



REUTILIZACIÓN DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PARA APLICACIONES DE SEGUNDA VIDA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CON UNA ALTA PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

REUSE OF ELECTRICAL VEHICLE BATTERIES FOR SECOND LIFE APPLICATIONS IN POWER SYSTEMS WITH A HIGH PENETRATION OF RENEWABLE ENERGY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Jorge Campoverde-Pillco¹ , Danny Ochoa-Correa^{2,*} ,
 Edisson Villa-Ávila³ , Patricio Astudillo-Salinas¹

Recibido: 12-05-2023, Recibido tras revisión: 17-10-2023, Aceptado: 26-10-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática de literatura relativa al tópico reutilización de baterías de vehículos eléctricos (BVE) para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia. El fin del ciclo de vida de estas baterías representa un gran problema ambiental debido a su composición y materiales. El estudio tiene por objeto analizar la reutilización de las BVE como una alternativa sostenible para el medioambiente y, además, para brindar servicios complementarios que faciliten la incorporación de generación renovable no convencional de carácter intermitente a la red eléctrica. A través de una búsqueda exhaustiva de publicaciones científicas indexadas en catálogos digitales prestigiosos y de su posterior tratamiento sistemático, se ha llegado a un número selecto de 49 artículos científicos publicados entre 2018 y 2023. En ellos ha sido posible identificar las diferentes oportunidades, beneficios y limitaciones de los sistemas de almacenamiento de energía de segunda vida orientadas a impulsar una economía circular. El estudio concluye que, si bien la reutilización de baterías no está plenamente tratada ni implementada, debido a que aún enfrenta desafíos en términos de tecnología, costos y regulaciones, es de gran importancia profundizar su análisis para mejorar la eficiencia y disminuir los impactos ambientales que provocan su fabricación, uso y desecho.

Palabras clave: Sistemas de almacenamiento de energía en baterías, vehículos eléctricos, aplicaciones de segunda vida, sistemas eléctricos de potencia, energía renovable

Abstract

This article presents a systematic literature review on the reuse of electric vehicle batteries (EVB) for second-life applications in power systems. The end-of-life of these batteries represents a major environmental problem due to their composition and materials. The study aims to analyze the reuse of EVBs as a sustainable alternative for the environment. Additionally, it seeks to provide complementary services to facilitate the incorporation of intermittent unconventional renewable generation into the electrical grid. Through an exhaustive search of scientific publications indexed in prestigious digital catalogs and their subsequent systematic treatment, a selected group of 49 scientific articles published between 2018 and 2023 have been found in which the different opportunities, benefits and limitations of second-life energy storage systems oriented to boost a circular economy have been identified. The study concludes that, although the reuse of batteries has not yet been fully addressed or implemented due to existing challenges in terms of technology, costs, and regulations, it is of utmost importance to delve deeper into its analysis to improve efficiency and reduce the environmental impacts associated with the manufacturing, use, and disposal of such batteries.

Keywords: Battery energy storage system, Electrical vehicle, Second-life applications, Power systems, Renewable energy

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador.

^{2,*}Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET), Universidad de Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec.

³Laboratorio de Micro-Red, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Campoverde-Pillco, J.; Ochoa-Correa, D.; Villa-Ávila, E. y Astudillo-Salinas, P. "Reutilización de baterías de vehículos eléctricos para aplicaciones de segunda vida en sistemas eléctricos de potencia con una alta penetración de energía renovable: una revisión sistemática de la literatura," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 95-105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.08>.

1. Introducción

Las cifras alarmantes que detallan la disminución de los combustibles fósiles y las consecuencias que sufre el mundo debido al cambio climático, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías; una de ellas es el desarrollo del vehículo eléctrico (VE) [1]. La preocupación que se mantiene por la descarbonización de los sistemas de transporte, ha llevado a que en la actualidad haya más vehículos eléctricos en las carreteras, mismos que necesitan suplir su demanda de carga continua. Conforme la electromovilidad (EM) gana importancia entre los usuarios, de igual manera lo hace la demanda por las baterías secundarias o también llamadas recargables [2], y entre todas las opciones que actualmente existen, se lleva el protagonismo en la aplicación de los VE las de iones de litio [1].

La demanda de baterías de iones de litio ha aumentado significativamente en los últimos años, impulsada en gran parte por el crecimiento en el mercado de vehículos eléctricos. Si bien estas baterías pueden tener una vida útil de varios años, con el paso del tiempo pierden su capacidad de retener carga y necesitan ser reemplazadas. La eliminación adecuada de estas baterías es esencial para prevenir la liberación de productos químicos tóxicos y reducir el impacto ambiental [3]. En este contexto, la reutilización de baterías de vehículos eléctricos ha surgido como una alternativa sostenible y rentable [4]. Aunque las baterías pueden no ser adecuadas para su uso en vehículos después de que hayan perdido su capacidad, todavía pueden tener un valor significativo para aplicaciones de almacenamiento de energía en el marco de un sistema eléctrico de potencia, como así lo reportan estudios en [5–8].

