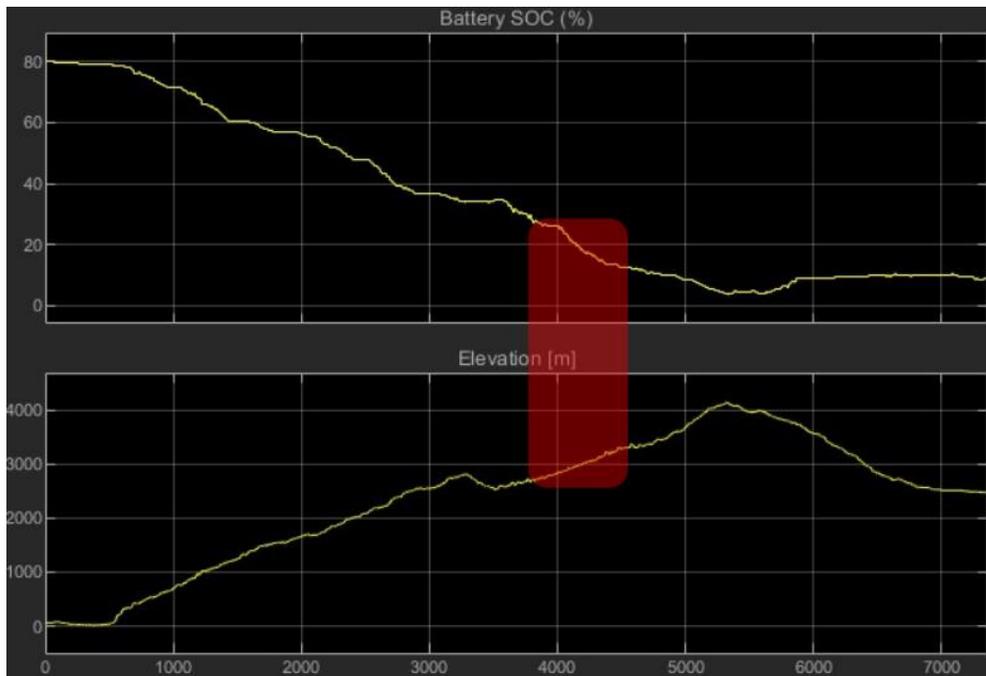
Para garantizar un margen de seguridad del SOC entre el 15% y el 30%, las ubicaciones seleccionadas para las estaciones de carga deberían estar dentro de un rango de altitud de 2800 a 3300 metros sobre el nivel del mar. Esta ubicación estratégica de la infraestructura de carga no solo asegura un viaje de ida sin contratiempos, sino que también reduce el riesgo de daño a la batería durante el trayecto de regreso. Esto resalta

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

la importancia de tomar decisiones basadas en datos para optimizar la experiencia de viaje en vehículos eléctricos y prolongar la vida útil de las baterías.



(a)



(b)

Figura 30. Resultados de la simulación (a) Cuenca-La Troncal (b) La Troncal-Cuenca

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Los análisis se muestran en el artículo:

*Location of electric vehicle charging stations in inter-Andean corridors considering road altitude and nearby infrastructure*

### **1.5.6. Análisis del Impacto de los Armónicos**

Varios estudios han investigado la influencia de los vehículos eléctricos en los sistemas de distribución eléctrica, analizando tanto la penetración de VE como la de los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, existen pocos estudios de caso que examinen la integración de estas tecnologías en redes eléctricas con alta concentración de sistemas PV. Se ha demostrado que la presencia de EV en la red eléctrica tiene un impacto en la distorsión armónica total (THD). En [52], se investigó el efecto de los cargadores rápidos 2 en la red. A medida que aumenta la penetración de VE en un alimentador, también se incrementa el nivel de distorsión armónica. Además, el estudio examinó el impacto de la ubicación del equipo de carga de vehículos eléctricos en el alimentador. Los resultados indicaron que el mayor valor de THD se registró al final del alimentador y que el voltaje en los terminales de los usuarios disminuía cuando el EVSE se ubicaba más lejos del origen del alimentador. Estos hallazgos son significativos para el despliegue de la infraestructura de carga de VE en la red eléctrica, ya que una colocación cuidadosa del EVSE puede mitigar los efectos negativos de los VE en la distorsión armónica. Además, subrayan la necesidad de más investigación sobre la influencia de los VE en la red eléctrica y el desarrollo de estrategias para garantizar una integración confiable y eficiente de los vehículos eléctricos en la red.

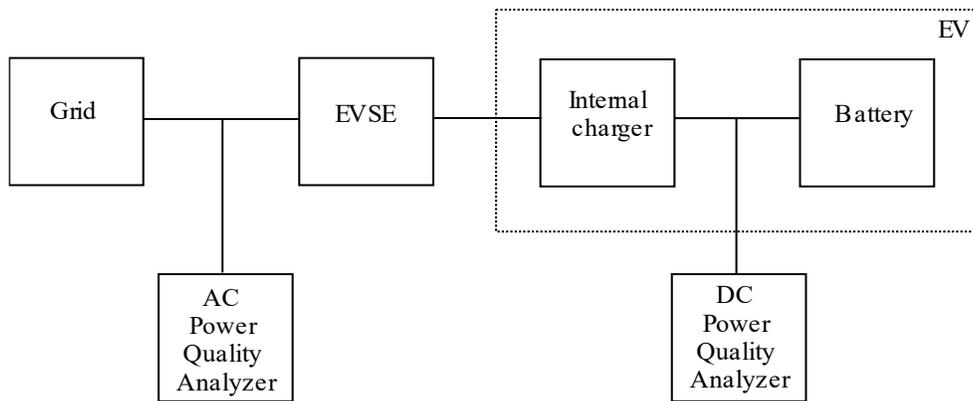
Para obtener los parámetros eléctricos necesarios para este estudio, se realizaron mediciones de dos marcas de vehículos eléctricos y estaciones de carga bajo condiciones reales de carga. Además, se modelaron tanto las estaciones de carga como los vehículos eléctricos como componentes de almacenamiento y fuentes de generación armónica. Se consideró necesario modelar específicamente los VE como componentes de almacenamiento debido a las limitaciones del modelo estándar disponible en OpenDSS, que permite configurar diversos parámetros de eficiencia, incluyendo el estado de carga o descarga y el control de potencia. Sin embargo, dado que no existe un modelo específico para VE en OpenDSS, se empleó MATLAB para controlar sus operaciones. Por otro lado, se consideró que el modelo estándar de OpenDSS era suficiente para modelar los sistemas fotovoltaicos, lo que permitió la incorporación de una amplia gama de parámetros, como irradiancia, eficiencia y efectos de temperatura. Finalmente, se utilizó un modelo estándar de red eléctrica IEEE para realizar las simulaciones.

Se llevó a cabo un análisis detallado del impacto de los armónicos generados por las estaciones de carga de VEs en redes con alta penetración de energía

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

fotovoltaica. Este análisis es crucial para entender y mitigar los efectos negativos de los armónicos en la calidad de la energía y la capacidad de alojamiento de la red eléctrica.

Se realizaron pruebas en el laboratorio de la Universidad de Cuenca utilizando un analizador de calidad de energía Fluke 435 II, con el fin de recopilar datos reales sobre las armónicas de corriente. Las mediciones se llevaron a cabo en vehículos eléctricos BYD T3 y Kia Soul, así como en un equipo de suministro de vehículos eléctricos de corriente alterna (CA) genérico de 7.2 kW y un cargador rápido de corriente continua (CC) modelo Circontrol Raption 50 (ver Figura 31).



(a)



(b)

Figura 31. Medición de armónicos (a) Esquema de conexión (b) Equipo bajo prueba

El análisis se desarrolla en el artículo:

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## *Harmonic Distortion and Hosting Capacity in Electrical Dis-tribution Systems with High Photovoltaic Penetration: The Impact of Electric Vehicles*

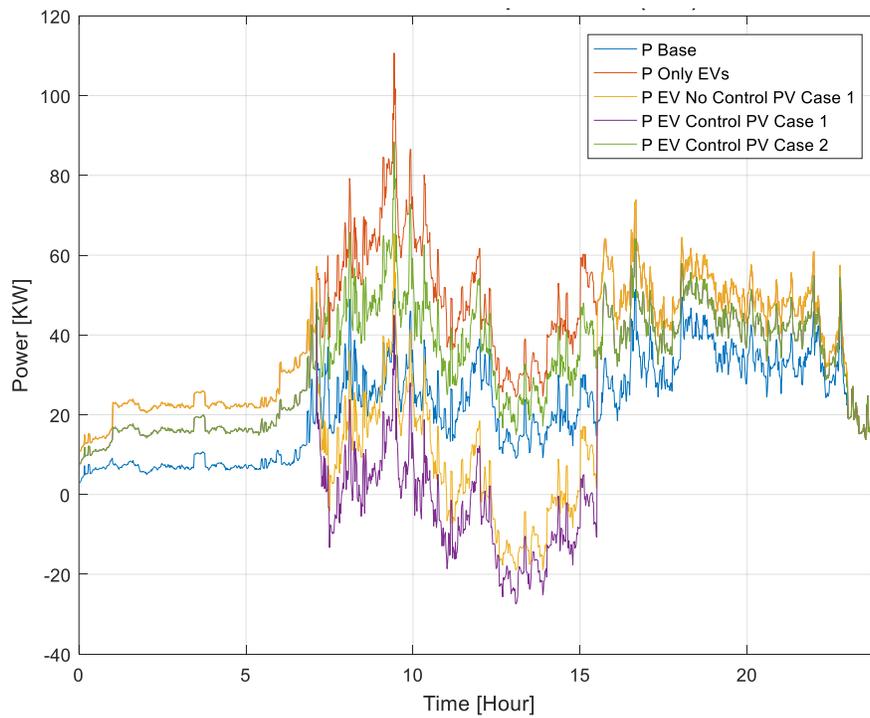
### 1.6. Resultados y Discusión

La investigación ha generado una serie de resultados significativos en el campo de la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes. Estos resultados se agrupan en diferentes áreas clave de la investigación, y cada una se discute en detalle a continuación.

#### Algoritmo de Control de Carga Inteligente

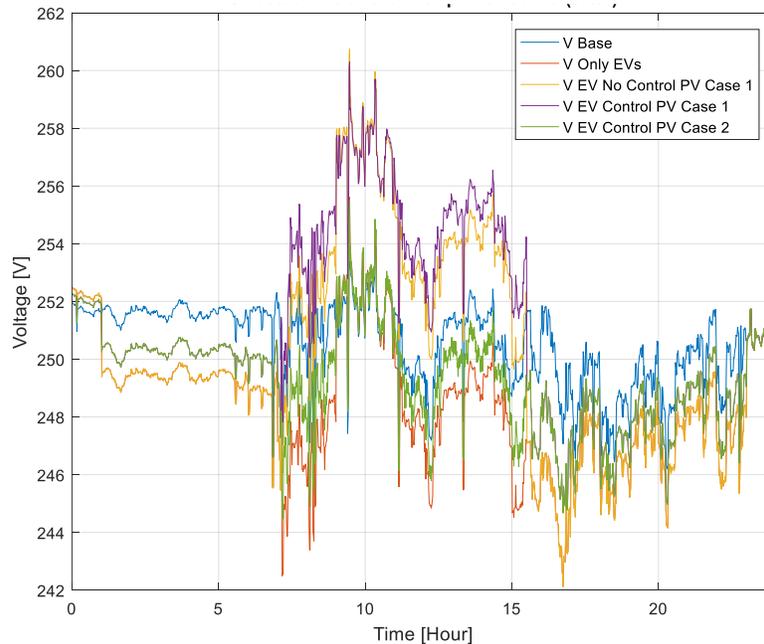
Se analizó la potencia de la subestación del caso IEEE aplicando el algoritmo de tasa de rampa, observándose el impacto de la generación fotovoltaica y de los vehículos eléctricos en la red (ver Figura 11a). Se observó que la potencia base alcanza su máximo cuando solo están conectados los VEs, sin la contribución de la generación PV. Además, se observan valores negativos que indican que la generación PV cubre la demanda del sistema.

