

Impacto de la carga lenta de vehículos eléctricos en la calidad de energía de la red de distribución: Una prospección literaria

Impact of slow charging of electric vehicles on energy quality in the distribution network: a literature prospection

Paúl Morejón-Monteros¹, Daniel Banegas-Arias¹ y Danny Ochoa-Correa^{2,*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; paul.morejonm@ucuenca.edu.ec, daniels.banegas@ucuenca.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

* Autor para correspondencia: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 17/04/2024 Fecha de aceptación del manuscrito: 31/05/2024 Fecha de publicación: 30/06/2024

Resumen—La introducción de vehículos eléctricos (VE) se destaca como una estrategia fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar en la descarbonización del transporte. No obstante, este cambio plantea desafíos considerables en las redes eléctricas. La adopción generalizada de VE puede generar fluctuaciones en la demanda, picos de carga y afectar la estabilidad de la red eléctrica y la calidad de la energía. En respuesta a estos desafíos, este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura utilizando el método PRISMA para evaluar los impactos de la carga lenta de VE en la calidad de la energía de las redes de distribución. Los resultados destacan la tecnología de vehicle-to-grid (V2G) como una solución eficaz al permitir que los VE funcionen como fuentes de generación distribuida. Se mencionan enfoques como algoritmos de distribución de carga, estrategias de carga inteligente y modelos de optimización. A pesar de estos avances, se subraya la limitación de datos reales y estudios locales en América Latina, evidenciándose la necesidad de investigaciones contextualizadas en la región para abordar adecuadamente los desafíos específicos de la integración de VE en las redes eléctricas en un contexto local.

Palabras clave—Calidad de energía, Carga lenta de VE, Redes de distribución, V2G, Vehículos eléctricos.

Abstract—Introducing electric vehicles (EV) is a key strategy for reducing greenhouse gas emissions and advancing transportation decarbonization. However, this transition poses significant challenges in electrical grids. The widespread adoption of EV can lead to demand fluctuations, load peaks, and affect grid stability and power quality. In response to these challenges, this article presents a systematic literature review using the PRISMA method to assess the impacts of slow charging of EV on the power quality of distribution networks. The results highlight vehicle-to-grid (V2G) technology as a practical solution that allows EV to function as distributed generation sources. Approaches like load distribution algorithms, smart charging strategies, and optimization models are mentioned. Despite these advancements, the limitation of actual data and local studies in Latin America is emphasized, underscoring the need for context-specific research in the region to adequately address the specific challenges of integrating EVs into local electrical grids.

Keywords— Power quality, EV slow charging, Distribution networks, V2G, Electrical vehicles.

INTRODUCCIÓN

Historicamente, el aprovechamiento de los combustibles de origen fósil para cubrir las necesidades humanas ha sido el pilar fundamental que ha impulsado el crecimiento económico, la expansión urbana y el progreso tecnológico. Sin embargo, esta dependencia ha tenido serias consecuencias para el medio ambiente, la salud pública y la estabilidad climática del planeta, pues la quema intensa de estos combustibles ha liberado cantidades masivas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, exacerbando el cambio climático y sus impactos asociados (Ka-

runathilake y Witharana, 2023).

El sector del transporte es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de GEI, representando aproximadamente el 20% del dióxido de carbono (CO_2) emitido a nivel global, y siendo el transporte terrestre la principal fuente de estas emisiones (Albuquerque *et al.*, 2020). Especialmente en áreas urbanas, donde la congestión del tráfico implica velocidades reducidas y una frecuente detención y arranque, los automóviles convencionales contribuyen significativamente a la contaminación, incluso si los vehículos modernos están equipados con motores de baja emisión de contaminantes (Golovanov y Marinescu, 2019).

En Gómez-Ramírez *et al.* (2023) se menciona que el transporte por carretera ha sido catalogado como el principal emisor de GEI. Por este motivo, se han optado por la implementación de vehículos eléctricos (VE) en reemplazo a los vehículos convencionales. Esta decisión se debe a dos razones principales: preocupaciones ambientales e iniciativas gubernamentales. Los vehículos eléctricos son apreciados por ser amigables con el medio ambiente, lo cual conlleva a bajas emisiones de gases, independencia de combustible y disminución de la contaminación acústica.

En varias zonas del mundo se han propuesto diversas soluciones para la reducción de GEI. Investigadores en Mudaheeranwa *et al.* (2023) mencionan que la tercera Declaración de Comunicación Nacional al Plan de Acción de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el Ministerio de Medio Ambiente de Ruanda presentó varias soluciones, entre las cuales se destaca la implementación de VE y sistemas eficientes basados en combustibles fósiles.

En Ecuador, la electromovilidad se presenta como una alternativa ambientalmente amigable para el transporte, destacada por iniciativas lideradas por instituciones como la Universidad de Cuenca a través de proyectos emblemáticos como "Mover-U" (UCUENCA, 2023). La implementación de políticas conducentes a la adopción de la electromovilidad ha sido promovida en distintos contextos alrededor del mundo, reflejando una tendencia global hacia la reducción de la huella de carbono y la mejora de la calidad de vida. Por ejemplo, en Bogotá, Colombia, se ha implementado el sistema de autobuses eléctricos TransMilenio (TransMilenio, 2013), mientras que, en Santiago, Chile, se ha expandido la flota de taxis eléctricos y se ha desarrollado una amplia red de estaciones de carga, además de la utilización de trenes eléctricos en el metro (González, 2023). En Montevideo, Uruguay, se promueve la movilidad sostenible mediante el sistema de bicicletas eléctricas compartidas "Movete en Bici" (*Programa Movete en Bici*, s.f.). Por su parte, Shenzhen, China, ha convertido toda su flota de autobuses a eléctricos y fomenta el uso de VE entre sus ciudadanos. Ámsterdam, en los Países Bajos, invierte significativamente en infraestructura de carga y alienta el uso de bicicletas y scooters eléctricos (Pérez *et al.*, 2019).

Es por ello que, en los últimos años, la demanda de los VE en el mundo ha ido en aumento. En 2012, se vendieron cerca de 120,000 VE a nivel mundial. Para 2021, esta cifra ascendió a la cantidad de 6.6 millones, representando así el 10 % de las ventas globales de automóviles y, en el primer trimestre de 2022 las ventas aumentaron un 75 % en comparación con el 2021 (Gómez-Ramírez *et al.*, 2023).

A diferencia de los vehículos tradicionales, los VE requieren hacer uso de la energía eléctrica de la red para la recarga de sus baterías. La inserción de los VE es motivo de preocupación para las empresas distribuidoras, debido al impacto potencial en la demanda, la cargabilidad de las redes eléctricas de distribución, el deterioro de la calidad de la energía de la red y el aumento de las pérdidas de energía (Abid *et al.*, 2023).