Además de los beneficios ambientales, la reutilización de baterías también puede resultar económicamente rentable [9], pues para aplicaciones secundarias, es posible conseguir una reducción significativa del costo de los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) y otros productos que dependen de baterías de iones de litio. Esto es especialmente importante a medida que aumenta la demanda de SAE para respaldar la integración de energías renovables de carácter intermitente en los sistemas eléctricos de potencia. En el campo de los VE, se considera que una batería ha cumplido con su tiempo de vida cuando su capacidad de carga ha caído por debajo del 80 % de su capacidad nominal [10]. Debido a lo cual, se prevé que dentro de pocos años el almacenamiento de baterías de VE usadas va a suponer un verdadero problema desde distintas perspectivas. Cómo reciclarlas o reutilizarlas eficientemente es un tema delicado desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, el destino de las baterías de los VE se determinará básicamente de los hábitos de carga y las temperaturas a las que hayan sido expuestas. Si una batería presenta buenas condiciones, podrían usarse sus elementos como repuesto

para otros sistemas similares [11], [12]. Una batería en buenas condiciones debería mantener una capacidad de almacenamiento aceptable (generalmente por encima del 80 % de su capacidad nominal), estar en buen estado físico sin daños significativos, poseer ciclos de vida restantes, mantener una salud química adecuada, haber sido operada en condiciones de temperatura y carga adecuadas, y estar equipada con sistemas de gestión de batería y comunicación efectivos. Si no fuese el caso, se podrían usar como medios para almacenar energía en conjunto con sistemas de generación distribuida [13] como la generación fotovoltaica [14] o la eólica [15]. Con el notable incremento en el aprovechamiento de las energías renovables [16] en el mundo, la necesidad de almacenar el excedente de la energía generada se ha vuelto muy importante. Actualmente, los SAE son de gran importancia para proporcionar estabilidad en los sistemas de distribución (SD) en los momentos de alta o baja demanda. Por tal motivo, en el futuro se debería considerar incluir sistemas de baterías en los SD, que podrían aportar de forma considerable a la reducción del costo de la energía y al mejoramiento de ciertos indicadores de la calidad del suministro eléctrico perjudicados por una integración masiva de generación renovable con elevada variabilidad [17, 18].

Los recursos del planeta son limitados, y su obtención de la naturaleza implica muchas veces complejos procesos de ingeniería. Entonces, se necesita que todas las ingenierías que han dado vida a los VE trabajen en conjunto para encontrar la solución medioambiental más adecuada desde la construcción, mantenimiento y reciclaje de las baterías [19]. Con el objeto de contribuir al estudio de esta problemática, este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura orientada a la búsqueda de soluciones tecnológicas orientadas a la reutilización de las baterías de los VE para aplicaciones de almacenamiento energético y provisión de servicios complementarios a sistemas eléctricos de potencia que faciliten la integración masiva de generación eléctrica renovable en función de las investigaciones realizadas en el último lustro por investigadores alrededor del mundo.

2. Materiales y métodos

El proceso sistemático de prospección de fuentes literarias que nutren el contenido de esta investigación se realiza mediante la metodología de revisión bibliográfica documentada en Codina [20]. El producto final será un trabajo de revisión sistemática basado en artículos científicos de calidad publicados y que versen sobre la reutilización de las baterías de los VE. Como fuentes de consulta de recursos bibliográficos se han usado bases de datos prestigiosas como Web of Science, Scopus e IEEE Xplore. En la Figura 1 se puede observar un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento seguido

para la selección de estudios.

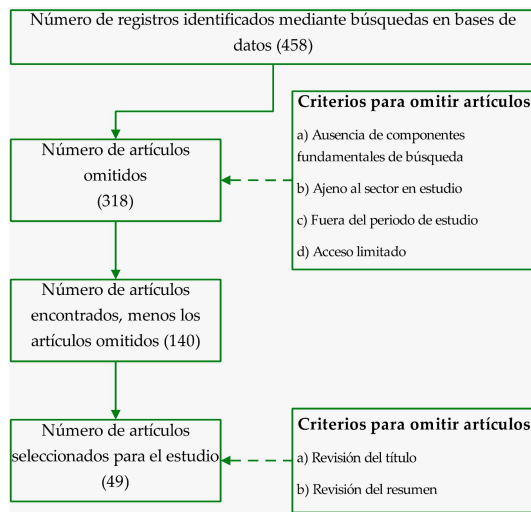


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso seguido para la selección de estudios

2.1. Criterios de inclusión

La revisión bibliográfica se basa en un rango de búsqueda entre los años 2018 y 2023 con las palabras clave: *second life electric vehicle batteries, renewable energy y grid support*. Se han elegido artículos en el idioma inglés, que tengan acceso completo online y que analicen la reutilización y/o el reciclaje de las baterías de los VE. Las bases de datos digitales consideradas en este estudio no solo son ampliamente reconocidas por su prestigio en el ámbito académico y de la investigación, sino que también son aquellas a las que muchas instituciones académicas e investigativas de todo el mundo suelen tener suscripción. Esto las convierte en fuentes de información esenciales para una amplia comunidad de investigadores, profesores y estudiantes, por lo que, la accesibilidad a tales recursos es un factor decisivo que debe contemplarse en una revisión sistemática de la literatura. En la Tabla 1 se resumen los criterios de selección empleados en la revisión sistemática.