Además, al analizar el comportamiento del voltaje en el bus del cliente (ver Figura 11b), se observa un patrón similar, donde el voltaje en los terminales mejora en comparación con los casos sin aplicación del algoritmo.



(a)

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(b)

*Figura 32. Respuesta de (a) potencia de subestación y (b) tensión en bornes de clientes aplicando el algoritmo de control*

Se tuvieron los siguientes resultados:

- El algoritmo de control de carga por tasa de rampa para vehículos eléctricos (VEs) fue desarrollado y validado mediante simulación.
- Resultados Clave: El algoritmo demostró una reducción significativa en las fluctuaciones de potencia, mejorando la estabilidad de la red en un 14% al aplicar técnicas de control de tasa de cambio.

La implementación de este algoritmo proporciona una solución eficaz para gestionar la intermitencia de la generación de energía solar y las variaciones en la demanda de carga de los VEs. Además, presenta una mejora notable en calidad de energía de la red, facilitando una mayor penetración de energías renovables y optimizando el uso de las baterías de los VEs.

### **Arquitectura de comunicación**

La simulación realizada en el entorno de OpenDSS abarcó un periodo de 24 horas, incluyendo las cargas eléctricas específicas del sistema IEEE. El análisis inicial se centró en la potencia de salida de la subestación que alimenta el circuito bajo estudio, como se muestra en la Figura 33. Durante este análisis, se observó que tanto el

escenario 1 como el escenario 2 alcanzaron su pico de potencia a las 16.63 horas, registrando un nivel de potencia de 115.8 kW. Por otro lado, el escenario 3 mostró una demanda de potencia reducida, con un pico a las 16.67 horas y una potencia de 91.19 kW. Estos resultados indican que el enfoque que involucra múltiples agregadores y considera diversas señales de radiación solar fotovoltaica disminuye eficazmente la demanda de potencia en la subestación y mejora el aprovechamiento de la energía tanto de los VEs como de los sistemas PV.

Este resultado destaca la importancia de implementar estrategias avanzadas de gestión energética que combinen fuentes de energía renovable con la capacidad de los VEs de actuar como almacenamiento de energía y mecanismos de respuesta a la demanda. La adopción de medidas de coordinación estratégica, como en el escenario 3, permite una operación más eficiente del sistema eléctrico. Esto no solo reduce la carga sobre la subestación, sino que también maximiza el uso de recursos renovables. Los resultados confirman la efectividad y el potencial de los agregadores de VE para mejorar la calidad y estabilidad de los sistemas eléctricos que integran una cantidad significativa de energía solar fotovoltaica.

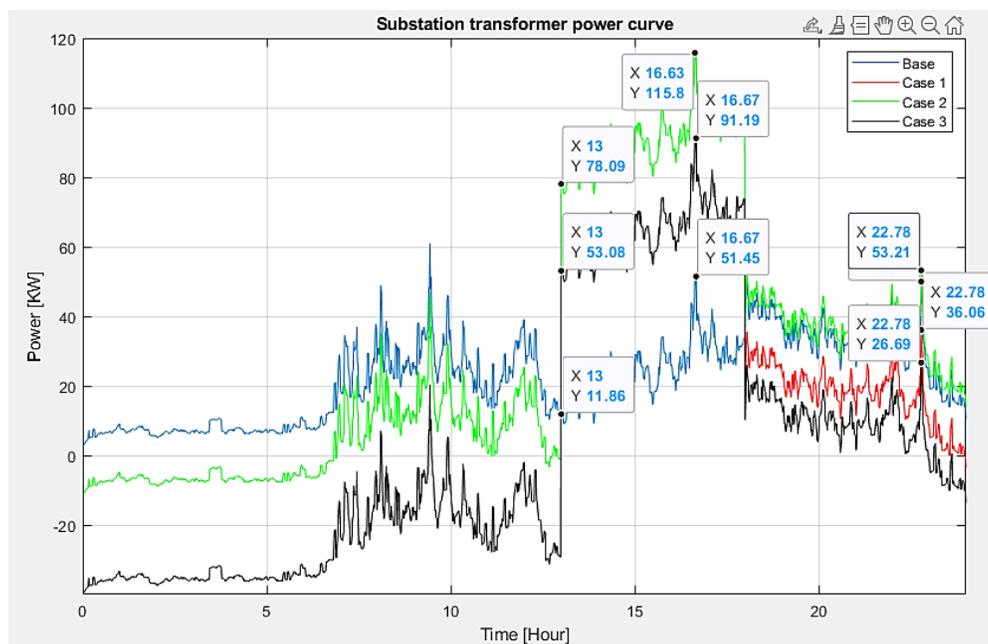


Figura 33. Potencia de subestación

El análisis del voltaje en la carga 349 (ver Figura 34) muestra que el escenario 3 resulta en una menor caída de voltaje en comparación con los otros escenarios, registrando un voltaje de 233.9 V. Este patrón se mantiene constante tanto cuando los vehículos eléctricos inician la carga como cuando están devolviendo energía al sistema. Específicamente, la caída de voltaje en el escenario 3 mejora aproximadamente un 2.6% en comparación con el escenario 1 y un 2.2% respecto al escenario 2. Además, el voltaje

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

promedio en los puntos de carga críticos se mantuvo más cercano al nivel nominal, lo que subraya el mejor rendimiento en la regulación de voltaje.

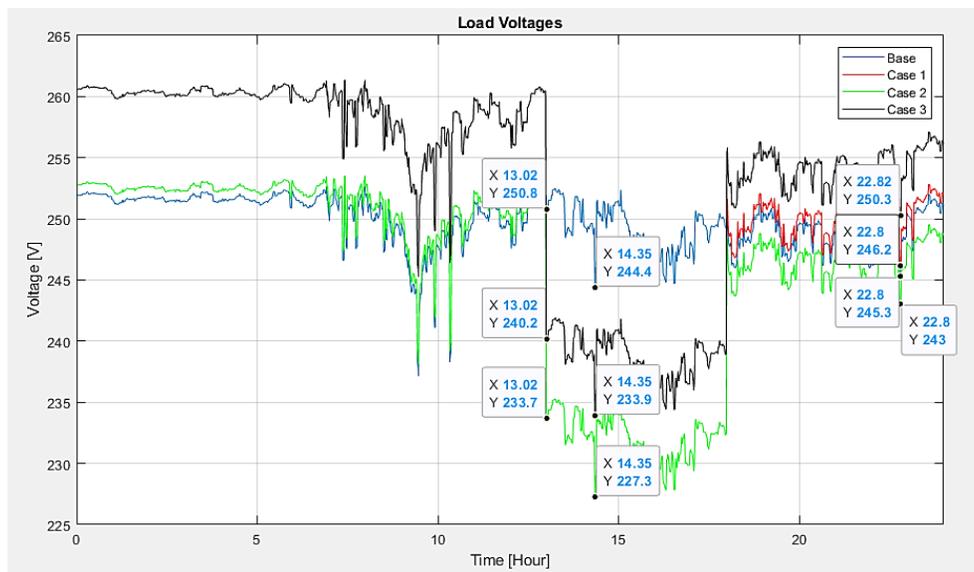


Figura 34. Tensión en bornes de clientes

Al analizar los tiempos específicos de carga y descarga, la Tabla 5 muestra que los periodos de carga se mantienen constantes en todos los escenarios. Sin embargo, el tiempo de descarga se reduce en el escenario 3, lo que sugiere un menor desgaste de la batería en los vehículos eléctricos. Además, presenta los resultados relacionados con la potencia de la subestación y el voltaje mínimo de la carga. Los datos indican claramente que en el escenario 3, la subestación consume menos energía para satisfacer las demandas del sistema y mejora el voltaje mínimo del sistema en comparación con el escenario de referencia.

Tabla 5. Carga y descarga de vehículos

Escenario	Tiempo de cargas [minutos]	Tiempo de descarga [minutos]	Potencia de subestación [kW]	Tensión mínima en la carga [V]
Base	-	-	51.45	244.4
1	300	288	115.8	227.3
2	300	361	115.8	227.3
3	300	119	91.19	233.9

Los experimentos se centraron en capturar los voltajes en los buses a lo largo de diversos tiempos de retraso, utilizando la plataforma de co-simulación empleada en este estudio. Dado que los tiempos de retraso varían entre diferentes fabricantes de vehículos eléctricos y niveles de comunicación [43], se realizó una simulación que incorporaba

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

distintos valores de retraso (ver Figura 35). Se observó que, con tiempos de retraso prolongados en la actualización del consumo de energía de los VE, los voltajes en los buses de los clientes tienden a aumentar, mientras que, con retrasos más prolongados, se registran voltajes más bajos.

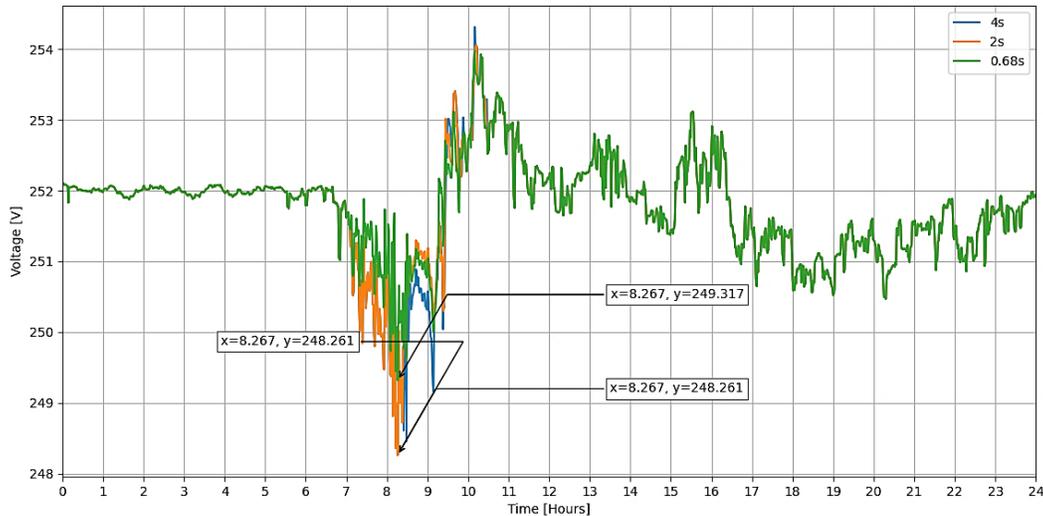


Figura 35. Tensión en bornes de clientes considerando diferentes tiempos de retardo

### Infraestructura de carga y ubicación de estaciones

Entre las ubicaciones propuestas para las estaciones de carga a lo largo de la carretera, se analizaron aquellas situadas a altitudes donde el estado de carga cae entre el 15% y el 30%. Se utilizó el mapa mostrado en la Figura 4 para identificar lugares que ofrecen una combinación de características de seguridad, actividades cercanas y opciones gastronómicas. Un candidato destacado es el restaurante El Mestizo, ubicado a una altitud de 3,383 metros. Este restaurante está aproximadamente a 68 km de Cuenca y a 84 km de La Troncal, ofreciendo un SOC ideal del 34%. La elección de esta ubicación también se basó en su idoneidad para construir la infraestructura necesaria para conectar la estación de carga, además de proporcionar instalaciones de descanso y turísticas para los usuarios y su proximidad a la red eléctrica, como se muestra en la Figura 36. Se decidió instalar una estación de carga rápida de corriente continua (DC) de 50 kW en este lugar. Este tipo de estación de carga ofrece varias ventajas, como tiempos de carga reducidos, menores costos de instalación y menor impacto en la red eléctrica.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



Figura 36. Estación de carga construida e instalada en Cuenca

La Tabla 6 muestra los resultados de los viajes analizados, destacando que en todos los casos se requiere de estaciones de carga intermedias. Cabe señalar que la única ruta que no necesita una estación de carga para el viaje de regreso es la ruta Cuenca-Cañar, debido a que Cañar se encuentra a una altitud mayor que Cuenca. Esta diferencia resalta la influencia que tienen los desniveles de altitud en los requisitos de infraestructura de carga para los vehículos eléctricos.