Prem *et al.* (2020) investigó los efectos en la calidad de la energía procediendo a medir ciertos indicadores de calidad, y observando que la naturaleza no lineal de la carga de los VE, influenciada por su electrónica de potencia, es la principal causa de la degradación de la calidad de la energía medida en

términos del factor de potencia, la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) y la variabilidad del nivel de tensión cuando los VE se conectan a la red. El artículo Bragatto *et al.* (2023) menciona que la carga de los VE puede ocasionar un aumento significativo de la demanda de energía, lo que puede resultar en sobrecargas en los transformadores y alimentadores de las redes de baja tensión y desequilibrios de tensión causados por los cargadores monofásicos y bifásicos de los VE ocasionando graves perjuicios técnicos y operativos del sistema. Los investigadores Wei *et al.* (2022) corroboran esta conclusión al destacar que el proceso de carga de los VE puede llegar a agravar la diferencia pico-valle de carga en la red de distribución y causar problemas como superación de límites de operación del sistema. Por último, Diahovchenko *et al.* (2022) indica que el aumento de la demanda que pueden llegar a experimentar los transformadores de distribución, que alimentan hogares residenciales equipados con estaciones de carga lenta, y que manejan potencias de aproximadamente 10 kW y probablemente se carguen en horas pico, pueden llegar a sobrecargar los transformadores, aumentando su temperatura y acelerando el envejecimiento de los mismos.

Ante tales problemas que ha revelado esta revisión preliminar del estado del arte, se ha verificado en la literatura que en los últimos años se han invertido grandes esfuerzos por mitigar estos impactos negativos. El estudio Gómez-Ramírez *et al.* (2023) señala que los sistemas de distribución en Costa Rica presentan pérdidas energéticas del 11.6 %, con una tendencia a aumentar en el futuro. Para abordar este desafío, el estudio propone una solución a corto plazo que involucra la integración de generación distribuida con energías renovables en las redes de distribución. El objetivo de esta propuesta es satisfacer la demanda en puntos específicos y así reducir las sobrecargas de las líneas de distribución eléctrica. El estudio de Diahovchenko *et al.* (2022) presenta una solución metodológica basada en lógica difusa con la finalidad de reducir el envejecimiento de los transformadores debido a la inserción de VE. El escenario más favorable fue cuando el sistema de distribución de energía se equipó adicionalmente con almacenamiento de energía controlada, instalaciones de paneles fotovoltaicos (PV) y bancos de condensadores en derivación, lo cual redujo hasta más de siete veces el impacto en los transformadores a comparación del caso base.

Adicional a las soluciones aquí reseñadas, se encuentran en desarrollo alternativas como estaciones de carga de VE que incorporan la tecnología vehicle-to-grid (V2G), cuya capacidad de flujo energético bidireccional permite que los VE eventualmente inyecten energía activa y reactiva a la red con el fin de minimizar los efectos adversos de la integración de los VE (Essiet y Sun, 2021). Para avanzar hacia un modelo de transporte más sostenible, especialmente en el contexto de la electromovilidad, es fundamental comprender el estado actual de las estaciones de carga de vehículos eléctricos y evaluar sus posibles impactos en la red de distribución. Además, es esencial estar al tanto de las soluciones tecnológicas disponibles para facilitar una integración amigable de los VE a la red.

En este sentido, este artículo presenta los hallazgos de una revisión exhaustiva de la literatura sobre este tópico de interés actual. Para el efecto, se utiliza la metodología PRISMA, la cual, permitió identificar obras relevantes y actualizadas

en prestigiosos catálogos digitales. La búsqueda bibliográfica arrojó un total de 30 resultados, de los cuales, se seleccionaron 20 obras pertinentes para llevar a cabo un análisis sistemático de la literatura. Este enfoque metodológico ofrece una visión completa y actualizada de los desafíos y oportunidades asociados con la integración de los VE en la red de distribución eléctrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Crterios de selección de estudios

La recopilación de información se realizó mediante la búsqueda de artículos científicos en las siguientes bases de datos: Scopus, Science Direct, IEEE Xplore y SciELO, utilizando los términos de búsqueda “electric vehicle” AND “slow charging” AND “power quality” y filtrando la búsqueda para el periodo comprendido entre el 2019 y 2024. En la base digital SciELO, los términos de búsqueda fueron ingresados en español: “vehículo eléctrico” AND “carga lenta” AND “calidad de energía”.

Se excluyeron todas las formas de publicación que no fueran consideradas artículos científicos, lo que implicó la exclusión de revisiones, cartas al editor, artículos de opinión, resúmenes de conferencias, discusiones, enciclopedias y libros. Esta selección se realizó mediante la aplicación del filtro “Document type: Article” en Scopus, “Article type: Research Article” en Science Direct y el filtro “Journals” en IEEE Xplore. En el caso de SciELO, no fue necesario aplicar este filtro, ya que únicamente contiene artículos científicos. Además, se restringió la búsqueda a artículos de acceso libre en cada base de datos.

Proceso de búsqueda y selección de estudios

La revisión de artículos se llevó a cabo, siguiendo la metodología PRISMA. Esta metodología garantiza la realización rigurosa y transparente de revisiones sistemáticas y meta-análisis, contribuyendo así a fortalecer la confianza en los resultados y conclusiones presentadas (Page *et al.*, 2021). Cada etapa de este proceso de revisión sistemática se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 1.

Las obras relevantes fueron identificadas y seleccionadas en cada base de datos conforme a los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la sección anterior. Este procedimiento condujo a la identificación inicial de 30 artículos. Es fundamental destacar que los resultados se obtuvieron exclusivamente en Scopus y Science Direct; en las otras dos bases de datos, no se encontraron artículos que cumplieran con los términos de búsqueda establecidos. Las publicaciones científicas referentes al impacto de los VE en la calidad de energía de redes de baja tensión ha experimentado un notorio crecimiento en los últimos seis años (Figura 2). Se observa una tendencia al alza en el número de publicaciones cada año. A partir de 2021, el interés académico experimentó un aumento notable, alcanzando su punto máximo en 2023. En lo que respecta al 2024, el número de publicaciones es alto, pese a que la fecha de corte de la búsqueda corresponde al mes de mayo del mismo año. Los resultados muestran que esta tendencia creciente se mantendrá durante los próximos años.