Tabla 1. Criterios de selección de artículos

Artículo	Criterio de selección
Sector	Ingeniería eléctrica, energía renovable, tecnología sustentable
Idioma	Inglés
Fuentes	Web of Science, Scopus, IEEE Xplore
Año de publicación	2018-2023
Disponibilidad de acceso	Acceso online, texto completo
Relevancia	Reutilización de baterías de VE con energías renovables
Cadena de búsqueda	"Second life electric vehicle batteries" AND "Renewable energy" AND "Grid support"

2.2. Selección de estudios

La primera búsqueda realizada arrojó un total de 458 obras científicas. Posterior a este paso, se excluyeron 318 artículos debido a que presentaban ausencia de componentes fundamentales de búsqueda (título, resumen y palabras claves), no se encontraban dentro del periodo de estudio o su acceso era limitado, dejando un total de 140 artículos con las características mostradas en las Figuras 2 y 3. Finalmente, luego de revisar el título y el resumen de cada una de estas obras, se logró consolidar 49 artículos que servirán de insumo para el presente estudio. La selección final de este número reducido de artículos es precisamente la razón de ser de una revisión sistemática de la literatura, garantizando la calidad, pertinencia y accesibilidad de los estudios considerados.

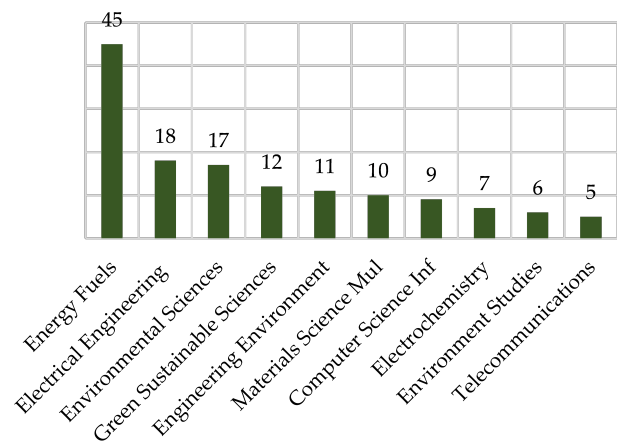


Figura 2. Clasificación de los artículos por áreas

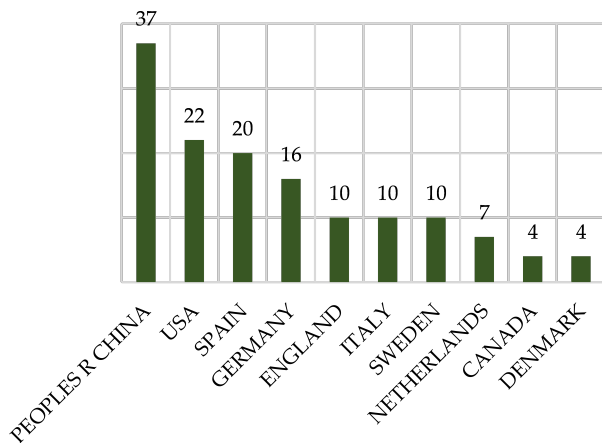


Figura 3. Clasificación de los artículos por países

2.3. Análisis bibliométrico

Una vez seleccionados los artículos que cumplen con los criterios de inclusión definidos en la sección 2.1, se pueden llevar a cabo análisis bibliométricos mediante la ayuda del programa de acceso libre VOSviewer para explorar las relaciones entre ellos y presentar un análisis gráfico que muestra los nodos representados por las palabras clave, y los enlaces o relaciones que existen entre cada artículo. La posición de los nodos en la visualización se determina por el algoritmo de agrupamiento utilizado por VOSviewer.

Una vez que se han seleccionado los artículos para el estudio, se ha procedido a importar en VOSviewer (versión 1.6.19) [21], en donde se llevó a cabo un análisis de coocurrencia para evaluar las relaciones entre los artículos en función de las palabras clave. Finalmente, se ha generado la visualización en red que ayuda a explorar y analizar patrones en la literatura científica.

La Figura 4 presenta la visualización de la red que indica cuatro grupos emergentes. Se puede observar cuatro clústeres principales asociados a *lithium-ion batteries*, *electric vehicles*, *second life* y *energy-storage*.

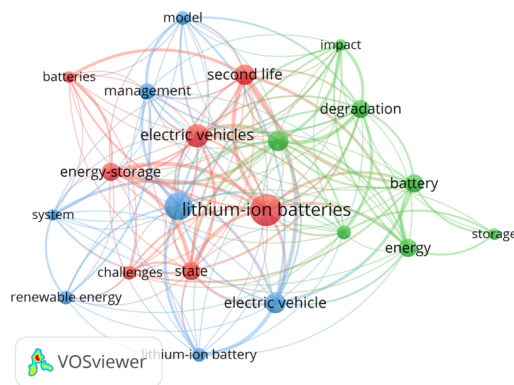


Figura 4. Red de palabras obtenida por análisis bibliométrico con el programa de acceso libre VOSviewer

3. Resultados y discusión

La Figura 5 muestra la evolución en cuanto a la existencia de material bibliográfico relativo al tema de la reutilización de las baterías de VE en el horizonte temporal considerado 2018-2023. La selección de estudios para sustentar la presente revisión sistemática reveló que desde 2018 ha ido en incremento el número de publicaciones, acentuándose este crecimiento en 2022; tendencia que parece mantenerse en 2023 dado el importante número de obras publicadas a pocos meses de haber iniciado este año. Este indicador muestra la pertinencia del tópico objeto de este estudio en la actualidad, cuyos aspectos fundamentales se irán discutiendo a lo largo de esta sección.