Tabla 6. Características de rutas analizadas

Route	SOC mínimo de ida	SOC mínimo de retorno	Número de estaciones intermedias	Altitud de las estaciones	Necesidad de la estación
Cuenca-La Troncal	60	3.8	1	3383	Retorno
Cuenca-Macas	2.4	8.2	2	2300,8	Ida y retorno
Cuenca-Santa Isabel	27.4	7.37	1	2500	Retorno
Cuenca-Loja	2.08	2.6	2	2600, 2300	Ida y retorno
Cuenca-Cañar	7.8	63.3	1	3000	Ida

Si consideráramos la autonomía promedio de los vehículos eléctricos en el país, no sería necesario instalar estaciones de carga en ninguna de las rutas analizadas. Sin embargo, al aplicar criterios de optimización, como se muestra en [53], donde los autores concluyen que la distancia óptima entre estaciones de carga es de 100 kilómetros (como se observa en la Tabla 7), se necesitarían 4 estaciones intermedias. No obstante, al incluir el factor de la altitud, el número de estaciones requeridas aumenta a 7. Este ajuste relacionado con la elevación tiene un impacto significativo en la inversión necesaria para

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

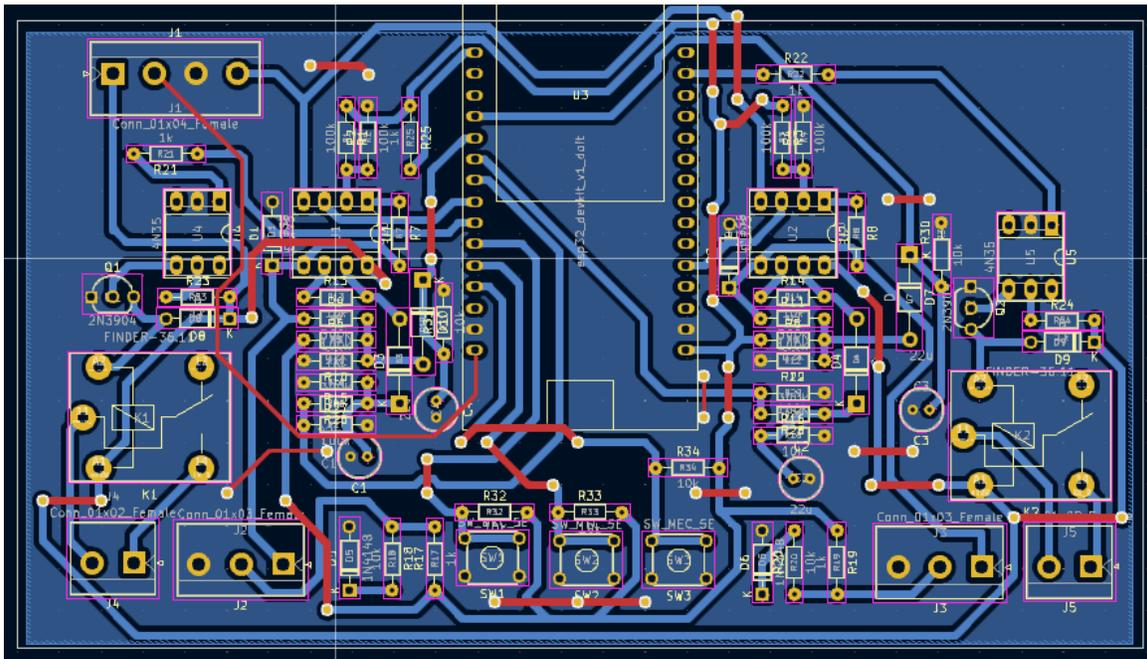
adquirir e instalar estas estaciones, subrayando la importancia de considerar factores topográficos en la planificación de la infraestructura de carga.

Tabla 7. Cantidad de estaciones usadas

Ciudad	Distancia [km]	Estaciones intermedias usando [53]	Estaciones intermedias considerando la elevación
La Troncal	156	1	1
Macas	217	2	2
Santa Isabel	85	0	1
Loja	204	1	2
Cañar	63	0	1

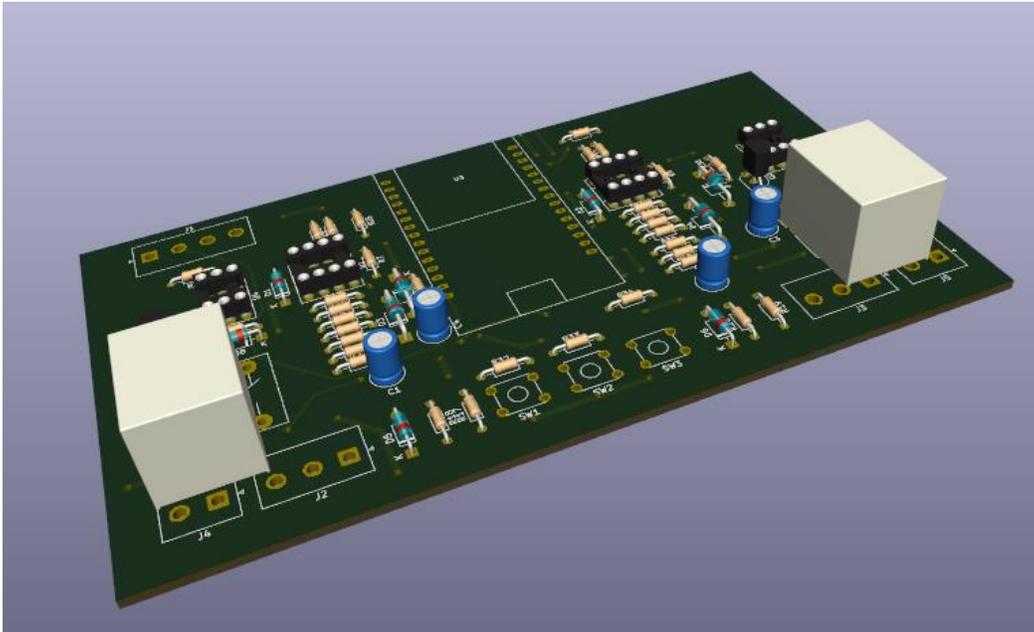
### Prototipo de medición

El prototipo de medición se elaboró en Kicad, software de código abierto. Se diseñó la placa de circuito impreso para un dispositivo de dos canales capaz de cargar dos vehículos simultáneamente (ver Figura 37).



(a)

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.



(b)

Figura 37. Diseño de prototipo (a) placa de circuito impreso (b) modelo en 3D

### Análisis de armónicos

Las mediciones de laboratorio de las armónicas de voltaje, tanto en magnitud como en ángulo, han arrojado los resultados que se muestran en la Tabla 8. Además, se incluyen valores obtenidos de estudios previos disponibles en la literatura que involucran otros modelos de vehículos eléctricos. La Tabla 8 presenta los resultados de las mediciones de laboratorio hasta la undécima armónica para los parámetros en magnitud y ángulo de fase del voltaje. En ella se muestran las armónicas generadas por un cargador de vehículo eléctrico (EV charger), un vehículo Nissan Leaf, un vehículo de la marca BYD con estación de carga de corriente alterna (BYD AC) y corriente continua (BYD DC), así como un vehículo de la marca Kia, también con estaciones de carga de corriente alterna (Kia AC) y corriente continua (Kia DC).

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Tabla 8. Magnitudes y ángulos de armónicos medidos en vehículos eléctricos

No.	Parámetro	Cargador	Nissan Leaf	BYD AC	Kia AC	BYD DC	Kia DC
1	Mag.	100	100	100	100	100	100
	Angulo	-55	-26	136	143	8.6	28.6
3	Mag.	9.20	25.00	9.91	6.31	2.40	6.22
	Angulo	120.00	-94.00	98.00	102.00	6.50	32.00
5	Mag.	62.20	17.00	8.47	1.15	1.73	14.55
	Angulo	255.00	-96.00	120.00	131.00	7.20	36.00
7	Mag.	41.80	14.20	8.11	0.83	2.14	5.61
	Angulo	-28.00	-72.00	146.00	153.00	6.80	31.00
9	Mag.	1.48	9.69	7.30	0.49	1.13	4.34
	Angulo	-3.00	-68.00	152.00	161.00	5.70	34.00
11	Mag.	7.08	5.04	6.92	0.64	2.45	5.06
	Angulo	-2.00	-49.00	168.00	182.00	5.60	35.00
<b>Eficiencia de carga</b>		-	-	92.90%	89.80%	94.60%	91.70%

Para evaluar el impacto de las armónicas, se realizó una simulación utilizando el modelo IEEE European Low Voltage Test Feeder. Se analizaron tres escenarios según la ubicación de la generación fotovoltaica: (1) 14 sistemas PV distribuidos con una capacidad de 5 kW cada uno y 14 estaciones de carga de vehículos eléctricos con una capacidad de 7.2 kW cada una, (2) un sistema PV central con una capacidad de 70 kW y 14 EVSEs de 7.2 kW cada una, como se ilustra en la Figura 38, y (3) PV y VE distribuidos en todas las cargas.