Adicionalmente, en las Figuras 3 y 4 se presenta la distribución del número de publicaciones por país y continen-

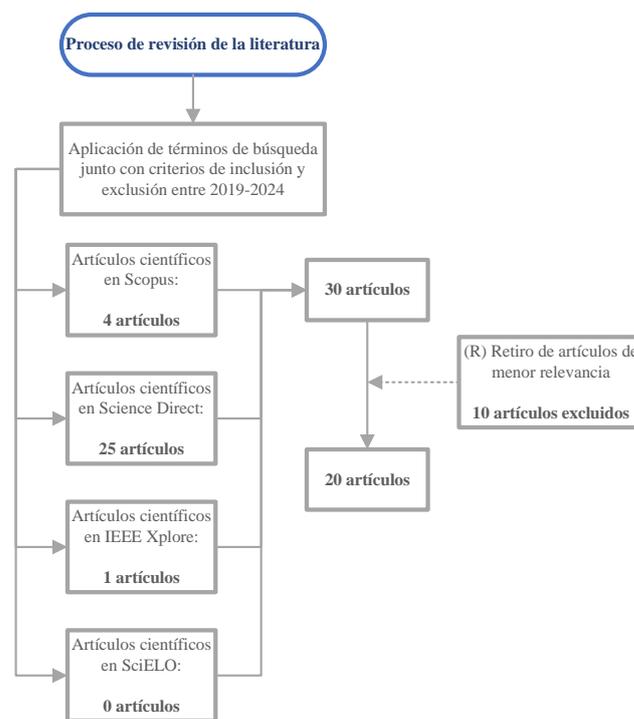


Fig. 1: Diagrama de flujo del proceso de revisión de la literatura.

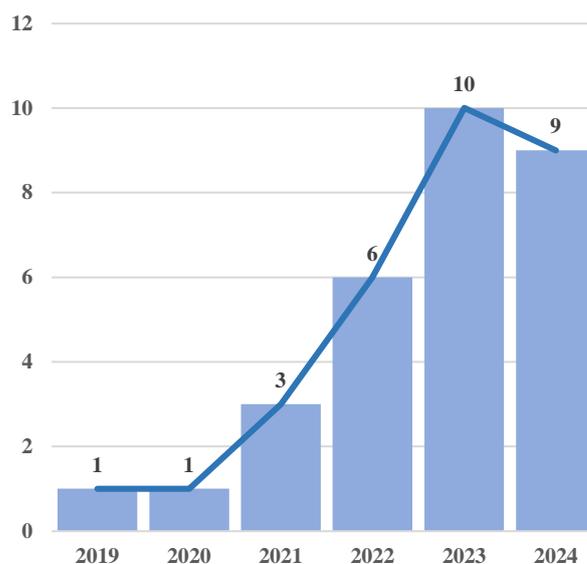


Fig. 2: Tendencia anual de publicaciones.

te, respectivamente. Resulta evidente en esta búsqueda que, Europa y Asia lideran tales investigaciones en términos de cantidad de publicaciones. Se espera que en los años venideros, los demás continentes muestren un creciente interés en investigaciones relacionadas con VE, contribuyendo así hacia una transición efectiva hacia esta solución de movilidad en países en vías de desarrollo.

Los metadatos de cada artículo fueron exportados a archivos con extensión (.ris) y gestionados en Zotero para eliminar posibles duplicidades. Aunque existen herramientas especializadas y robustas para estudios bibliométricos, como R: library(bibliometrix), VOSviewer y CiteSpace, en esta investigación se optó por utilizar Zotero y Microsoft Excel para el análisis de metadatos dado el tamaño de la muestra primaria del estudio. Estas dos herramientas permitieron una

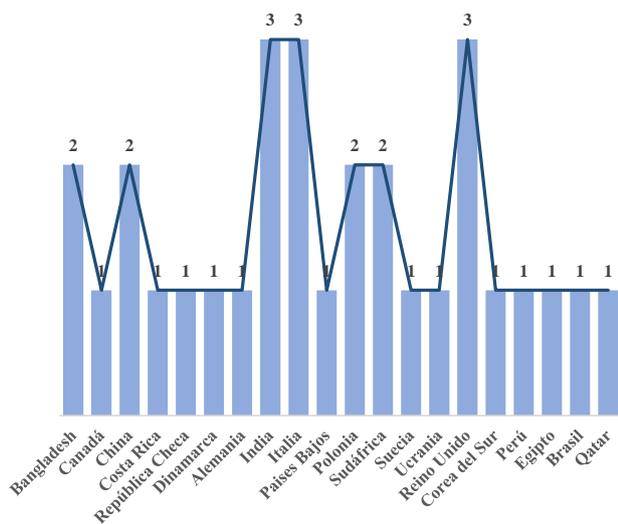


Fig. 3: Número de publicaciones por país.



Fig. 4: Número de publicaciones por continente.

gestión eficiente y precisa de los 30 artículos seleccionados, facilitando la aplicación de criterios de exclusión y el análisis detallado de los datos. Posteriormente, se llevó a cabo una lectura analítica de los artículos con el objetivo de descartar aquellos documentos científicos que no aportaran información sustancial sobre el impacto de la carga lenta de VE en la calidad de energía de las redes de baja tensión. Esta fase, se identificó como (R) “Retiro de artículos de menor relevancia”.

Concluida esta revisión, la base de datos de interés se vio reducida a un conjunto final de 20 artículos indexados. Los detalles de esta última etapa del proceso se resumen en la Tabla 1, la cual recoge de manera integral todos los criterios de inclusión y exclusión aplicados.

RESULTADOS

Impacto de los vehículos eléctricos en la red eléctrica

Se destaca en Chudy y Mazurek (2019) la necesidad de una infraestructura de carga inteligente; la gestión eficiente de la carga tiene el potencial de minimizar la presión sobre la red eléctrica, mejorando su estabilidad y por ende su eficiencia. Por otra parte, en Manimaran y Ranihemamalini (2023) se centra el análisis en la ubicación estratégica de estaciones de carga lenta a lo largo de la topología del sistema de distribución. Tal estudio muestra que una distribución adecuada y planificada puede influir positivamente en la cargabilidad de la red eléctrica, reduciendo la congestión y mejorando la

distribución de la carga de los VE.

Respecto a los modos de carga de los VE, en Muttaqi *et al.* (2024) se ofrece un análisis detallado de las fluctuaciones de tensión causadas por la recarga de baterías de los VE, lo que en última instancia repercute en la estabilidad y confiabilidad de la red. Además, en este trabajo junto con Muttaqi *et al.* (2024); Hu *et al.* (2021) se exponen las variaciones en corriente y potencia que aparecen durante la carga de VE. Tales registros proporcionan una perspectiva amplia sobre cómo estas variaciones impactan en la calidad de energía y enfatizan en la importancia de un monitoreo continuo de dichos parámetros eléctricos.

En los artículos Manimaran y Ranihemamalini (2023); Kuwałek y Wiczyński (2022) se propone un modelo híbrido de estado de carga para VE que participen en servicios V2G. En esta interacción bidireccional entre el VE y la red eléctrica se busca un compromiso entre la gestión energética responsable de la batería del vehículo, por parte de la red y la efectividad en la provisión de servicios complementarios a la red de distribución en el punto de conexión.

El trabajo documentado por (Varone *et al.*, 2024) destaca que la carga simultánea de VE en estacionamientos solares puede generar picos de demanda de energía, sobrecargando las redes existentes. Propone estrategias como la gestión de la demanda y la implementación de sistemas de almacenamiento de energía para mitigar estos impactos.