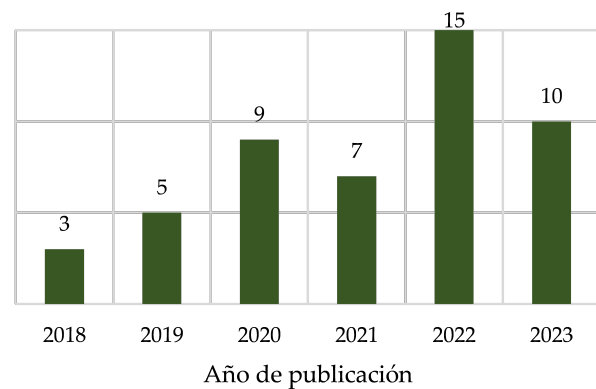


Figura 5. Clasificación por año de las publicaciones seleccionadas

A continuación, se presenta una discusión crítica basada en la revisión completa de los 49 artículos seleccionados, los cuales abordan los problemas o barreras que la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos afronta en la actualidad. Se presentan, además, algunos beneficios que la reutilización ofrece a diferentes actores, así como también los sectores interesados en brindar una segunda vida a las baterías. Finalmente, se exponen los resultados que la revisión de literatura proveyó sobre el almacenamiento de energía renovable en la segunda vida de las baterías de VE.

3.1. Barreras y beneficios sobre la reutilización de baterías de VE

En la práctica, los proyectos de reutilización de baterías de VE buscan reducir la dependencia de combustibles fósiles [1], mejorar la estabilidad de la red eléctrica, reducir los costos de energía, entre otros, y los criterios de inclusión en energías renovables pueden variar según el enfoque y los objetivos específicos del estudio o proyecto.

3.1.1. Barreras o limitaciones

- **Tipo de batería.** No todos los tipos de baterías existentes son idóneas dentro de los proyectos de reutilización. Principalmente, se reutilizarán las de iones de litio debido a que entre sus características fundamentales presentan una energía específica y una densidad de energía altas, lo que les permite trabajar en temperaturas extremas y por tiempos más prolongados, dejando de lado, por ejemplo, las de níquel-cadmio o plomo-ácido. Por otro lado, las baterías de iones de litio son fabricadas con materiales más amigables con el medioambiente [22].
- **Estado de la batería.** Se debe definir cuál es el estado de conservación y funcionamiento de una batería [8–10]. Las baterías que se encuentran en buen estado pueden ser reutilizadas con fines energéticos, mientras que las que están en mal estado pueden requerir procesos de reparación o reciclaje.
- **Escala de uso.** Es preciso delimitar la escala de uso de las baterías, es decir, si se van a utilizar para proyectos a pequeña o gran escala [5]. Esto puede influir en la elección de la tecnología de almacenamiento y en la forma en que se van a integrar las baterías en el sistema eléctrico.
- **Tecnología de almacenamiento.** Resulta necesario determinar qué tecnología de almacenamiento se va a utilizar para la reutilización de las baterías, como el almacenamiento estacionario o el móvil [23]. Cada tecnología tiene sus propias características y requerimientos, por lo que se debe considerar cuál es la más adecuada en función de los requerimientos de la aplicación final.
- **Marco regulatorio o normativo.** Debería existir un marco regulatorio y normativo que rijan la reutilización de las baterías de VE en energías renovables. Dichas regulaciones o normas podrían contemplar incentivos o subsidios. En la Unión Europea se emitieron a finales de 2022 nuevas medidas sobre el uso de las baterías que buscan ampliar el reciclaje de todo tipo de baterías, con la misma se pretende llegar a niveles de reciclaje del 45 % para 2023, 63 % para 2027 y 73 % para 2030 [24, 25]. En cambio, en España se emitió en abril del 2021 el Real Decreto 265/2021 sobre el tratamiento de los VE al final de su vida útil, y el manejo de todas sus partes [26]. Es importante este punto para que existan iniciativas de proyectos.

3.1.2. Beneficios

- **Impacto ambiental:** Se debe considerar el impacto ambiental que puede tener la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos [5] en energías renovables, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de la huella de carbono. También se debe considerar el impacto ambiental de los procesos de producción, reparación y reciclaje de las baterías.
- **Viabilidad económica:** Adquirir una batería de segunda vida siempre será menos costoso que adquirir una nueva [27], por lo tanto, se debe evaluar la viabilidad económica del proyecto, considerando los costos de adquisición, transporte, instalación y mantenimiento de las baterías, así como los ingresos que se pueden generar a través de la venta de energía.

3.2. Principales sectores interesados en la reutilización de baterías de VE

En la práctica, entre los potenciales sectores que podrían centrar su interés en la reutilización y reciclaje de estas baterías se encuentran los fabricantes de VE, ya que les permitiría reducir sus costos de producción; los propietarios de VE con conciencia ecológica, pues estarían más tranquilos al asegurarse de que se manejan adecuadamente los residuos y materiales peligrosos y, sería conveniente tener un ahorro al momento de comprar una batería nueva; las empresas de reciclaje, debido a la creciente demanda de este tipo de baterías y al aumento de los precios de las materias primas que se utilizan en su fabricación; los Gobiernos, debido a las preocupaciones ambientales y de seguridad, además, podrían fomentar la reutilización de baterías para apoyar la transición hacia una economía circular [28–30] y reducir la explotación de los recursos naturales.

Una solución para minimizar los residuos y maximizar la reutilización y el reciclaje de los recursos, es implementar una economía circular [28] en la producción y el reciclaje de las baterías de VE. Esto implica diseñar las baterías con piezas que puedan desmontarse fácilmente y reutilizarse. También significa utilizar materiales reciclados y reciclables en la producción de nuevas baterías, lo que ayudaría notablemente a reducir la huella de carbono y la necesidad de extraer y procesar materias primas de la naturaleza [27]. En la Figura 6 se puede observar una perspectiva de una economía circular de las baterías de VE.