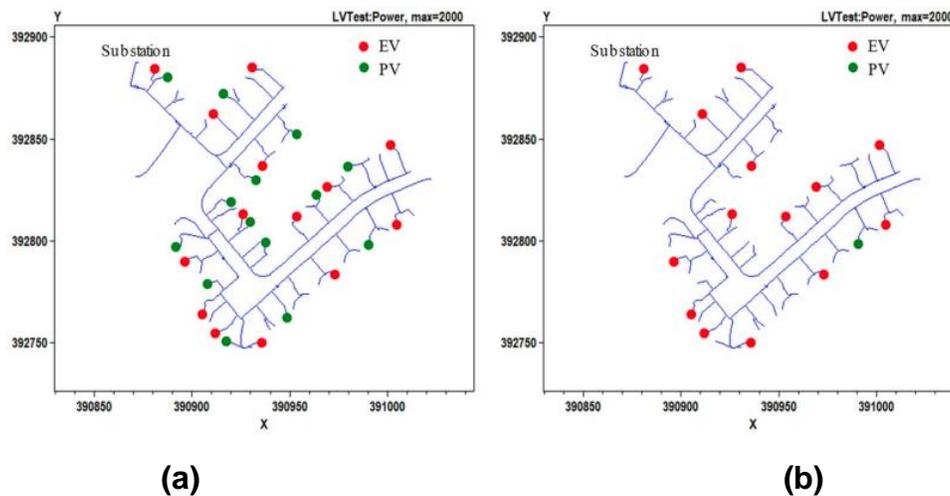


Figura 38. Casos de estudio analizados (a) Vehículos y fotovoltaicos distribuidos (b) vehículos distribuidos y un solo fotovoltaico

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

El espectro armónico de la Tabla 8 se asignó aleatoriamente a cada escenario, mientras que para los generadores PV se utilizó el espectro armónico de [54]. Se aplicó un perfil de irradiancia de cielo despejado a los sistemas PV. El estudio examinó los siguientes escenarios:

- El primer caso de prueba analiza únicamente las cargas residenciales en el sistema, sin VE ni PV (Caso 1).
- VEs conectados sin generación PV y sin efectos armónicos (Caso 2).
- VEs conectados con generación PV distribuida y sin efectos armónicos (Caso 3).
- VEs conectados con una única generación PV y sin efectos armónicos (Caso 4).
- VEs y generación PV distribuidos en las cargas sin efectos armónicos (Caso 5).
- VEs conectados sin generación PV distribuida y con efectos armónicos (Caso 6).
- VEs conectados con generación PV distribuida y con efectos armónicos (Caso 7).
- VEs conectados con una única generación PV y con efectos armónicos (Caso 8).
- VEs y generación PV distribuidos en las cargas con efectos armónicos (Caso 9).

El análisis se centró en observar el impacto en la respuesta de la subestación, la distorsión armónica total (THD) máxima, así como el voltaje y la corriente en los terminales de los clientes.

A través de un análisis exhaustivo de la respuesta del sistema ante armónicas inyectadas durante un periodo de 24 horas en cada caso, se realizaron observaciones significativas. Los resultados mostraron que la tercera armónica predominaba, lo cual coincide con las mediciones realizadas en entornos de laboratorio controlados. Los perfiles armónicos obtenidos para los casos 6 y 7 revelaron tendencias interesantes en las magnitudes de diversas armónicas. En el caso 6, se detectó un valor máximo del 2.5% para la tercera armónica, destacando su influencia en el sistema. En contraste, la séptima armónica presentó la magnitud más baja, con un valor mínimo de 0.3%. El caso 7 mostró un patrón similar, con la tercera armónica manteniéndose como la más significativa en términos de magnitud, mientras que la séptima continuó siendo la menos influyente.

El comportamiento en el caso 8 fue similar, sin embargo, los valores mínimos de las armónicas 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> (H3, H5 y H7) aumentaron hasta un 60% en comparación con los casos anteriores. Finalmente, el caso 9 mostró el comportamiento armónico más significativo, con la tercera armónica manteniendo su dominio y alcanzando picos de hasta 4.5% de magnitud. Además, el incremento en los valores mínimos fue sustancial,

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

llegando hasta un 300% en comparación con los otros casos (ver Figura 39a). El análisis del comportamiento del THD máximo en las cargas, como se muestra en la Figura 39b, reveló que los casos 6 y 7 exhiben niveles armónicos más altos en comparación con otros escenarios. Por otro lado, durante las conexiones de los VEs, el caso 9 mostró un valor de THD más bajo.

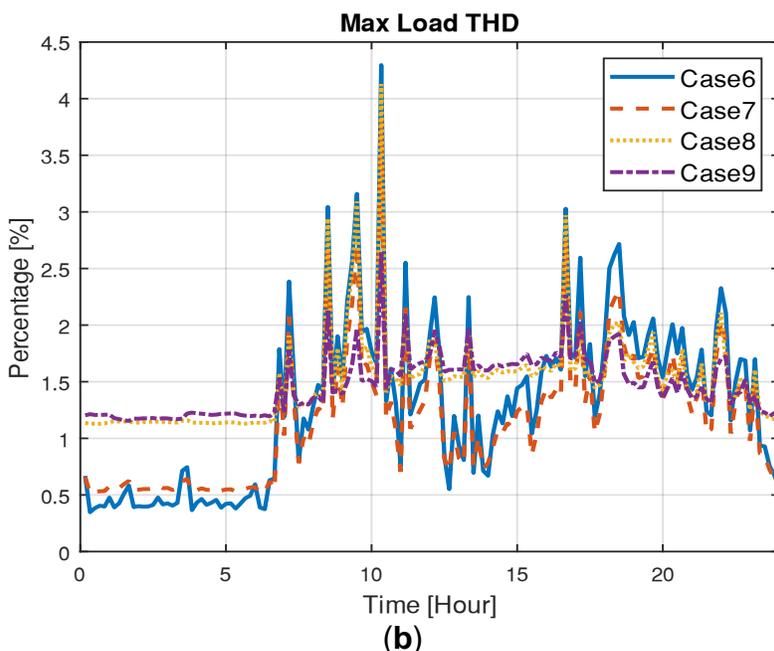
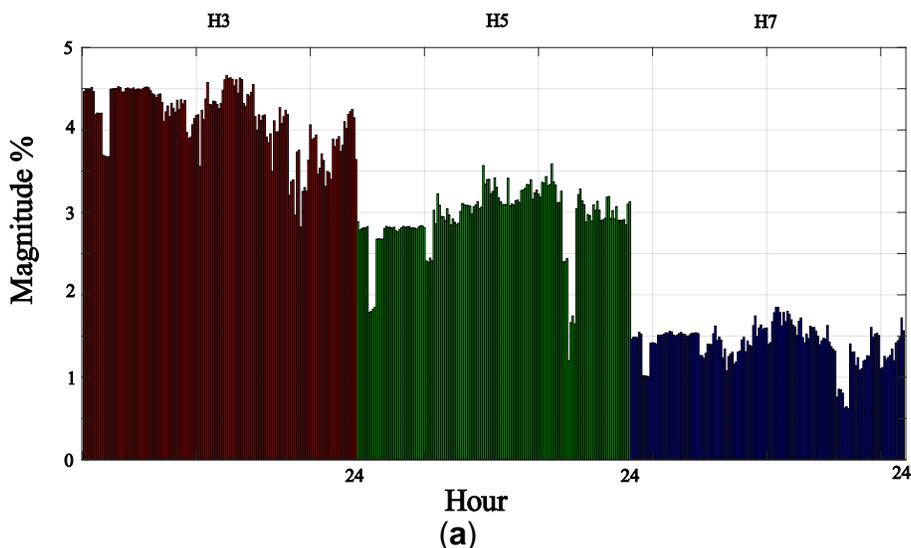


Figura 39. Comportamiento de armónicos (a) caso 9 (b) THD

En el marco de este estudio, se llevó a cabo un análisis de capacidad de alojamiento para evaluar la influencia de los valores armónicos registrados en las instalaciones de los clientes sobre la red de distribución eléctrica. El análisis se centró

en el caso 9, que abarca una distribución diversa de sistemas fotovoltaicos y vehículos eléctricos a lo largo de las cargas de la red. Al examinar este caso en particular, el estudio buscó analizar las posibles repercusiones de las armónicas en el rendimiento y la funcionalidad general de la red. Se estableció un caso base con 55 VEs, cada uno con una potencia nominal de 7.2 kW y un consumo promedio de energía de 50.4 kWh, y 55 sistemas PV, cada uno con una potencia nominal de 5 kW. Mediante simulaciones en MATLAB, se aumentó el número de VEs en el sistema en múltiplos de su potencia nominal, asegurando al mismo tiempo que el THD máximo y las distorsiones armónicas individuales se mantuvieran dentro de los límites establecidos por la norma IEEE 519-2022 (ver Tabla 9). Los resultados indican que, si bien el sistema puede soportar la conexión de hasta 104 VEs, la limitación impuesta por la tercera armónica restringe el número de vehículos conectables a 65. El análisis también consideró la función de probabilidad de conexión de vehículos en diferentes momentos.

*Tabla 9. Capacidad de alojamiento por armónico*

VEs conectados	max THD [%]	Máximo de armónica [%]				
		3 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	9 <sup>th</sup>	11 <sup>th</sup>
<b>55</b>	2.64	1.61	1.66	0.71	1.18	0.71
<b>65</b>	5.44	<b>4.73</b>	3.51	1.93	1.48	0.77
<b>104</b>	<b>8.08</b>	7.05	4.95	3.33	1.65	0.82

### Limitaciones del Estudio

A pesar de los avances alcanzados en la integración de energía fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes mediante el diseño de algoritmos y arquitecturas de control y comunicación que se plantean en esta tesis, este estudio presenta varias limitaciones que pueden influir en la generalización de los resultados. A continuación, se detallan los aspectos clave:

#### 1. Escenarios de Simulación versus Aplicación Real:

Muchos de los resultados se basan en simulaciones realizadas con software especializado (MATLAB, OpenDSS) y entornos controlados de laboratorio. Aunque estos entornos permiten el modelado de múltiples variables y condiciones, la simulación puede no capturar toda la complejidad y los desafíos que enfrentaría una implementación en un entorno de microrred a gran escala y en tiempo real. Por esto los resultados podrían variar entornos reales donde factores externos, como cambios en el clima o fluctuaciones inesperadas en la demanda, podrían introducir variaciones no previstas en las simulaciones.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## 2. Limitaciones en los Datos de Radiación Solar y Comportamiento del Recurso Fotovoltaico:

La investigación se basa en datos específicos de radiación solar recolectados en la ciudad de Cuenca, Ecuador, una región montañosa con variabilidad climática marcada. Si bien esto ofrece un contexto relevante para áreas similares, los patrones de radiación solar y variabilidad climática pueden diferir en otras regiones del mundo.

Los algoritmos de control diseñados podrían no ser tener el mismo impacto en áreas con menos variabilidad en la irradiancia solar o en regiones con condiciones meteorológicas extremas que no fueron contempladas en los modelos de simulación. Esto limita la posibilidad de generalizar los resultados a todas las regiones geográficas.

## 3. Retardos en la Comunicación y Control Descentralizado:

Los retardos de sistemas de comunicación se analizaron como un todo, y si bien se consideraron retardos conocidos de tecnologías comúnmente utilizadas, sin embargo, esto puede cambiar cuando se consideran retardos muy altos como los experimentados en Wi-SUN o demasiado cortos como en conexiones directas de fibra óptica. Por esto, el análisis puede no ser reproducible en condiciones extremas.

## 4. Dependencia en el Tipo de Vehículo Eléctrico y el Comportamiento del Usuario:

Los algoritmos de gestión de carga y los modelos de simulación asumen un comportamiento estandarizado de los vehículos eléctricos y un patrón de carga predecible. Sin embargo, en la práctica, el comportamiento de los usuarios y las variaciones en los tiempos de conexión y desconexión de los vehículos pueden diferir ampliamente.

Este estudio podría no contemplar las variaciones individuales en todos los patrones posibles de uso de los vehículos eléctricos, lo cual es especialmente relevante en sistemas de carga pública en los que el control centralizado puede resultar ineficaz. Esto puede limitar la aplicabilidad de los algoritmos en entornos donde el control sobre los horarios y patrones de carga es mínimo y donde la regulación existente no permite el control de las estaciones.