Un modelo dinámico para analizar el comportamiento de los VE en redes de distribución, abordando problemas como la regulación de voltaje, la calidad de la energía y la congestión se presenta en (Tian *et al.*, 2024). En este trabajo se enfatiza la necesidad de ajustar adecuadamente los parámetros de control de los cargadores de VE para mantener la estabilidad de la red.

Por otro lado, la investigación conducida por (Pretorius *et al.*, 2024) analiza la electrificación de taxis tipo minibús en África subsahariana, destacando la importancia de modelos de simulación realistas para predecir el impacto en una red eléctrica frágil y encontrar un equilibrio entre movilidad y demanda energética.

Finalmente, una técnica de predicción de las demandas de carga de VE en redes urbanas utilizando modelos de simulación basados en datos reales de viajes y tráfico se introduce en (Mahmoudi *et al.*, 2024). Este estudio resalta la importancia de planificar eficientemente las estaciones de carga para evitar sobrecargas en la red eléctrica

Efectos en la calidad de la energía en redes de baja tensión

En Essiet y Sun (2021) se analiza que la carga masiva de VE puede tener un impacto significativo en la red de distribución de baja tensión. La variabilidad en la demanda y los picos de carga pueden afectar la estabilidad de la red y la calidad de la energía suministrada a los usuarios, como aparición de armónicos o fluctuaciones del nivel de tensión. Además, puede llegar a producir sobrecargas en los transformadores, afectando a la vida útil de los mismos. Por lo tanto, el artículo propone un modelo híbrido de estado de carga para VE con capacidad a la red, además de que mejora el rendimiento de las baterías, también ayuda a aumentar la capacidad de la red durante horas pico o de emergencia, mejorando así la

Tabla 1: Resumen de los criterios de selección de los artículos científicos.

Concepto	Tipo de criterio	Criterio
Indexación de artículos	Inclusión	Artículos indexados en Scopus, Science Direct, IEEE Xplore y SciELO.
	Exclusión	Otros.
Lenguaje de la publicación	Inclusión	Español e inglés.
Fecha de publicación	Inclusión	Estudios publicados entre los años 2019 y 2024.
Disponibilidad	Inclusión	Acceso libre.
Tema principal del artículo	Inclusión	Todos los artículos debían incluir en su título, resumen o palabras clave los siguientes términos de búsqueda en inglés: power quality, electric vehicle, slow charging; o su traducción al español: vehículo eléctrico, carga lenta, calidad de energía.
Tipo de publicación	Exclusión	Se excluyeron todas las publicaciones distintas a artículos científicos. No se incluyeron artículos de revisión, cartas al editor, artículos de opinión, resúmenes de congresos, discusiones, enciclopedias ni libros, entre otros.
Información no relevante	Exclusión	Se excluyeron todos los artículos que no abordaran de manera exhaustiva, o simplemente no abordaran en absoluto, el impacto de los VE en la calidad de energía en redes de bajo voltaje.

estabilidad de la misma. Por otro lado, Muttaqi *et al.* (2024) menciona que existen problemas de calidad de energía, como armónicos, transitorios y sobretensiones, impactan la estabilidad y confiabilidad de las redes eléctricas. La naturaleza no lineal de la carga de los VE es la razón principal de su impacto en la calidad de la energía de la red. También se estudiaron las variaciones en el factor de potencia y THD al conectar VE al sistema de energía, provocando daños en ciertos equipos e interrupciones de servicio. Investigadores en Chaudry *et al.* (2022) indican que el aumento proyectado en la demanda eléctrica y la necesidad de descarbonización plantean desafíos para la red eléctrica del Reino Unido. Por ello, se presentan soluciones como implementación de sistemas de gestión de carga inteligente para equilibrar la demanda de VE y reducir picos de carga, uso de tecnologías de almacenamiento de energía, como baterías, para estabilizar la red y disminuir la variabilidad de la demanda.

Adicionalmente, el artículo (Paucara *et al.*, 2024) aborda cómo los cargadores bidireccionales de VE pueden mejorar la calidad de la energía en redes de baja tensión mediante el soporte de inercia virtual, soporte de frecuencia-voltaje y compensación de armónicos, mitigando así los problemas derivados de la integración de energías renovables. Finalmente,

en (Jain y Bhullar, 2024) se resaltan los desafíos de la integración de VE en la red eléctrica, como los altos costos de las baterías y los largos tiempos de carga, y propone soluciones como el uso de energía solar fotovoltaica para reducir la demanda en la red y mejorar la calidad de la energía.

Integración de energías renovables y vehículos eléctricos

En Essiet y Sun (2021); Chaudry *et al.* (2022) se determina que los VE tienen la capacidad de actuar como sistemas de almacenamiento energético. Esta capacidad se presenta como una estrategia crucial mitigar la variabilidad inherente de las fuentes de energía renovables, abordando así los desafíos asociados a su intermitencia. Además de que la gestión óptima de carga de vehículos y su participación en servicios V2G contribuyen a la estabilidad de la red, también genera beneficios económicos. Estos beneficios incluyen ahorros en generación de energía a gas y la reducción de emisiones de GEI.

En Essiet y Sun (2021) se propone, además, que la optimización de modelos de baterías puede maximizar los beneficios tanto para los operadores de la red eléctrica como

para los propietarios de VE. Mediante un enfoque multiobjetivo se optimizan los parámetros y se garantiza la salud de las baterías para operaciones V2G y, en sentido inverso, el concepto grid-to-vehicle (G2V).

La adopción masiva de VE se percibe como un componente crucial en la transición hacia emisiones netas cero, ya que estos no emiten gases de escape y, por lo tanto, pueden ayudar a reducir significativamente las emisiones GEI del sector del transporte. Además, la prohibición de la venta de vehículos de gasolina y diésel es una medida que algunos países están considerando para acelerar la adopción de VE y alcanzar los objetivos de emisiones netas cero. Por ejemplo, el Reino Unido ha anunciado que prohibirá la venta de vehículos nuevos de gasolina y diésel a partir de 2030, y otros países, como Francia y Noruega, también han establecido objetivos similares (Chaudry *et al.*, 2022).

Se presenta en (Varone *et al.*, 2024) una plataforma IoT para la gestión inteligente de estacionamientos solares, optimizando la carga de VE con energía fotovoltaica y almacenamiento de energía para minimizar la dependencia de la red eléctrica.

Por otro lado, el artículo (Jain y Bhullar, 2024) discute los beneficios de integrar energía solar fotovoltaica en los sistemas de carga de VE, como la reducción de costos y la menor demanda en la red eléctrica, destacando la importancia de la investigación en algoritmos de control avanzados y la optimización de la interfaz de red. A su vez, en (Nafeh *et al.*, 2024) se propone la combinación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de baterías para gestionar la variabilidad de la generación solar y garantizar un suministro estable de energía para la carga de VE, aliviando así la presión sobre la red durante los picos de demanda.