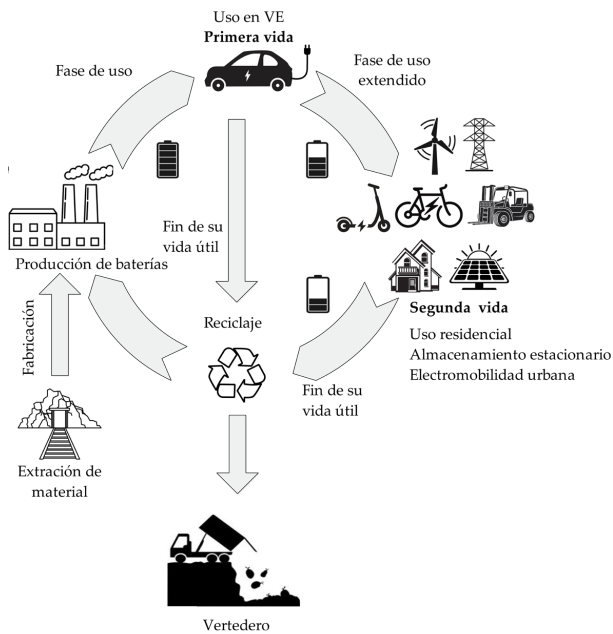


Figura 6. Perspectiva de economía circular de la vida de una batería de un VE. Ilustración modificada de [30]

3.3. Aplicaciones de la reutilización de baterías de VE en el almacenamiento de energía renovable

Los esfuerzos invertidos en la revisión literaria documentada en este artículo se han orientado mayoritariamente para exponer las principales aplicaciones de la reutilización de baterías de VE en el ámbito del almacenamiento de energía renovable en un sistema eléctrico de potencia. Al abordar el objetivo planteado del estudio y realizar una búsqueda exhaustiva basada en los criterios de inclusión, se obtuvo un total de 49 artículos para el análisis de la reutilización de baterías de VE para almacenar energía renovable. De los cuales, 26 artículos hablan sobre la segunda vida de las baterías de VE.

La capacidad de almacenamiento que aún posee una batería de un VE que ha cumplido su vida útil, y la lucha contra el calentamiento global y la contaminación ambiental, están impulsando el desarrollo de tecnologías eficientes y alternativas de aplicaciones de segunda vida de una batería de VE [31].

Con la expansión de las energías renovables en todo el mundo, es necesario disponer de sistemas de almacenamiento de energía [32], y el uso de baterías de segunda vida de VE se plantea como una de las soluciones viables.

El almacenamiento de energía estacionaria [23], caracterizado por emplear un banco de baterías de VE en plataformas emplazadas en una determinada superficie fija, es una de las aplicaciones más comunes para reutilizar las baterías de VE, especialmente, de energía

proveniente de fuentes renovables como pueden ser la solar fotovoltaica y la eólica [33]. Dicha energía podría ser usada para cubrir la demanda en momentos en que la generación sufre variaciones apreciables debido a las características intermitentes del recurso solar o del viento, ya sea inyectando energía a la red, o, de manera directa, entregando los excedentes energéticos a los usuarios para cubrir su demanda total o parcial. Los usuarios tendrían que representar una carga considerable para justificar la implementación de los sistemas de almacenamiento, como la incorporación de sistemas de baterías en edificios [34–36] o en centros educativos. Un ejemplo real de esta aplicación es la instalación de paneles solares y baterías en las escuelas primarias en Kenia [37].

Para los usuarios residenciales, su bajo consumo implica un ahorro reducido de emplearse sistemas de almacenamiento, razón por la cual, no es viable su instalación, a menos que se trate de instalaciones que sirvan a comunidades [38]. Otra aplicación real publicada como caso de estudio se ha centrado en un sistema colectivo de cuatro viviendas. Se analizó durante una semana el comportamiento del consumo eléctrico con la incorporación de un sistema de almacenamiento con baterías de segunda vida de VE, integrada con un sistema fotovoltaico. Se obtuvo como resultado una tasa de autoconsumo del 69 %, y una reducción del pico máximo de potencia de 10.8 a 6.9 kW [39].

Se estima que de los VE vendidos hasta el 2020, se tendrá una capacidad de almacenamiento de baterías retiradas para el 2028 de entre 120 y 549 GWh. Esta disponibilidad puede aprovecharse en la implementación de proyectos de pequeñas redes rurales descentralizadas y autónomas, aportando al desarrollo de comunidades rurales en países en desarrollo [40].

Una investigación ejecutada en la isla de Tenerife, España, estima que se podría recolectar hasta 83.2 MWh para el 2031, mediante el uso de baterías de VE de segunda vida puestas al servicio de la generación eólica [5]. Un estudio vinculado con parques eólicos ha realizado un modelo de despacho de energía económico estocástico de energía renovable a nivel de los MW, basados en los datos de las baterías de la NASA, que ha evaluado las condiciones de temperatura y corrientes de carga y descarga a las que están sometidas las baterías de un sistema de potencia de diez unidades de generación [41].