## **Implicaciones Prácticas y Desafíos de Implementación**

La investigación realizada ofrece múltiples aportes para la integración de energía solar fotovoltaica y vehículos eléctricos en microrredes, con aplicaciones que podrían

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

transformar la gestión energética en comunidades residenciales, áreas comerciales e industriales. A continuación, se exploran estas aplicaciones y los posibles desafíos de implementación en escenarios del mundo real:

### 1. Aplicación de Algoritmos de Control de Carga en Microrredes

En escenarios de microrred, o de redes que funcionan en isla, que cuenten con sistemas de generación fotovoltaica y estaciones de carga de VEs, los algoritmos de control de carga podrían optimizar el uso de la carga de los vehículos y de la energía en general. Sin embargo, la efectividad de los algoritmos depende de la coordinación y la homogeneidad en los patrones de uso de los vehículos eléctricos y del comportamiento de carga de los usuarios, con horarios de carga variables y patrones de uso no sincronizados, lo cual dificultaría la optimización de la carga sin una estrategia avanzada de control que se adapte dinámicamente al comportamiento del usuario.

### 2. Uso de Arquitecturas de Comunicación Descentralizadas

En instalaciones que buscan integrar energía solar y movilidad eléctrica para reducir costos y emisiones de carbono, una arquitectura de comunicación descentralizada podría facilitar la gestión autónoma de estaciones de carga y generación distribuida, ajustándose a la disponibilidad de energía y al estado de los vehículos.

La red de comunicación heterogénea utilizada en la tesis podría enfrentar retos por latencia y congestión. Además, se requeriría una infraestructura de comunicación confiable para evitar que los retardos afecten la estabilidad del sistema. En tales entornos, sería necesario asegurar redundancia en las comunicaciones y considerar alternativas de red de baja latencia (como 5G o Ethernet industrial).

### 3. Optimización de la Ubicación de Estaciones de Carga y sensores en Zonas de Alta Variabilidad Geográfica

En áreas montañosas o con alta variabilidad climática, como la región andina, el modelo de optimización de ubicación de estaciones de carga podría guiar a las empresas eléctricas en la planificación de la infraestructura de carga, considerando factores como altitud, radiación solar y patrones de tráfico.

En la práctica, este tipo de planificación enfrentaría retos significativos, como la necesidad de colaboración entre autoridades locales, empresas eléctricas y comunidades para determinar las ubicaciones óptimas. Además, la variabilidad en el clima y en los patrones de tráfico puede dificultar la previsión a largo plazo, exigiendo

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

una adaptación continua del sistema de carga según el crecimiento de la demanda y cambios en la tecnología de vehículos eléctricos.

## 1.7. Referencias

- [1] A. Muntaser, H. Ragb, y I. Elwrfalli, “DC Microgrid Based on Battery, Photovoltaic, and Fuel Cells; Design and Control”, núm. December, pp. 1–12, 2022, [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.20944/preprints202212.0527.v1>.
- [2] S. A. A. S. Bukhari, W.-P. Cao, T. A. Soomro, y D. Guanhao, “Future of Microgrids with Distributed Generation and Electric Vehicles”, en *Development and Integration of Microgrids*, InTech, 2017.
- [3] O. Ouramdane, E. Elbouchikhi, Y. Amirat, y E. Sedgh Gooya, “Optimal Sizing and Energy Management of Microgrids with Vehicle-to-Grid Technology: A Critical Review and Future Trends”, *Energies*, vol. 14, núm. 14, p. 4166, jul. 2021, doi: 10.3390/en14144166.
- [4] G. Badea *et al.*, “Design and Simulation of Romanian Solar Energy Charging Station for Electric Vehicles”, *Energies*, vol. 12, núm. 1, p. 74, dic. 2018, doi: 10.3390/en12010074.
- [5] I. de la Parra, J. Marcos, M. García, y L. Marroyo, “Dealing with the implementation of ramp-rate control strategies – Challenges and solutions to enable PV plants with energy storage systems to operate correctly”, *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 242–248, jul. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.04.054.
- [6] Y. S. Perdana, S. M. Muyeen, A. Al-Durra, H. K. Morales-Paredes, y M. G. Simoes, “Direct Connection of Supercapacitor–Battery Hybrid Storage System to the Grid-Tied Photovoltaic System”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, núm. 3, pp. 1370–1379, jul. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2868073.
- [7] S. Sukumar, H. Mokhlis, S. Mekhilef, M. Karimi, y S. Raza, “Ramp-rate control approach based on dynamic smoothing parameter to mitigate solar PV output fluctuations”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, pp. 296–305, mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.015.
- [8] D. Fregosi, N. Pilot, M. Bolen, y W. B. Hobbs, “An Analysis of Storage Requirements and Benefits of Short-Term Forecasting for PV Ramp Rate Mitigation”, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 13, núm. 2, pp. 315–324, mar. 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3231713.
- [9] X. Lu y J. Wang, “A Game Changer: Electrifying Remote Communities by Using Isolated Microgrids”, *IEEE Electrif. Mag.*, vol. 5, núm. 2, pp. 56–63, jun. 2017, doi: 10.1109/MELE.2017.2685958.
- [10] A. Mohammad, R. Zamora, y T. T. Lie, “Integration of Electric Vehicles in the Distribution Network: A Review of PV Based Electric Vehicle Modelling”, *Energies*, vol. 13, núm. 17, p. 4541, sep. 2020, doi: 10.3390/en13174541.
- [11] L. Caro, G. Ramos, D. Montenegro, y D. Celeita, “Variable Harmonic Distortion in Electric Vehicle Charging Stations”, en *2020 IEEE Industry Applications Society*

- Annual Meeting*, oct. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334798.
- [12] H. Jin, S. Lee, S. H. Nengroo, y D. Har, “Development of Charging/Discharging Scheduling Algorithm for Economical and Energy-Efficient Operation of Multi-EV Charging Station”, *Appl. Sci.*, vol. 12, núm. 9, p. 4786, may 2022, doi: 10.3390/app12094786.
- [13] F. K/bidi, C. Damour, D. Grondin, M. Hilairet, y M. Benne, “Power Management of a Hybrid Micro-Grid with Photovoltaic Production and Hydrogen Storage”, *Energies*, vol. 14, núm. 6, p. 1628, mar. 2021, doi: 10.3390/en14061628.
- [14] H. Jin, S. H. Nengroo, S. Lee, y D. Har, “Power Management of Microgrid Integrated with Electric Vehicles in Residential Parking Station”, en *2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, sep. 2021, pp. 65–70, doi: 10.1109/ICRERA52334.2021.9598765.
- [15] K. P. Inala, B. Sah, P. Kumar, y S. K. Bose, “Impact of V2G Communication on Grid Node Voltage at Charging Station in a Smart Grid Scenario”, *IEEE Syst. J.*, vol. 15, núm. 3, pp. 3749–3758, sep. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3007320.
- [16] M. E. Khodayar, M. R. Feizi, y A. Vafamehr, “Solar photovoltaic generation: Benefits and operation challenges in distribution networks”, *Electr. J.*, vol. 32, núm. 4, pp. 50–57, may 2019, doi: 10.1016/j.tej.2019.03.004.
- [17] T. Donato, F. Ingrosso, F. Licci, y D. Laforgia, “A method to estimate the environmental impact of an electric city car during six months of testing in an Italian city”, *J. Power Sources*, vol. 270, pp. 487–498, dic. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.124.
- [18] A. K. Verma, O. Elma, Y. Wang, H. R. Pota, R. Gadh, y M. Srivastava, “Smoothing PV Power Fluctuations with Electric Vehicle and its Grid Interaction”, en *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, ene. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070501.
- [19] E. Osaba *et al.*, “A Tutorial On the design, experimentation and application of metaheuristic algorithms to real-World optimization problems”, *Swarm Evol. Comput.*, vol. 64, p. 100888, jul. 2021, doi: 10.1016/J.SWEVO.2021.100888.
- [20] S. Sukumar, M. Marsadek, K. R. Agileswari, y H. Mokhlis, “Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review”, *J. Energy Storage*, vol. 20, pp. 218–229, dic. 2018, doi: 10.1016/J.EST.2018.09.013.
- [21] J. Martins, S. Spataru, D. Sera, D.-I. Stroe, y A. Lashab, “Comparative Study of Ramp-Rate Control Algorithms for PV with Energy Storage Systems”, *Energies*, vol. 12, núm. 7, p. 1342, abr. 2019, doi: 10.3390/en12071342.
- [22] J. L. Espinoza, L. G. Gonzalez, y R. Sempertegui, “Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador”, *2017 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2017*, vol. 2018-Janua, núm.

- Ropec, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/ROPEC.2017.8261615.
- [23] L. G. González, R. Chacon, B. Delgado, D. Benavides, y J. Espinoza, “Study of Energy Compensation Techniques in Photovoltaic Solar Systems with the Use of Supercapacitors in Low-Voltage Networks”, *Energies*, vol. 13, núm. 15, p. 3755, jul. 2020, doi: 10.3390/en13153755.
- [24] “TIDA-010071 SAE J1772-compliant electric vehicle service equipment reference design for level 1 and 2 EV charger | TI.com”. .
- [25] E. L. Maldonado Pineda, “Control de frecuencia mediante gestión de demanda durante el proceso de carga lenta en vehículos eléctricos”, 2020.
- [26] S. K. Musonda, M. Ndiaye, H. M. Libati, y A. M. Abu-Mahfouz, “Reliability of LoRaWAN Communications in Mining Environments: A Survey on Challenges and Design Requirements”, *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 13, núm. 1, 2024, doi: 10.3390/jsan13010016.
- [27] H. Klaina *et al.*, “Aggregator to Electric Vehicle LoRaWAN Based Communication Analysis in Vehicle-to-Grid Systems in Smart Cities”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 124688–124701, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007597.
- [28] J. Hu y A. Lanzon, “Distributed Finite-Time Consensus Control for Heterogeneous Battery Energy Storage Systems in Droop-Controlled Microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, núm. 5, pp. 4751–4761, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2868112.
- [29] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Paaso, S. Bahramirad, A. Alabdulwahab, y A. Abusorrah, “Distributed Control and Communication Strategies in Networked Microgrids”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, núm. 4, pp. 2586–2633, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3023963.
- [30] T. Chaloun *et al.*, “Electronically Steerable Antennas for Future Heterogeneous Communication Networks: Review and Perspectives”, *IEEE J. Microwaves*, vol. 2, núm. 4, pp. 545–581, oct. 2022, doi: 10.1109/JMW.2022.3202626.
- [31] E. D. Ayele, J. F. Gonzalez, y W. B. Teeuw, “Enhancing Cybersecurity in Distributed Microgrids: A Review of Communication Protocols and Standards”, *Sensors*, vol. 24, núm. 3, p. 854, ene. 2024, doi: 10.3390/s24030854.
- [32] M. J. Bordbari y F. Nasiri, “Networked Microgrids: A Review on Configuration, Operation, and Control Strategies”, *Energies*, vol. 17, núm. 3, p. 715, feb. 2024, doi: 10.3390/en17030715.
- [33] C. Liu, K. T. Chau, D. Wu, y S. Gao, “Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies”, *Proc. IEEE*, vol. 101, núm. 11, pp. 2409–2427, nov. 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2271951.
- [34] Y. Zhang, C. Dong, Q. Xiao, M. Wang, K. Hou, y H. Jia, “Discrete Spectrum Iteration Based Comprehensive Stability Assessment Method for the Delayed Cyber-Physical System with Electric-Vehicle Frequency Regulation”, *IEEE Access*, pp. 1–