Desafíos y soluciones en la descarbonización del transporte

Los desafíos en la descarbonización del sector del transporte son ampliamente abordados en Manimaran y Ranihemalini (2023); Wei *et al.* (2022); Bragatto *et al.* (2023); Chaudry *et al.* (2022). Estos estudios resaltan que si bien la electrificación de vehículos es un paso fundamental, por sí sola no es suficiente para alcanzar los objetivos de descarbonización, subrayando la necesidad de enfoques complementarios. En particular, investigaciones como las de Wei *et al.* (2022); Mudaheranwa *et al.* (2023); Chaudry *et al.* (2022) hacen hincapié en la importancia de políticas de incentivos y la eliminación de barreras para acelerar la adopción de VE. Estos enfoques pueden incluir subsidios, infraestructura de carga accesible y programas de concienciación destinados a superar la resistencia del consumidor hacia la eco-movilidad.

En los artículos Chaudry *et al.* (2022); Essiet y Sun (2021) se discute acerca de la sostenibilidad económica de la transición hacia VE y la necesidad de equilibrar costos y beneficios a largo plazo. Se señala que, aunque los VE tienen un costo inicial más alto en comparación con los vehículos de combustión interna, los costos de mantenimiento son significativamente más bajos. Además, la infraestructura de carga es un factor importante a considerar en la transición hacia VE. También se discute la capacidad de la red eléctrica para manejar la carga masiva de los mismos y se sugieren soluciones para abordar este desafío, como la implementación de

tecnologías de carga inteligente y la integración de energías renovables en la red eléctrica. Además, es crucial considerar el impacto económico a largo plazo de la reducción de las emisiones de GEI y la dependencia de los combustibles fósiles, así como los beneficios potenciales en términos de salud pública y sostenibilidad ambiental.

La coordinación efectiva entre los sectores de energía y transporte es esencial para lograr la descarbonización y garantizar una transición sostenible hacia los VE. La planificación integrada y la colaboración entre gobiernos nacionales y locales son fundamentales para garantizar que se aborden los desafíos y oportunidades de manera efectiva y se maximicen los beneficios para la sociedad en general (Chaudry *et al.*, 2022).

Un modelo de negocio integral para el ecosistema de carga de VE, en el cual se abordan los desafíos de la infraestructura de carga y se promueven soluciones innovadoras y sostenibles para facilitar la adopción de VE se propone en (Sabyasachi *et al.*, 2024). Luego, en el estudio (Pretorius *et al.*, 2024) se subraya la complejidad de electrificar taxis tipo minibús en África subsahariana debido a la fragilidad de la red eléctrica y se proponen estrategias como el uso de modelos de simulación específicos y algoritmos de asignación de recursos para optimizar la relación entre movilidad y demanda energética.

Finalmente, la investigación conducida por (Nafeh *et al.*, 2024) discute cómo la integración de sistemas fotovoltaicos y almacenamiento de baterías puede mitigar los impactos negativos de la carga de VE en la red eléctrica, promoviendo una solución sostenible para la descarbonización del transporte.

Mitigación de los impactos negativos en las redes eléctricas

En lo que concierne a la mitigación de los impactos negativos en las redes eléctricas, la revisión de literatura reveló que la investigación reportada en Muttaqi *et al.* (2024) propone el uso de un algoritmo de distribución de problemas de carga basado en teorías juegos. Este algoritmo introduce un perfil de carga de forma rectangular que representa la demanda asociada a los VE. Esta metodología ofrece una alternativa robusta a los métodos convencionales existentes, ya que permite equilibrar las pérdidas de energía y reducir el envejecimiento de los transformadores. A pesar de las ventajas mencionadas, existen pérdidas de optimibilidad y convergencia.

Otro método abordado en el artículo Muttaqi *et al.* (2024) es la carga inteligente para la mejora de la calidad de la energía en las redes eléctricas. Este método se basa en un algoritmo de carga inteligente basado en un controlador de caída, el cual se centra en mitigar aspectos claves de la calidad de tensión, como caídas de tensión. Experimentos realizados han demostrado ventajas significativas en la mejora de la calidad de energía, incluso en redes altamente desequilibradas.

Además, el estudio menciona el uso de un método de flujo de potencia con alta tasa de convergencia y un algoritmo genético para optimización. Este enfoque se centró en la asignación óptima de estacionamientos y la incorporación de un sistema PV. Se destaca que la programación inteligente de cargas de VE durante la noche, combinada con sistemas PV,

podría reducir las pérdidas del sistema y mejorar el perfil de tensión.

En el artículo (Varone *et al.*, 2024) se proponen estrategias como la gestión inteligente de la carga y el uso de sistemas de almacenamiento de energía para minimizar los picos de demanda y optimizar el uso de energía renovable, reduciendo así la presión sobre la red eléctrica. Además, autores en (Tian *et al.*, 2024) proponen un modelo equivalente dinámico para simular el comportamiento de VE en redes de distribución, destacando la importancia de ajustar los parámetros de control de los cargadores para evitar problemas de congestión y mantener la estabilidad de la red. Por último, en (Paucara *et al.*, 2024), se introduce una estrategia para gestionar un sistema de almacenamiento de energía híbrido mediante cargadores bidireccionales de VE, proporcionando soporte de inercia virtual y mejorando la estabilidad de la red eléctrica.

Gestión inteligente de la carga y vehicle-to-grid (V2G)

La tecnología (V2G) es una de las mayores ventajas de los VE. Esta tecnología ofrece varias ventajas, como la posibilidad de utilizar las baterías de los vehículos como una fuente de almacenamiento de energía temporal para gestionar la carga durante períodos de alta demanda o para proporcionar servicios auxiliares a la red, como la regulación de frecuencia o la reserva de capacidad. El V2G también puede contribuir a la estabilización de la red eléctrica, a la integración de energías renovables intermitentes y a la reducción de los costos operativos de las redes eléctricas. Sin embargo, su implementación plena enfrenta desafíos técnicos, regulatorios y de infraestructura que deben ser abordados para aprovechar todo su potencial.

Essiet y Sun (2021) presenta un modelo híbrido de estado de carga para vehículos con capacidad de V2G. Este modelo consiste en la optimización de la carga de la batería y en mantener la estabilidad de la red en horas de alto consumo.

Los hallazgos del estudio concluyen que la tecnología V2G posee el potencial de mejorar significativamente la estabilidad de la red, aumentando su capacidad y maximizando la eficiencia energética al permitir que los vehículos actúen como fuentes de generación de energía distribuida.