Un estudio realizado en California, Estados Unidos, demostró que económicamente es más favorable un proyecto con baterías de segunda vida en comparación a uno que contemple baterías nuevas en un proyecto combinado de energía fotovoltaica [27]. En la Universidad de Davis de California, se diseñó y construyó una microrred para investigar la eficacia de las baterías de segunda vida de VE en conjunto con una generación fotovoltaica a escala comercial. Los resultados del primer estudio realizado durante un año afirman que

las baterías de VE ayudan a reducir la cargabilidad de una red eléctrica y brindan estabilidad en horas pico, respaldando la reutilización de baterías de VE [42]. En California se estima que para el año 2050 la energía almacenada por sistemas de baterías de segunda vida de VE, representaría 15 TWh por año, que a su vez equivale al 5 % de la energía usada actualmente [32].

Una aplicación innovadora y sostenible para las baterías de segunda vida de los VE, son las estaciones de carga rápida para VE, en donde las baterías obtienen energía de fuentes renovables para luego suministrarla a los VE [43,44]. En China se utilizaron baterías usadas de VE como respaldo para una estación de comunicaciones, bajo un estudio técnico económico que respalda su uso [45].

Las baterías de VE reutilizadas en el almacenamiento estacionario pueden contribuir para estabilizar la frecuencia de los sistemas eléctricos [9], sobre todo, en aquellos donde hay un elevado porcentaje de penetración de energías renovables no convencionales; o en sistemas débiles como los insulares. La frecuencia del sistema eléctrico depende de la variabilidad de la carga, cuando la demanda de energía aumenta, la frecuencia del sistema eléctrico disminuye, y viceversa. En estos sistemas, las baterías cumplen un papel importante, regulando dicha variabilidad que existe entre la demanda y la generación, aportando energía al sistema cuando la demanda crece, y almacenando el excedente de generación en horas de baja demanda. Todo esto reduciría la necesidad de fuentes de generación fósil, aportando notablemente hacia un escenario de reducción de las emisiones de carbono.

Otra aplicación interesante es el alisamiento de potencia (o *power smoothing*, en inglés), que se refiere a la técnica utilizada para reducir las fluctuaciones en la producción de energía eléctrica [46,47]. Su objetivo es mejorar la calidad y la estabilidad de la fuente de energía, lo que es fundamental para sectores como la industria o la salud, donde un corte del suministro eléctrico podría provocar grandes pérdidas con graves consecuencias para la salud humana. Existen diferentes métodos para realizar maniobras de *power smoothing* en sistemas de generación eléctrica, algunas incluyen el uso de baterías u otros sistemas de almacenamiento de energía, el uso de convertidores de energía o la implementación de sistemas de control y monitoreo avanzados [48,49]. El *power smoothing*, mediante el uso de baterías de VE, emplea de manera óptima las baterías de segunda vida de VE como sistemas de almacenamiento estacionario de energía [50,51], por medio de las cuales se reducen las fluctuaciones en la producción de energía eléctrica. Esta aplicación es particularmente útil en la generación de energía renovable, como la energía eólica o la solar [48], [52,53], donde la producción de energía se modela estocásticamente y varía según las condiciones climáticas. Esta técnica no solo ayuda a mejorar la calidad y la estabilidad de

la fuente de energía, sino que también es una solución rentable y sostenible para la reutilización de baterías usadas de VE [54].

La aplicación del almacenamiento de energía móvil contempla por su parte, el uso de baterías de segunda vida para vehículos eléctricos más pequeños. Esta aplicación puede hacer más sostenible la electromovilidad urbana y reducir las emisiones de carbono hacia el medioambiente [23].

4. Conclusiones

Este estudio presenta los resultados obtenidos al aplicar una metodología de revisión sistemática de la literatura científica relacionada con la reutilización de baterías de vehículos eléctricos (VE). Para llevar a cabo esta revisión, se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos reconocidas, incluyendo Web of Science, Scopus e IEEE Xplore. En la etapa inicial, se identificaron un total de 458 documentos científicos relevantes. Sin embargo, después de un proceso de exclusión que consideró criterios como la disponibilidad de componentes clave en la búsqueda, la accesibilidad de los documentos y la inclusión dentro del período de estudio (2018-2023), se obtuvo un conjunto final de 140 artículos. Finalmente, tras una minuciosa revisión de títulos y resúmenes, se seleccionaron cuidadosamente 49 artículos que sirvieron como base para el estudio documentado en esta obra.

Los resultados muestran que, en el último lustro, existe un crecimiento sostenido de obras científicas publicadas en revistas indexadas que abordan el concepto de segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos para brindar soporte energético a los sistemas eléctricos de potencia que integran generación renovable no convencional.

La reutilización de baterías de vehículos eléctricos, tiene un significativo potencial para reducir la huella de carbono de la industria de transporte, contribuir a la descarbonización de las matrices energéticas, así como también brindar soporte en la estabilidad y calidad de la energía de los sistemas eléctricos. Por esta razón, la investigación y el desarrollo en este campo deben seguir avanzando para incrementar la eficiencia energética de los sistemas de generación que aprovechan energías renovables no convencionales. Llegar a un sistema de economía circular en el que se reutilicen las baterías de vehículos eléctricos en diferentes aplicaciones, extendiendo su vida útil al máximo, debe ser el objetivo ulterior. Esto permitirá reducir la necesidad de baterías nuevas, y a su vez disminuirá el impacto ecológico de los procesos de extracción de materias primas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Micro-Red del Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B), gestión que ha sido indispensable para la realización y culminación de este trabajo. Los hallazgos reportados en este artículo forman parte de las actividades ejecutadas en el proyecto titulado Movilidad Eléctrica: retos, limitaciones y plan de implementación en el régimen especial de la provincia de Galápagos, enfocada en el desarrollo sostenible y su factibilidad en la ciudad de Cuenca, codirigido por el autor D. Ochoa-Correa, en el marco del II Concurso de Proyectos de Investigación-Vinculación, organizado por el Vicerrectorado de Investigación y la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca.