- 1, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3011832.
- [35] M. Tao, K. Ota, y M. Dong, “Foud: Integrating Fog and Cloud for 5G-Enabled V2G Networks”, *IEEE Netw.*, vol. 31, núm. 2, pp. 8–13, 2017, doi: 10.1109/MNET.2017.1600213NM.
- [36] P. Makeen, H. A. Ghali, S. Memon, y F. Duan, “Insightful Electric Vehicle Utility Grid Aggregator Methodology Based on the G2V and V2G Technologies in Egypt”, *Sustainability*, vol. 15, núm. 2, p. 1283, 2023, doi: 10.3390/su15021283.
- [37] R. F. Arritt y R. C. Dugan, “Distribution system analysis and the future Smart Grid”, en *2011 Rural Electric Power Conference*, abr. 2011, pp. B2-1-B2-8, doi: 10.1109/REPCON.2011.5756725.
- [38] G. Valverde, A. Arguello, R. González, y J. Quirós-Tortós, “Integration of open source tools for studying large-scale distribution networks”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, núm. 12, pp. 3106–3114, ago. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1560.
- [39] R. Gonzalez, A. Arguello, G. Valverde, y J. Quiros-Tortos, “OpenDSS-based distribution network analyzer in open source GIS environment”, en *2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, sep. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/TDC-LA.2016.7805643.
- [40] C. Gaete-Morales, H. Kramer, W. Schill, y A. Zerrahn, “An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy”, *Sci. Data*, vol. 8, núm. 1, p. 152, dic. 2021, doi: 10.1038/s41597-021-00932-9.
- [41] T. S. Theodoro, P. G. Barbosa, M. A. Tomim, A. C. S. de Lima, y M. T. C. de Barros, “MatLab-OpenDSS co-simulation environment: An alternative tool to investigate DSG connection”, en *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, may 2018, pp. 1–7, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395643.
- [42] J. Quiros-Tortos, L. Ochoa, y T. Butler, “How Electric Vehicles and the Grid Work Together: Lessons Learned from One of the Largest Electric Vehicle Trials in the World”, *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 16, núm. 6, pp. 64–76, nov. 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2863060.
- [43] M. Dávila-Sacoto, L. G. González, J. L. Espinoza, y L. Hernandez-Callejo, “Benefits of the integration of photovoltaic solar energy and electric mobility”, en *III Ibero-American Conference on Smart Cities (ICSC-2020)*, 2020.
- [44] J. Khazaei, Z. Tu, y W. Liu, “Small-Signal Modeling and Analysis of Virtual Inertia-Based PV Systems”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, núm. 2, pp. 1129–1138, jun. 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2973102.
- [45] S. Hardman *et al.*, “A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure”, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 62, pp. 508–523, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.04.002.
- [46] E. Sortomme y M. A. El-Sharkawi, “Optimal combined bidding of vehicle-to-grid

- ancillary services”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, núm. 1, pp. 70–79, 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2170099.
- [47] Y. Zheng, Z. Shao, X. Lei, Y. Shi, y L. Jian, “The economic analysis of electric vehicle aggregators participating in energy and regulation markets considering battery degradation”, *J. Energy Storage*, vol. 45, núm. August 2021, p. 103770, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103770.
- [48] Y. (Marco) Nie y M. Ghamami, “A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure”, *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 57, pp. 172–190, nov. 2013, doi: 10.1016/j.trb.2013.08.010.
- [49] M. Ghamami, A. Zockaie, y Y. (Marco) Nie, “A general corridor model for designing plug-in electric vehicle charging infrastructure to support intercity travel”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 68, pp. 389–402, jul. 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.04.016.
- [50] Ilustre Municipalidad de Cuenca, “Plan de movilidad y Espacios de Cuenca 2015 - 2025”, *Ilus. Munic. Cuenca*, p. 118, 2015.
- [51] MathWorks, “EV Reference Application - MATLAB & Simulink”, 2022. <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ug/electric-vehicle-reference-application.html> (consultado oct. 04, 2022).
- [52] M. S. Zarbil y A. Vahedi, “Power Quality of Electric Vehicle Charging Stations and Optimal Placement in the Distribution Network”, *J. Oper. Autom. Power Eng.*, vol. 11, núm. 3, pp. 193–202, 2023, doi: 10.22098/joape.2023.9657.1672.
- [53] M. Reuter-Oppermann, S. Funke, P. Jochem, y F. Graf, “How many fast charging stations do we need along the German highway network?”, *EVS 2017 - 30th Int. Electr. Veh. Symp. Exhib.*, núm. October, 2017.
- [54] J. L. M. Pereira, A. F. R. Leal, G. O. de Almeida, y M. E. de L. Tostes, “Harmonic Effects Due to the High Penetration of Photovoltaic Generation into a Distribution System”, *Energies*, vol. 14, núm. 13, p. 4021, jul. 2021, doi: 10.3390/en14134021.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Capítulo II. Artículos Publicados

Este capítulo recopila los artículos científicos publicados como parte de la investigación, que incluyen estudios sobre los beneficios de la integración de energía fotovoltaica y movilidad eléctrica, el diseño de algoritmos de control de carga inteligente, y el análisis del impacto de los armónicos en redes eléctricas.

### 2.1. Charge Management of Electric Vehicles from Undesired Dynamics in Solar Photovoltaic Generation

Revista: Applied Sciences 2022, 12(12), 6246.

Índice de calidad: Journal Citation Report (JCR) 2022 - Impact Factor (IF):2,7(Q2)

Scimago Journal Rank (SJR)2022 - 0,492 (Q2)

DOI: <https://doi.org/10.3390/app12126246>

**Abstract:** Power generation from photovoltaic solar systems contributes to mitigate the problem of climate change. However, the intermittency of solar radiation affects power quality and causes instability in power grids connected to these systems. This paper evaluates the dynamic behavior of solar radiation in an Andean city, which presents rapid power variations that can reach an average of 7.20 kW/min and a variability coefficient of 32.09%. The study applies the ramp-rate control technique to reduce power fluctuations at the point of common coupling (PCC), with the incorporation of an energy storage system. Electric vehicle batteries were used as the storage system due to their high storage capacity and contribution to power system flexibility. The application of the control strategy shows that, with a minimum of five electric vehicle charging stations at the PCC, the rate of change of the photovoltaic can be reduced by 14%.

**Keywords:** Photovoltaic solar system; power fluctuations; electric vehicle batteries; ramp control

### 2.2. Harmonic Distortion and Hosting Capacity in Electrical Dis-tribution Systems with High Photovoltaic Penetration: The Impact of Electric Vehicles

Revista: Electronics 2023, 12(11), 2415.

Índice de Calidad: Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):2,6(Q2)

Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,644 (Q2)

DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12112415>

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

**Abstract:** Electric vehicles and the charging stations and their operation require a thorough examination to evaluate the effects on the electrical network. This becomes particularly challenging in the case of high photovoltaic penetration, due to the variability of the solar resource and vehicle connection patterns which cater individual user preferences. The current study investigates the impact of harmonics generated by charging stations and electric vehicles on different photovoltaic penetration scenarios within an electrical distribution system. DC and AC charging stations are analyzed. The findings reveal a 3rd harmonic magnitude increase exceeding 300% compared to other cases. Furthermore, the study demonstrates the effects of current and voltage variations on end-users and substation transformers. The impact of harmonics on the hosting capacity of the network is also analyzed, resulting in a 37.5% reduction in the number of vehicles.

**Keywords:** Electric Vehicle; Charging Stations, Photovoltaic Generation, Distribution System, Harmonics.

### **2.3. Location of electric vehicle charging stations in inter-Andean corridors considering road altitude and nearby infrastructure**

Revista: Sustainability 2023, 15(24),16582.

Índice de Calidad: Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):3.3(Q2)

Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,672 (Q2)

DOI: <https://doi.org/10.3390/su152416582>

**Abstract:** The placement of electric vehicle charging stations is typically accomplished using mathematical optimization methods or by calculating average distances. However, this design approach is not suitable for mountainous roads in the Andes Mountain range, given that steep gradients pose both advantages and disadvantages for electric vehicles. This study examines the placement of charging stations along five Andean corridors connecting the cities of La Troncal, Macas, Santa Isabel, Loja, and Cañar to the city of Cuenca. This document presents a novel methodology to design charging corridors considering parameters such as state of charge (SOC) per second, SOC per road altitude, among others. By applying this methodology, the study successfully selects appropriate charging station locations to serve both outbound and return journeys on roads with significant gradients. The current study represents an initial approach to analyzing the autonomy of electric vehicles on high-altitude roads, specifically considering the contribution of regenerative braking for the placement of charging stations.

**Keywords:** Electric Vehicle; Charging Corridor; High altitude charging

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## **2.4. Heterogeneous Communication Network Architecture for the Management of Electric Vehicle Charging Stations: Multi-Aggregator Management in Microgrids with High Photovoltaic Variability Based on Multiple Solar Radiation Sensors.**

Revista: Sensors 2024, 24(12), 3768.

Índice de Calidad: Journal Citation Report (JCR) 2023 - Impact Factor (IF):3.4(Q2)

Scimago Journal Rank (SJR)2023 - 0,786 (Q2)

DOI: <https://doi.org/10.3390/s24123768>

**Abstract:** Electric power systems with a high penetration of photovoltaic generation and electric vehicles face significant stability challenges, particularly in mountainous areas where the variability of photovoltaic resources is pronounced. This study presents a novel methodology for strategically placing electric vehicle aggregators along a power feeder. This approach considers electrical variables and the dynamics of cloud movements within the study area. This innovative methodology not only reduces the power load demand of the substation but also significantly improves voltage levels at user terminals. The improvements in voltage regulation and reduced demand on the substation provide clear benefits, including increased system resilience, better integration of renewable energy sources, and enhanced overall efficiency of the electric grid. These advantages are particularly critical in regions with high levels of photovoltaic generation and are important in promoting sustainable electric vehicle charging infrastructures. When analyzing different load scenarios for the IEEE European Low Voltage Test Feeder system, the consideration of distributed aggregators considering cloud movements decreased the power required of the substation by 21.25% and the voltage drop in the loads was reduced from 6.9% to 4.29%. This research underscores the critical need to consider both the variability and geographical distribution of PV resources in the planning and operating of electrical systems with extensive PV generation.

**Keywords:** Electric Vehicle Aggregator, Electric Vehicle, High Photovoltaic penetration grid.

## Capítulo III. Conclusiones y trabajo futuro

Se resumen los principales hallazgos de la investigación, confirmando la viabilidad y eficacia de los algoritmos y arquitecturas desarrolladas para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

### 3.1. Conclusiones

Los resultados de esta tesis doctoral han demostrado que la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes es viable y beneficiosa, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Las soluciones desarrolladas, incluyendo algoritmos de control, arquitecturas de comunicación y dispositivos de control de bajo costo, han mostrado mejorar significativamente la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Además, la colaboración internacional ha permitido enriquecer la investigación y promover la adopción de tecnologías sostenibles a nivel global. Estos hallazgos contribuyen al avance del conocimiento en el campo de las energías renovables y la movilidad eléctrica, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en este ámbito.