Asimismo, se destaca la importancia de optimizar la carga de las baterías de los VE para maximizar los beneficios de la tecnología V2G, tanto para los usuarios finales como para los operadores de la red. Además, la inclusión de los parámetros del modelo de batería en la función objetivo del modelo del agregador de VE puede mejorar aún más la estabilidad de la red eléctrica y maximizar los beneficios financieros tanto para los consumidores como para las empresas distribuidoras.

En el artículo (Varone *et al.*, 2024) se destaca la implementación de una plataforma IoT para la gestión inteligente de la carga de flotas de VE en estacionamientos solares, optimizando el uso de energía renovable y permitiendo la participación en el mercado eléctrico mediante estrategias V2G. Adicionalmente, en (Paucara *et al.*, 2024) se propone la gestión de un sistema de almacenamiento de energía híbrido a través de cargadores bidireccionales de VE para proporcionar soporte de inercia virtual y estabilidad de voltaje, mejorando la gestión de la carga y la integración de VE en la red eléctrica.

Finalmente, en (Jain y Bhullar, 2024) se ofrece una intere-

sante discusión respecto la implementación de sistemas de carga inteligente y la integración de fuentes de energía renovable para optimizar la carga de VE y reducir la presión sobre la red eléctrica, promoviendo una gestión eficiente de la carga y la adopción de tecnologías V2G.

La Figura 5 presenta un cuadro sinóptico que resume los principales hallazgos de la presente revisión de literatura.

DISCUSIÓN

La revisión de la literatura realizada sobre la evaluación del impacto de la carga lenta de VE en la calidad de energía en una red de distribución de baja tensión proporciona una idea del panorama actual y hacia dónde las investigaciones pretenden llegar. Existe un consenso de que la mejor alternativa para la reducción de emisiones de GEI es la transición de los vehículos convencionales a VE, por ello, en varios países existen políticas con el objetivo de acelerar este proceso. Con esta medida se busca conseguir una reducción considerable de la dependencia de los combustibles fósiles provenientes del sector del transporte.

Pero este importante cambio conlleva repercusiones significativas, como es el caso de la afección a la infraestructura eléctrica. Por ello, la revisión realizada indica el impacto de la inserción de los VE en los sistemas de distribución causado por la instalación de estaciones de carga lenta de los VE, cuya proliferación puede afectar a la calidad de la energía, provocar un aumento de la demanda, la aparición de fluctuaciones de tensión o perjudicar la estabilidad en el sistema. Se ha encontrado que las investigaciones concentran sus esfuerzos para encontrar formas de reducir estos efectos, las cuales incluyen modelos de optimización de carga que ayuden a la reducción de la demanda en horas pico. También mediante la implementación de nuevas tecnológicas como es el caso de V2G que coadyuva a la estabilización del sistema.

Sin embargo, la revisión expone que existen ciertas limitaciones, como es el caso de los bajos niveles de penetración de VE en entornos urbanos, imposibilitando un estudio real y a una escala significativa. Este hecho ha obligado a que la mayoría de estudios sean realizados en base a métodos probabilísticos y muy ajustados hacia determinados sitios, impidiendo un escenario de estudio real preciso y generalizable.

En Ecuador, aunque existen estudios interesantes y útiles aún no se disponen de investigaciones con resultados concluyentes. Esto resalta la urgencia de emprender investigaciones específicas sobre los efectos derivados de la masificación de VE en el contexto local. El presente artículo de revisión pretende servir como punto de partida para iniciar estos estudios en un contexto propio, siendo fundamental para que las empresas distribuidoras ecuatorianas puedan anticiparse, tomar precauciones y ejecutar acciones preventivas de manera estratégica.

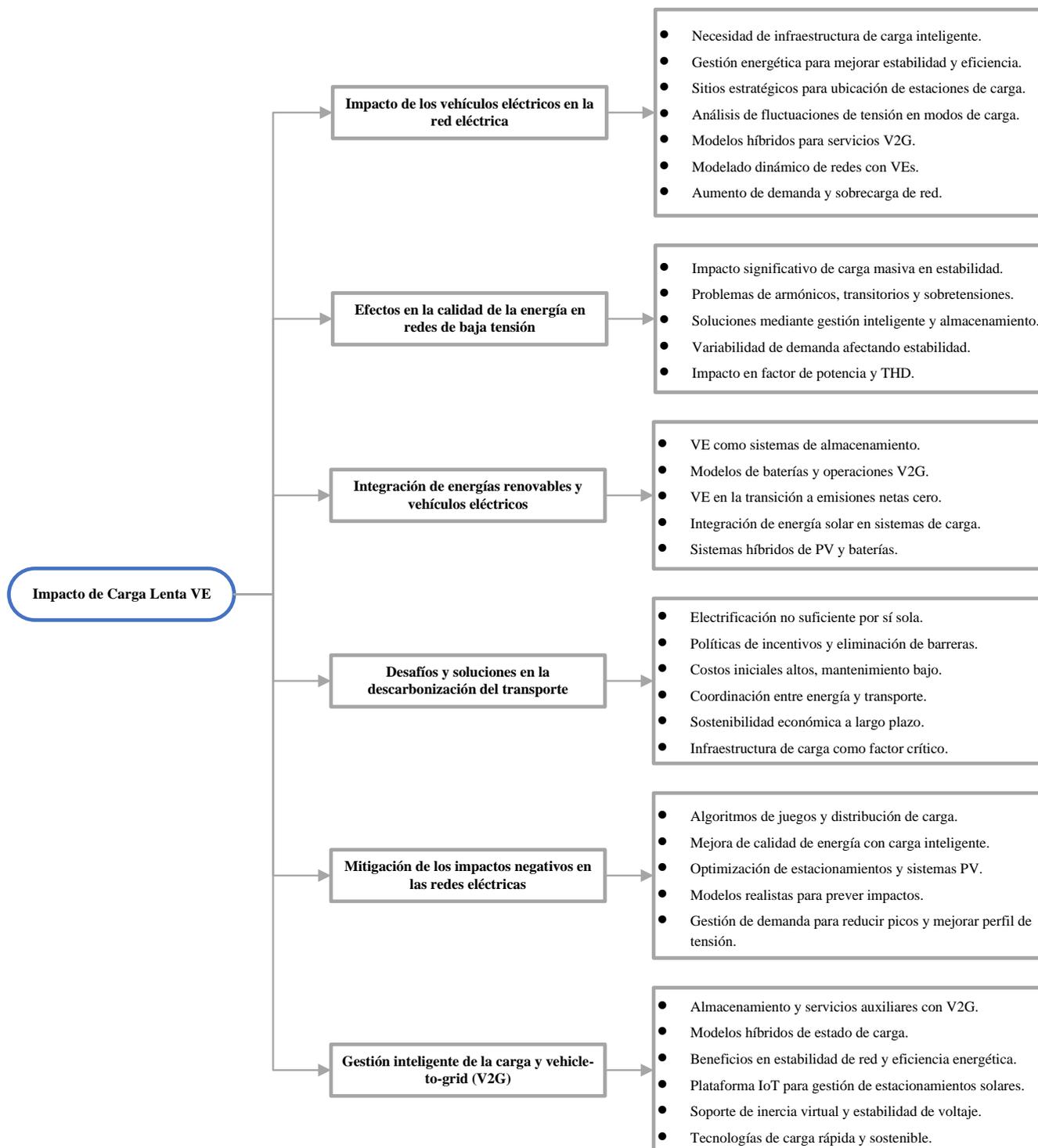


Fig. 5: Resumen de los principales hallazgos de la revisión de literatura.