Referencias

- [1] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. Tripathi, "Storage technologies for electric vehicles," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, 2020, special Issue: Clean Alternative Fuels for Transport Vehicles. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>
- [2] C. Peña Ordóñez and J. Pleite Guerra, *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/46ka8Jd>
- [3] W. Wu, B. Lin, C. Xie, R. J. Elliott, and J. Radcliffe, "Does energy storage provide a profitable second life for electric vehicle batteries?" *Energy Economics*, vol. 92, p. 105010, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105010>
- [4] J. Zhu, I. Mathews, D. Ren, W. Li, D. Cogswell, B. Xing, T. Sedlatschek, S. N. R. Kantareddy, M. Yi, T. Gao, Y. Xia, Q. Zhou, T. Wierzbicki, and M. Z. Bazant, "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries," *Cell Reports Physical Science*, vol. 2, no. 8, p. 100537, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>
- [5] A. López, A. Ramírez-Díaz, I. Castilla-Rodríguez, J. Gurriarán, and J. Méndez-Pérez, "Wind farm energy surplus storage solution with second-life vehicle batteries in isolated grids," *Energy Policy*, vol. 173, p. 113373, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113373>
- [6] Y. Li, S. Arnold, S. Husmann, and V. Presser, "Recycling and second life of mxene electrodes for lithium-ion batteries and sodium-ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, p. 106625, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106625>
- [7] D. Galatro, D. A. Romero, C. Da Silva, O. Trescases, and C. H. Amon, "Impact of cell spreading on second-life of lithium-ion batteries," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 101, no. 3, pp. 1114–1122, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cjce.24570>
- [8] C. H. Illa Font, H. V. Siqueira, J. E. Machado Neto, J. L. Ferreira dos Santos, S. L. Stevan, A. Converti, and F. C. Corrêa, "Second life of lithium-ion batteries of electric vehicles: A short review and perspectives," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 953, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en16020953>
- [9] L. Janota, T. Králík, and J. Knápek, "Second life batteries used in energy storage for frequency containment reserve service," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6396, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13236396>
- [10] M. Shahjalal, P. K. Roy, T. Shams, A. Fly, J. I. Chowdhury, M. R. Ahmed, and K. Liu, "A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues," *Energy*, vol. 241, p. 122881, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122881>
- [11] E. Braco, I. San Martín, P. Sanchis, and A. Ursúa, "Fast capacity and internal resistance estimation method for second-life batteries from electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 329, p. 120235, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120235>
- [12] M. F. Börner, M. H. Frieges, B. Späth, K. Spütz, H. H. Heimes, D. U. Sauer, and W. Li, "Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries," *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, no. 10, p. 101095, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101095>
- [13] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>
- [14] J. Pastuszak and P. Węgierek, "Photovoltaic cell generations and current research directions for their development," *Materials*, vol. 15, no. 16, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma15165542>

- [15] P. Pijarski, M. Wydra, and P. Kacejko, "Optimal control of wind power generation," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 9–18, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12913/22998624/81448>
- [16] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development," *Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 912–919, 2007, third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017>
- [17] S. Chai, N. Z. Xu, M. Niu, K. W. Chan, C. Y. Chung, H. Jiang, and Y. Sun, "An evaluation framework for second-life EV/PHEV battery application in power systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 152 430–152 441, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3126872>
- [18] D. Ochoa, E. Villa, V. Iñiguez, C. Larco, and R. Sempértégui, "Uso de supercondensadores para brindar soporte de frecuencia en una microrred aislada," *RTE*, vol. 34, no. 4, pp. 174–185, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.961>
- [19] N. Horesh, C. Quinn, H. Wang, R. Zane, M. Ferry, S. Tong, and J. C. Quinn, "Driving to the future of energy storage: Techno-economic analysis of a novel method to recondition second life electric vehicle batteries," *Applied Energy*, vol. 295, p. 117007, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117007>
- [20] L. Codina, "Cómo hacer revisiones bibliográficas tradicionales o sistemáticas utilizando bases de datos académicas," *ORRL*, vol. 11, no. 2, pp. 139–153, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14201/orl.22977>
- [21] N. Jan van Eck and L. Waltman, *VOSviewer Manual*. Universiteit Leiden, Meaningful metrics, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3R2P8lF>
- [22] T. Montes, M. Etxandi-Santolaya, J. Eichman, V. J. Ferreira, L. Trilla, and C. Corchero, "Procedure for assessing the suitability of battery second life applications after EV first life," *Batteries*, vol. 8, no. 9, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries8090122>
- [23] H. S. Hayajneh, M. Lainfiesta Herrera, and X. Zhang, "Design of combined stationary and mobile battery energy storage systems," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 12, pp. 1–21, 12 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260547>
- [24] E. Commission, *Concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*. EU Monitor, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MO2obv>
- [25] Parlamento Europeo, *Nuevas medidas europeas para que las baterías sean más sostenibles y éticas*. Parlamento Europeo, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MMtobs>
- [26] M. de la Presidencia, *Real Decreto 265/2021 Reglamento General de Vehículos*. Agencia Estatal Boletín General del Estado, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/47nefb2>
- [27] I. Mathews, B. Xu, W. He, V. Barreto, T. Buonassisi, and I. M. Peters, "Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging," *Applied Energy*, vol. 269, p. 115127, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115127>
- [28] J. Ahuja, L. Dawson, and R. Lee, "A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change," *Journal of Property, Planning and Environmental Law*, vol. 12, no. 3, pp. 235–250, Jan 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/JPPPEL-02-2020-0011>
- [29] B. M. Sopha, D. M. Purnamasari, and S. Ma'mun, "Barriers and enablers of circular economy implementation for electric-vehicle batteries: From systematic literature review to conceptual framework," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14106359>
- [30] Y. Kotak, C. Marchante Fernández, L. Canals Casals, B. S. Kotak, D. Koch, C. Geisbauer, L. Trilla, A. Gómez-Núñez, and H.-G. Schweiger, "End of electric vehicle batteries: Reuse vs. recycle," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14082217>
- [31] S. I. Sun, A. J. Chipperfield, M. Kiaee, and R. G. Wills, "Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 19, pp. 41–51, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.06.012>
- [32] R. Sathre, C. D. Scown, O. Kavvada, and T. P. Hendrickson, "Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in california through 2050," *Journal of Power Sources*, vol. 288, pp. 82–91, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.097>