De la investigación se extraen las siguientes conclusiones principales

1. Algoritmos en microrredes con alta penetración fotovoltaica y vehículos eléctricos:
  - El estudio muestra el comportamiento típico de la radiación solar en una ciudad andina, caracterizado por una amplia variabilidad en cuestión de segundos. Esta alta variabilidad condiciona la capacidad de producción de energía del sistema solar fotovoltaico.
  - El promedio de las fluctuaciones máximas registradas en el mes de septiembre alcanzó el 48% de la potencia nominal por minuto. El sistema de gestión de energía utilizado en el estudio incluye la aplicación de una estrategia de control de la tasa de cambio (ramp-rate) y la incorporación del sistema de carga de un grupo de cinco vehículos eléctricos. El modelo desarrollado permite gestionar el proceso de carga siguiendo el comportamiento dinámico de la generación PV.
  - Dependiendo de la capacidad y las características de la radiación en el área de estudio, el sistema de almacenamiento puede aumentar o disminuir su potencia en un 99% sin saturarse. En el estudio, se logra reducir la tasa de cambio de la potencia en el punto de conexión común en aproximadamente un 14% gracias al uso de un sistema de almacenamiento de energía basado en las baterías de los vehículos eléctricos.

- La aplicación del algoritmo propuesto al caso IEEE muestra una mejora en la respuesta del voltaje en el bus del cliente y en la potencia del transformador principal del sistema.

## 2. Impacto de armónicos:

- Se examinaron dos escenarios distintos: uno con generación fotovoltaica distribuida y otro con generación centralizada. Los resultados indican que el escenario con una única fuente de generación fotovoltaica y vehículos eléctricos distribuidos en todo el sistema tuvo el peor rendimiento. Se observaron sobretensiones en los terminales de los usuarios cercanos y caídas de voltaje en los nodos más alejados del sistema. Al añadir el análisis armónico, se encontró que las caídas de voltaje mejoraron en este caso. Sin embargo, las sobretensiones persistieron en los terminales, y se observó que la distorsión armónica total era mayor en todos los nodos del sistema.
- Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar múltiples factores al evaluar el rendimiento de un sistema eléctrico con vehículos eléctricos y generación fotovoltaica distribuidos. El análisis tanto de la distorsión de voltaje como de las armónicas es crucial para identificar problemas potenciales y desarrollar estrategias para abordarlos.
- La investigación reveló que las armónicas provocaron variaciones considerables en el voltaje, la corriente y la potencia del transformador de la subestación, con la magnitud de la tercera armónica superando el 300% en comparación con otros casos. También se recopiló información sobre los valores de magnitud y ángulo de las armónicas en los EVs y las estaciones de carga, midiendo directamente en los terminales de las baterías, lo que permitió un análisis exhaustivo del sistema de conversión de energía tanto de la estación como del EV. Al revisar la capacidad de alojamiento del caso 9, considerando las armónicas, se observó que los altos valores de la tercera armónica reducen el número total de vehículos eléctricos que la red puede admitir en un 37.5% en comparación con una red sin PV y sin armónicas.

## 3. Arquitectura de comunicación:

- Se estudió el impacto de la variabilidad de los recursos fotovoltaicos y su distribución geográfica, lo que provoca retrasos en los picos o valles dentro de la curva de radiación, generando fluctuaciones de potencia y voltaje en sistemas eléctricos con alta penetración de generación PV. Para abordar este desafío, se propuso la adopción de múltiples agregadores de vehículos eléctricos que consideren las curvas de radiación solar en diferentes regiones del sistema. Este enfoque ajusta el momento en que los vehículos suministran

- o consumen energía, lo que permite reducir la demanda en las subestaciones y mejorar la respuesta de voltaje del sistema.
- Esta investigación destaca la necesidad crítica de tener en cuenta tanto la variabilidad como la distribución geográfica de los recursos PV al planificar y operar sistemas eléctricos con una amplia generación fotovoltaica. El uso estratégico de múltiples agregadores de vehículos surge como una solución clave, ofreciendo beneficios significativos en la gestión de estos sistemas, mejorando su funcionalidad y estabilidad general.
  - Se consideró el efecto de los retrasos en las telecomunicaciones causados por la heterogeneidad de la red, observando que diferentes retrasos totales resultan en distintos valores de voltaje en los terminales de los usuarios. Por lo tanto, este efecto debe tenerse en cuenta al colocar sensores de radiación y equipos de telecomunicaciones, si se busca que los servicios auxiliares de los vehículos eléctricos ayuden a reducir las variaciones de voltaje en redes con alta penetración de PV.
  - La escalabilidad del enfoque utilizado en este estudio es un aspecto clave que debe abordarse para su implementación práctica en aplicaciones del mundo real. Por ejemplo, la plataforma de simulación, que integra Python y OpenDSS, está diseñada para manejar cálculos complejos de manera eficiente. Su arquitectura modular permite escalar el número de vehículos sin degradar significativamente el rendimiento. Al optimizar el manejo de datos y tareas computacionales, la plataforma puede simular sistemas más grandes con cientos de EV, manteniendo la precisión.
  - La escalabilidad de la red de comunicación también es crucial al aumentar el número de EV. Tecnologías como LoRaWAN, NB-IoT y 5G ofrecen alta escalabilidad gracias a su amplia cobertura y capacidad de manejo de grandes cantidades de datos. Estas tecnologías pueden gestionar eficientemente el tráfico de datos generado por numerosos vehículos eléctricos y sensores PV en grandes despliegues. El enfoque de múltiples agregadores es inherentemente escalable, ya que cada agregador puede gestionar un subconjunto de vehículos, distribuyendo la carga computacional y de comunicación. Este manejo descentralizado asegura que el sistema se mantenga receptivo y resistente incluso al aumentar el número de vehículos conectados. Los agregadores pueden coordinarse a través de modelos de comunicación jerárquica o entre pares para optimizar el rendimiento general del sistema.

La investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral ha dado lugar a una serie de contribuciones significativas en el campo de la integración de la energía solar fotovoltaica y la movilidad eléctrica en microrredes. Estas contribuciones están estrechamente alineadas con los objetivos específicos establecidos al inicio del proyecto.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

A continuación, se detallan las principales contribuciones, relacionándolas con los objetivos específicos:

### 1. Desarrollo de Algoritmos de Control de Carga para VEs para mitigar las fluctuaciones fotovoltaicas

Una de las contribuciones de esta tesis es el desarrollo y validación de un algoritmo de tasa de rampa para el control de carga para vehículos eléctricos. Este algoritmo optimiza el proceso de carga y descarga en función de las variaciones en la generación de energía solar y las condiciones de la red.

Además de optimizar la carga de los VE, el algoritmo incluye una estrategia de gestión de la carga que utilizan las baterías de los VE para mitigar las fluctuaciones de la generación fotovoltaica. La aplicación de técnicas de control de la tasa de cambio ha demostrado ser eficaz para reducir las variaciones de potencia, mejorando la estabilidad y fiabilidad de la red.

La implementación de algoritmos de control de tasa de cambio y técnicas de filtrado han demostrado su efectividad en la gestión de fluctuaciones de potencia debido a la intermitencia solar. Estos algoritmos permiten la sincronización de la carga de vehículos eléctricos con la generación fotovoltaica, mitigando los efectos de las variaciones de irradiancia y manteniendo la estabilidad del sistema.

Este trabajo es importante en el desarrollo y validación de algoritmos de control de carga que no solo optimizan la carga en función de la disponibilidad de energía solar, sino que también ajustan la tasa de carga para minimizar los impactos en la red de distribución. La combinación de técnicas de control y simulación en entornos de alta penetración fotovoltaica ofrece un enfoque innovador que puede aplicarse en microrredes urbanas y rurales con características similares.

### 2. Desarrollo de arquitectura de comunicación descentralizada

Otra contribución clave es el planteamiento de una arquitectura de comunicación descentralizada, que considera tanto los sensores fotovoltaicos como los retardos de hardware para facilitar la interacción eficiente entre la microrred y los vehículos eléctricos. Estas arquitecturas permiten gestionar la energía en tiempo real, mejorando la fiabilidad y la respuesta del sistema a las variaciones en la demanda y el suministro de energía. La investigación ha demostrado que la integración adecuada de esta arquitectura puede reducir significativamente las fluctuaciones de potencia y mejorar la eficiencia operativa de las microrredes.

La investigación ha mostrado que una red de comunicación heterogénea, que integra varias tecnologías, puede proporcionar una plataforma robusta para la gestión

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

descentralizada de la carga de vehículos eléctricos. Esta arquitectura de comunicación permite responder de manera eficiente a las variaciones en las condiciones de red y la disponibilidad de recursos renovables.

La tesis contribuye al conocimiento en el área de redes inteligentes al proponer un sistema de comunicación descentralizado que supera las limitaciones de las redes centralizadas tradicionales. Este enfoque distribuye las decisiones de control, reduciendo la vulnerabilidad a fallos en el sistema central y mejorando la capacidad de respuesta de la red ante variaciones súbitas en la generación solar.

### 3. Análisis del impacto de los armónicos

El análisis detallado del impacto de los armónicos en una microrred de alta penetración fotovoltaica y de vehículos eléctricos ha revelado que la magnitud del tercer armónico puede aumentar en más de un 300%, reduciendo la capacidad de acogida de la red en un 37,5%. Esta contribución es esencial para comprender y mitigar los efectos negativos de los armónicos en la calidad de la energía.

El estudio de los armónicos generados por estaciones de carga de vehículos eléctricos en redes con alta penetración fotovoltaica reveló que la presencia de VEs aumenta la distorsión armónica total, especialmente en condiciones de alta generación fotovoltaica. Esto subraya la necesidad de diseñar estrategias de mitigación de armónicos en futuras implementaciones de microrredes.

Esta tesis proporciona una evaluación integral de los efectos de los armónicos en redes con VEs y alta penetración solar, lo cual es una contribución novedosa dado que la literatura actual se ha centrado principalmente en redes tradicionales sin penetración significativa de VEs. Los resultados de este análisis son esenciales para el diseño de estándares de calidad de energía en microrredes que combinen movilidad eléctrica y generación renovable.

### 4. Metodología para la Ubicación Óptima de Estaciones de Carga en Regiones con Alta Variabilidad Geográfica

La investigación desarrolló una metodología basada en análisis de factores topográficos, climáticos y de infraestructura para optimizar la ubicación de estaciones de carga en zonas montañosas. Este enfoque asegura que las estaciones de carga se ubiquen en áreas estratégicas que maximizan la eficiencia y accesibilidad para los usuarios.

La propuesta de una metodología para la ubicación de estaciones de carga en áreas montañosas representa una contribución innovadora, ya que aborda las particularidades geográficas y climáticas de regiones como la región andina. Este

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

método, aplicable a otras zonas con variabilidad topográfica, proporciona una guía práctica para implementar infraestructura de carga en territorios complejos.

#### 5. Avance en la Aplicación de Co-simulación para Evaluar el Impacto de Retardos de Comunicación y Control en Microrredes

La co-simulación utilizando Python y OpenDSS permitió modelar con precisión los efectos de los retardos de comunicación y control en el desempeño de la red, demostrando que incluso pequeñas demoras pueden afectar la estabilidad de la red en sistemas con alta variabilidad de recursos renovables.