CONCLUSIONES

La exhaustiva revisión de la literatura documentada en este artículo ofrece una visión precisa de los efectos de la carga lenta de VE en la calidad de la energía en redes de baja tensión en diversos países. La metodología PRISMA ha proporcionado una estructura detallada para llevar a cabo la revisión de manera sistemática, garantizando así la exhaustividad y transparencia del proceso. Este enfoque facilita la replicación del proceso de revisión por parte de otros investigadores, lo que contribuye a la verificación de los resultados con el menor sesgo posible. Al examinar detenidamente los análisis de los artículos, se hizo evidente la escasa investigación en esta rama de la electromovilidad, la cual ha experimentando un crecimiento significativo a partir del año 2021. Europa y Asia destacan como los continentes líderes en la realización de estudios en este tópico.

Una estrategia clave para la reducción de emisiones GEI y la descarbonización del sector del transporte es la transición hacia los VE. Sin embargo, esta transición trae consigo diversos cambios tanto a nivel de consumidor como de red. La inserción masiva de VE en la red eléctrica plantea desafíos significativos en la distribución de baja tensión. La carga de VE puede generar variabilidad en la demanda y picos de carga, afectando la estabilidad y calidad de la energía. Además, la recarga de baterías de VE puede causar fluctuaciones de tensión, afectando el equilibrio y confiabilidad de la red. Es por ello que los hallazgos de la revisión de literatura proporcionan estrategias y enfoques destinados al control y/o mitigación de impactos negativos en los sistemas de distribución por la transición a VE.

La tecnología V2G, al permitir que los VE actúen eventualmente como fuentes de generación distribuida, se presenta como una solución eficaz para mejorar la estabilidad de la red. Complementando esta perspectiva, estudios proponen la aplicación de modelos de optimización que abarcan la carga, ubicación de estacionamientos y asignación de recursos. Asimismo, la implementación de algoritmos de distribución de carga y estrategias de carga inteligente basadas en teorías de juegos y controladores específicos se sugiere para mitigar problemas como caídas de tensión y mejorar la calidad de la energía. En este contexto, las investigaciones consultadas destacan la importancia del monitoreo continuo de parámetros eléctricos durante la carga como una medida esencial para garantizar la calidad de la energía suministrada.

Finalmente, se resalta la necesidad de desarrollar e implementar una infraestructura de carga inteligente, ubicación estratégica de estaciones de carga lenta y la coordinación efectiva entre el sector consumidor y distribuidor para abordar los desafíos. Electrificar los medios de propulsión de vehículos es fundamental, pero la existencia de barreras, tales como altos costos iniciales en comparación con vehículos de combustión interna y la falta de incentivos logísticos y económicos pueden frenar su adopción masiva. Su estudio representa actualmente un problema en el ámbito académico e investigativo por la escasez de datos reales en un entorno local, el cual obliga a recurrir a modelos probabilísticos. Esta limitación obstaculiza el progreso en la comprensión del tema, especialmente en naciones de América Latina, como es el caso de Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso al Laboratorio de Micro-Red del Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CTTI-B), en cuyas instalaciones fue realizada la presente investigación. Este trabajo forma parte de las actividades investigativas del proyecto titulado «Promoviendo la sostenibilidad energética: Transferencia de conocimientos en generación solar y micro-movilidad eléctrica dirigida a la población infantil y adolescente de la parroquia Cumbe», ganador de la XI Convocatoria de proyectos de servicio a la comunidad organizado por la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca, Ecuador, bajo la dirección del autor Danny Ochoa-Correa.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: P.M.-M., D.B.-A. y D.O.-C.; metodología: P.M.-M., D.B.-A. y D.O.-C.; análisis formal: D.O.-C.; investigación: P.M.-M. y D.B.-A.; recursos: D.O.-C.; curación de datos: P.M.-M. y D.B.-A.; redacción — preparación del borrador original: P.M.-M. y D.B.-A.; redacción — revisión y edición: D.O.-C.; visualización: P.M.-M. y D.B.-A.; supervisión: D.O.-C.; administración de proyecto: D.O.-C. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

FINANCIAMIENTO

No aplica. Esta investigación no recibe financiación alguna.

REFERENCIAS

- Abid, M. S., Apon, H. J., Alavi, A., Hossain, M. A., y Abid, F. (2023, febrero). Mitigating the Effect of Electric Vehicle integration in Distribution Grid using Slime Mould Algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 64, 785–800. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822006160> doi: 10.1016/j.aej.2022.09.022
- Albuquerque, F. D., Maraqa, M. A., Chowdhury, R., Mauga, T., y Alzard, M. (2020). Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools. *Transportation Research Procedia*, 48, 2018–2030.
- Bragatto, T., Carere, F., Cresta, M., Gatta, F., Geri, A., Maccioni, M., y Paulucci, M. (2023, agosto). Developing a public EV charging infrastructure in a DSO's perspective: Hosting capacity assessment and grid reinforcements on a real case study. *Electric Power Systems Research*, 221, 109463. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623003528> doi: 10.1016/j.epsr.2023.109463
- Chaudry, M., Jayasuriya, L., Blainey, S., Lovric, M., Hall, J. W., Russell, T., ... Wu, J. (2022, enero). The implications of ambitious decarbonisation of heat and road transport for Britain's net zero carbon energy systems. *Applied Energy*, 305, 117905. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921012186> doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117905
- Chudy, A., y Mazurek, P. (2019, noviembre). Electromobility – the Importance of Power Quality and