- [33] J. Mendoza-Vizcaíno, A. Sumper, A. Sudria-Andreu, and J. Ramírez, “Renewable technologies for generation systems in islands and their application to Cozumel island, Mexico,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 348–361, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.014>
- [34] L. Canals Casals, M. Barbero, and C. Corchero, “Reused second life batteries for aggregated demand response services,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 99–108, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.005>
- [35] J. Thakur, C. Martins Leite de Almeida, and A. G. Baskar, “Electric vehicle batteries for a circular economy: Second life batteries as residential stationary storage,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 375, p. 134066, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134066>
- [36] F. Salek, A. Azizi, S. Resalati, P. Henshall, and D. Morrey, “Mathematical modelling and simulation of second life battery pack with heterogeneous state of health,” *Mathematics*, vol. 10, no. 20, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math10203843>
- [37] N. Kebir, A. Leonard, M. Downey, B. Jones, K. Rabie, S. M. Bhagavathy, and S. A. Hirmer, “Second-life battery systems for affordable energy access in kenyan primary schools,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 1374, Jan 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28377-7>
- [38] L. Colarullo and J. Thakur, “Second-life EV batteries for stationary storage applications in local energy communities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112913, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112913>
- [39] A. Soto, A. Berrueta, P. Zorrilla, A. Iribarren, D. H. Castillo, W. E. Rodríguez, A. J. Rodríguez, D. T. Vargas, I. R. Matías, P. Sanchis, and A. Ursúa, “Integration of second-life battery packs for self-consumption applications: analysis of a real experience,” in *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584809>
- [40] H. Ambrose, D. Gershenson, A. Gershenson, and D. Kammen, “Driving rural energy access: a second-life application for electric-vehicle batteries,” *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 9, p. 094004, sep 2014. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/094004>
- [41] S. Hu, H. Sun, F. Peng, W. Zhou, W. Cao, A. Su, X. Chen, and M. Sun, “Optimization strategy for economic power dispatch utilizing retired EV batteries as flexible loads,” *Energies*, vol. 11, no. 7, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11071657>
- [42] J. Lacap, J. W. Park, and L. Beslow, “Development and demonstration of micro-grid system utilizing second-life electric vehicle batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 41, p. 102837, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102837>
- [43] L. C. Casals, B. Amante García, and C. Canal, “Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis,” *Journal of Environmental Management*, vol. 232, pp. 354–363, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>
- [44] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, and A. Piccolo, “Battery second-life for dedicated and shared energy storage systems supporting EV charging stations,” *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics9060939>
- [45] C. Zhu, J. Xu, K. Liu, and X. Li, “Feasibility analysis of transportation battery second life used in backup power for communication base station,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2017, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080810>
- [46] J. W. Shim, H. Kim, and K. Hur, “Incorporating state-of-charge balancing into the control of energy storage systems for smoothing renewable intermittency,” *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en12071190>
- [47] S.-S. Shin, J.-S. Oh, S.-H. Jang, J.-H. Cha, and J.-E. Kim, “Active and reactive power control of ESS in distribution system for improvement of power smoothing control,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 1007–1015, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.3.1007>
- [48] M. Lei, Z. Yang, Y. Wang, H. Xu, L. Meng, J. C. Vásquez, and J. M. Guerrero, “An MPC-based ESS control method for PV power smoothing applications,” *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 2136–2144, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2694448>
- [49] J.-C. Wu, H.-L. Jou, W.-C. Wu, and C.-H. Chang, “Solar power generation system with power smoothing function,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 29 982–29 991, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3159801>
- [50] A. Zulueta, D. A. Ispas-Gil, E. Zulueta, J. García-Ortega, and U. Fernández-Gamiz, “Battery sizing optimization in power smoothing applications,” *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15030729>
- [51] D. Benavides, P. Arévalo, J. A. Aguado, and F. Jurado, “Experimental validation of a novel power smoothing method for on-grid photovoltaic systems using supercapacitors,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 149, p. 109050, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109050>
- [52] Y. Zhu, H. Zang, L. Cheng, and S. Gao, “Output power smoothing control for a wind farm based on the allocation of wind turbines,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app8060980>
- [53] A. Atif and M. Khalid, “Savitzky–golay filtering for solar power smoothing and ramp rate reduction based on controlled battery energy storage,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 33 806–33 817, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973036>
- [54] X. Li, D. Hui, and X. Lai, “Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2247428>