El uso de co-simulación para evaluar retardos en sistemas de control en microrredes con alta penetración fotovoltaica y VEs representa un aporte técnico que permite analizar de forma detallada las interacciones entre los sistemas eléctricos y de comunicación. Esta herramienta de co-simulación ofrece una nueva vía para estudiar las microrredes de próxima generación, donde las decisiones de control deben responder rápidamente a condiciones cambiantes de la red.

### 3.2. Trabajos Futuros

Se proponen líneas de investigación futura, como la ampliación del estudio a otras fuentes de energía renovable, el desarrollo de algoritmos que consideren la previsión meteorológica, y la evaluación del impacto de nuevas tecnologías de comunicación.

- Los resultados de esta tesis tienen el potencial de impactar significativamente en el campo de las energías renovables y la movilidad eléctrica, proporcionando soluciones prácticas y eficientes para mejorar la estabilidad y eficiencia de las redes eléctricas. Este trabajo contribuye al avance científico y tecnológico, fomentando la adopción de tecnologías sostenibles que promuevan un futuro energético más limpio y eficiente.
- Es necesario realizar más investigaciones para explorar la interacción entre los vehículos eléctricos, la generación fotovoltaica y otros componentes de la red eléctrica, como los sistemas de almacenamiento de energía, y desarrollar enfoques más integrales para evaluar el rendimiento de estos sistemas.
- Es necesario ampliar el análisis armónico considerando una mayor variedad de marcas de vehículos eléctricos y examinar también el efecto de la eficiencia de las estaciones de carga. Además, se requiere un análisis que involucre una mayor variedad de tipos de carga para verificar su interacción con los EVs, como bombas de calor, motores y generadores térmicos, entre otros.

- De cara al futuro, es esencial recopilar más datos de diferentes estaciones meteorológicas sincronizadas por GPS para extender esta observación a otras áreas urbanas. Además, es fundamental desarrollar estrategias de ubicación de estaciones basadas en los retrasos observados y realizar simulaciones más amplias dentro del sistema eléctrico. Determinar el número óptimo de agregadores de EV necesarios para mejorar la respuesta del sistema es otro paso crucial. Igualmente, será vital realizar un análisis de capacidad de alojamiento para vincular la integración de EVs, la generación PV y la cantidad de agregadores que supervisan el sistema. Este examen ayudará a identificar la configuración más efectiva para controlar los recursos EV y PV dentro de la red eléctrica.
- Para su implementación práctica, la metodología debe considerar factores como la infraestructura de la red, las redes de comunicación existentes y la densidad de vehículos. Proyectos piloto y despliegues por fases pueden ayudar a ajustar el sistema para implementaciones a mayor escala. La monitorización continua y las estrategias de gestión adaptativa son esenciales para manejar la naturaleza dinámica de grandes flotas de vehículos eléctricos.
- Las conclusiones de esta tesis presentan soluciones prácticas y escalables para la integración de energía fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes. Las contribuciones originales del estudio abren nuevas oportunidades de investigación en el diseño de algoritmos de control avanzados, el desarrollo de arquitecturas de comunicación robustas y la mitigación de efectos de armónicos en sistemas con recursos distribuidos. Las futuras investigaciones pueden ampliar estos enfoques hacia la validación en entornos reales, la mejora de los sistemas de comunicación para reducir los tiempos de latencia y la adaptación de los modelos de control a diferentes tipos de vehículos y sistemas de almacenamiento energético.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

## Anexo A

### Publicaciones adicionales

Este anexo incluye otras publicaciones en las cuales el autor de la tesis contribuyó o que se presentaron en revistas de menor impacto o congresos.

Artículo adicional 1: Publicado el 27 de mayo del 2021

Tipo de artículo	Artículo de investigación
Título	A Review of I–V Tracers for Photovoltaic Modules: Topologies and Challenges
Autores	José Ignacio Morales-Aragonés, Miguel Dávila-Sacoto, Luis G. González, Víctor Alonso-Gómez, Sara Gallardo-Saavedra and Luis Hernández-Callejo
Revista	Electronics 2021, 10(11), 1283.
Edición Especial	Operation and Control of Power Systems
Categoría	Engineering, Electrical and Electronic Engineering (280/708) Q2
Índice de calidad	Journal Citation Report (JCR) 2021 - Impact Factor (IF):2.69(Q2) Scimago Journal Rank (SJR)2021 - 0,628 (Q2)
DOI	<a href="https://doi.org/10.3390/electronics10111283">https://doi.org/10.3390/electronics10111283</a>

### Abstract

Current–voltage (I–V) curve tracers are used for measuring voltage and current in photovoltaic (PV) modules. I–V curves allow identifying certain faults in the photovoltaic module, as well as quantifying the power performance of the device. I–V curve tracers are present in different topologies and configurations, by means of rheostats, capacitive loads, electronic loads, transistors, or by means of DC–DC converters. This article focuses on presenting all these configurations. The paper shows the electrical parameters to which the electronic elements of the equipment are exposed using LTSpice, facilitating the appropriate topology selection. Additionally, a comparison has been included between the different I–V tracers' topologies, analyzing their advantages and disadvantages, considering different factors such as their flexibility, modularity, cost, precision, speed or rating, as well as the characteristics of the different DC–DC converters.

Keywords: I–V tracer; variable resistor tracer; capacitive charge tracer; electronic load tracer; bipolar power amplifier tracer; four-quadrant power source tracer; DC–DC converter plotter

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Artículo adicional 2: Publicado en noviembre del 2020

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Benefits of the integration of photovoltaic solar energy and electric mobility
Autores	Miguel Dávila-Sacoto, L.G. González, J.L. Espinoza, and Luis Hernández-Callejo
Conferencia	III Ibero-American Conference on Smart Cities (ICSC-2020)

Abstract. The integration of electric vehicles to electricity grids is the key to the adoption of renewable energy. This study reviews the main benefits and challenges of integrating these technologies, considering the high variation of the photovoltaic resource. The use of an intelligent charging of electric vehicles based on the variation of solar radiation is shown to mitigate the voltage and power variations caused. A simulation of a feeder is performed to verify the benefit of an intelligent charging scheme, achieving an 8% decrease in the required power. In addition, a review of related studies is presented, and the types of communication systems used for the control of vehicle charging in an electrical grid are compared.

Keywords: Electric vehicle, photovoltaic generation, vehicle-grid integration

Artículo adicional 3: Publicado en noviembre del 2021

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Charging control of electric vehicles in microgrids with high penetration of photovoltaic generation: an integrated simulation method with Python and OpenDSS
Autores	Miguel Davila, Oscar Duque Perez, Luis Hernández Callejo, Luis Gonzalez, Angel Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	IV Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2021)

Abstract. The simulation of microgrids with high penetration of electric vehicles and photovoltaic solar energy is a complex task that must consider realistic parameters of the agents that intervene in the generation of energy and in the control of the loads of the distribution system. In this study, an integrated simulation method with Python and OpenDSS is implemented for its application in microgrids with high penetration of photovoltaic generation and charging control of electric vehicles. For this, a simulation package is designed that incorporates parameters such as penetration of electric vehicles and photovoltaic systems, communication delay times between the system aggregator and charging stations, and connection event probability curves. The simulation system

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

shows the effect of communication delay times and charging setpoint changes on the voltages of the connection bars of the clients, showing that due to high delay times in the communication between the vehicle and the aggregator there is a considerable impact on the load bars voltages.

Keywords: Microgrids, Electric Vehicle, high photovoltaic penetration, OpenDSS.

Artículo adicional 4: Publicado en noviembre del 2021

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Charge management of electric vehicles from undesired dynamics in solar photovoltaic generation
Autores	Ivania Aguirre, Miguel Davila, Luis Gonzalez, Luis Hernández Callejo and Juan Espinoza
Conferencia	IV Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2021)

Abstract. The power generation from photovoltaic solar systems contributes to mitigating the climate change issue. However, the intermittent nature of solar radiation affects the energy quality and causes instability in electrical networks connected to these systems. This paper assesses the dynamic behavior of solar radiation in an Andean city, which presents rapid power variations that can reach an average of 7.20 kW/min and a variability coefficient of 32.09%. The study applies the ramp-rate control technique to reduce the power fluctuations at the point of common coupling (PCC), with the incorporation of an energy storage system. The batteries of the electric vehicles were used as the storage system due to their high storage capacity and their contribution to power system flexibility.

The application of the control strategy shows that with a minimum of five electric vehicles charging stations at PCC, the rate of change of the photovoltaic can be reduced by 14%.

Keywords: Photovoltaic solar system; power fluctuations; electric vehicle batteries; ramp-control.

Artículo adicional 5: Publicado en noviembre del 2022

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Development of Electric Vehicles Charging Corridors for Steep Elevation Highways. Case study: Cuenca-Ecuador
Autores	Miguel Davila, Marco Toledo, Luis Hernández Callejo, Luis Gonzalez and Carlos Alvarez
Conferencia	V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Abstract. This research aims to study mobility behavior patterns, location of charging stations, autonomy, distances, and topology, to build the first electric corridor in topologically irregular intermediate cities. The city's mobility plan, battery discharge simulations, altitude monitoring through GPS, and surveys are used to estimate the use and levels of acceptance of this technology. The methodology for locating electric vehicle charging stations in mountainous terrain is studied.

Keywords: Electric Vehicle, Elevation effects, Electric Vehicle Autonomy, Electric Vehicle charging, Electric Vehicle charging corridor.

Artículo adicional 6: Publicado en noviembre del 2022

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Harmonic impact of Electric vehicles in Electrical Distribution Systems with high photovoltaic penetration
Autores	Miguel Davila, Luis González, Luis Hernández Callejo, Oscar Duque-Perez, Ángel L Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)

Abstract. The integration of electric vehicles and the charging stations associated with their operation requires an exhaustive analysis of the impacts on the electrical network. In the case of grids with high photovoltaic penetration, the scenario is complicated due to the effects of the variation of the solar resource and the connection times of the vehicles that respond to the preferences of the users. In the present study, an analysis of the impact of harmonics generated by electric vehicle charging stations in different scenarios of photovoltaic penetration in a electrical distribution system is carried out by obtaining the harmonics in direct current and alternating current charging stations with different brands of electric vehicles. Results of magnitudes of 5<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> harmonics higher than 30% are obtained and the effect of the variation of current and voltage in the final users and in the substation transformer is shown.

Keywords: Electric Vehicle, Photovoltaic generation, Microgrid, Distribution System, Harmonics.

Diseño, validación e implementación de algoritmos y arquitecturas de comunicación y control para la integración de energía solar fotovoltaica y movilidad eléctrica en microrredes.

Artículo adicional 7: Publicado en noviembre del 2023

Tipo de artículo	Memorias de congreso
Título	Benefits of multiple Electric vehicle aggregators in mountainous areas with high variability of photovoltaic resources
Autores	Miguel Davila, Luis González, Luis Hernández Callejo, Oscar Duque-Pérez, Ángel L Zorita Lamadrid and Juan Espinoza
Conferencia	VI Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2023)

Abstract. Electric systems with a high penetration of photovoltaic generation

and electric vehicles pose significant challenges to their stability. When we add to this the high variability of the photovoltaic resource in mountainous areas, the problem requires a more thorough analysis. In this study, the placement of different electric vehicle aggregators along a feeder is proposed, taking into account electrical variables and cloud movement dynamics in the study area. It is demonstrated that this methodology reduces the power delivered by the substation and improves voltage levels at user terminals.

Keywords: Electric Vehicle Aggregator, Electric Vehicle, High Photovoltaic penetration grid.