- Environmental Sustainability. *Journal of Ecological Engineering*, 20(10), 15–23. Descargado 2023-12-18, de <http://www.journalssystem.com/jeeng/Electromobility-the-Importance-of-Power-Quality-and-Environmental-Sustainability,112713,0,2.html> doi: 10.12911/22998993/112713
- Diahovchenko, I., Petrichenko, R., Petrichenko, L., Mahnitko, A., Korzh, P., Kolcun, M., y Čonka, Z. (2022, septiembre). Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles. *Results in Engineering*, 15, 100592. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022002626> doi: 10.1016/j.rineng.2022.100592
- Essiet, I. O., y Sun, Y. (2021, noviembre). Optimal open-circuit voltage (OCV) model for improved electric vehicle battery state-of-charge in V2G services. *Energy Reports*, 7, 4348–4359. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721004947> doi: 10.1016/j.egyr.2021.07.029
- Golovanov, N., y Marinescu, A. (2019). Electromobility and climate change. En *2019 8th international conference on modern power systems (mps)* (pp. 1–5).
- González, J. (2023, octubre). *Chile: “Mi Taxi Eléctrico” entra en su segunda etapa*. Descargado 2024-05-23, de <https://latamobility.com/chile-mi-taxi-electrico-entra-en-su-segunda-etapa/>
- Gómez-Ramírez, G. A., Solis-Ortega, R., y Ross-Lépiz, L. A. (2023, noviembre). Impact of electric vehicles on power transmission grids. *Heliyon*, 9(11), e22253. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023094616> doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22253
- Hu, J., Zhou, H., Zhou, Y., Zhang, H., Nordströmd, L., y Yang, G. (2021, agosto). Flexibility Prediction of Aggregated Electric Vehicles and Domestic Hot Water Systems in Smart Grids. *Engineering*, 7(8), 1101–1114. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809921002605> doi: 10.1016/j.eng.2021.06.008
- Jain, A., y Bhullar, S. (2024, junio). Operating modes of grid integrated PV-solar based electric vehicle charging system- a comprehensive review. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 8, 100519. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124001013> doi: 10.1016/j.prime.2024.100519
- Karunathilake, H., y Witharana, S. (2023). Fossil fuels and global energy economics. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (p. B9780323939409000505). Elsevier. Descargado 2024-05-31, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323939409000505> doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00050-5
- Kuwałek, P., y Wiczyński, G. (2022, diciembre). Monitoring Single-Phase LV Charging of Electric Vehicles. *Sensors*, 23(1), 141. Descargado 2023-12-18, de <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/141> doi: 10.3390/s23010141
- Mahmoudi, E., Santos Barros, T. A. d., y Filho, E. R. (2024, junio). Forecasting urban electric vehicle charging power demand based on travel trajectory simulation in the realistic urban street network. *Energy Reports*, 11, 4254–4276. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724002105> doi: 10.1016/j.egyr.2024.04.005
- Manimaran, B., y Ranihemamalini, R. (2023, febrero). Antlion-based sliding mode control of vienna rectifier for internet of electric vehicle. *Measurement: Sensors*, 25, 100651. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917422002859> doi: 10.1016/j.measen.2022.100651
- Mudaheranwa, E., Sonder, H. B., Cipcigan, L., y Ugalde-Loo, C. E. (2023, julio). Feasibility study and impacts mitigation with the integration of Electric Vehicles into Rwanda's power grid. *Electric Power Systems Research*, 220, 109341. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623002304> doi: 10.1016/j.epsr.2023.109341
- Muttaqi, K. M., Isac, E., Mandal, A., Sutanto, D., y Akter, S. (2024, enero). Fast and random charging of electric vehicles and its impacts: State-of-the-art technologies and case studies. *Electric Power Systems Research*, 226, 109899. Descargado 2023-12-18, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779623007873> doi: 10.1016/j.epsr.2023.109899
- Nafeh, A. E.-S. A., Omran, A. E.-F. A., Elkholly, A., y Yousef, H. (2024, marzo). Optimal economical sizing of a PV-battery grid-connected system for fast charging station of electric vehicles using modified snake optimization algorithm. *Results in Engineering*, 21, 101965. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024002184> doi: 10.1016/j.rineng.2024.101965
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Alonso-Fernández, S. (2021, septiembre). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. Descargado 2024-05-23, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300893221002748> doi: 10.1016/j.recesp.2021.06.016
- Paucara, J. D., Peña, J. C. U., y Sal Y Rosas, D. (2024). HESS Management for Virtual Inertia, Frequency, and Voltage Support Through Off-Board EV Bidirectional Chargers. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 5, 376–385. Descargado 2024-05-20, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/10508895/> doi: 10.1109/OJIES.2024.3394290
- Prem, P., Sivaraman, P., Sakthi Suriya Raj, J. S., Jagabar Sathik, M., y Almakhles, D. (2020, octubre). Fast charging converter and control algorithm for solar PV battery and electrical grid integrated electric vehicle charging station. *Automatika*, 61(4), 614–625. Descargado 2023-12-18, de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00051144.2020.1810506> doi: 10.1080/00051144.2020.1810506
- Pretorius, B., Strauss, J., y Booysen, M. (2024, abril). Grid and mobility interdependence in the eventual electrification of operational minibuses in cities in sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, 79, 101411. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082624000371> doi: 10.1016/j.esd.2024.101411
- Programa Movete en Bici*. (s.f.). Descargado 2024-05-23, de <http://fcg.uader.edu.ar/index.php/programa-movete-en-bici.html>

- Pérez, D., Gutiérrez, M. C., y Mix Vidal, R. (2019, abril). *Electromovilidad: Panorama actual en América Latina y el Caribe: Versión infográfica* (Inf. Téc.). <https://publications.iadb.org/es/electromovilidad-panorama-actual-en-america-latina-y-el-caribe-version-infografica>. Descargado 2024-05-22, de <https://publications.iadb.org/es/electromovilidad-panorama-actual-en-america-latina-y-el-caribe-version-infografica> doi: 10.18235/0001654
- Sabyasachi, S., Singh, A. R., Godse, R., Jaiswal, S., Bajaj, M., Srivastava, I., ... Misak, S. (2024, abril). Reimagining E-mobility: A holistic business model for the electric vehicle charging ecosystem. *Alexandria Engineering Journal*, 93, 236–258. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824002229> doi: 10.1016/j.aej.2024.03.004
- Tian, H., Kontis, E. O., Barzegkar-Ntovom, G. A., Papadopoulos, T. A., y Papadopoulos, P. N. (2024, junio). Dynamic modeling of distribution networks hosting electric vehicles interconnected via fast and slow chargers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109811. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061524000322> doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109811
- TransMilenio. (2013, agosto). *Historia de TransMilenio*. Descargado 2024-05-23, de <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146028/historia-de-transmilenio/>
- UCUENCA. (2023). *En cuenca se impulsa la movilidad sostenible – ucuenca*. Descargado 2023-10-03, de <https://www.ucuenca.edu.ec/noticias/en-cuenca-se-impulsa-la-movilidad-sostenible/>
- Varone, A., Heilmann, Z., Porruvecchio, G., y Romanino, A. (2024, enero). Solar parking lot management: An IoT platform for smart charging EV fleets, using real-time data and production forecasts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113845. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007037> doi: 10.1016/j.rser.2023.113845
- Wei, W., Xu, L., Xu, J., Liu, C., Jiang, X., y Liao, K. (2022, noviembre). Coupled dispatching of regional integrated energy system under an electric-traffic environment considering user equilibrium theory. *Energy Reports*, 8, 8939–8952. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722012720> doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.008