

Panorama del ciclo de vida de las baterías para vehículos eléctricos Overview of the life cycle of electric vehicle batteries

A.J. Martínez-Luna ^a, O. Aguilar-Mejía ^{a,*}, H. Minor-Popocatl ^b, A. Valderrabano-Gonzalez ^c, C. Enríquez-Ramírez ^d,
M.A. Andrade-Soto ^e

^aÁrea Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bFaculty of Industrial and Automotive Engineering, UPAEP University- CONCYTEP, 72410 Puebla, PUE, México.

^cFacultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Álvaro del Portillo 49, Zapopan 45010, Mexico.

^dUniversidad Politécnica de Tulancingo, Tulancingo, Hidalgo, 43628, México.

^eFacultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León 66451, México.

Resumen

Este trabajo presenta una revisión sistemática del ciclo de vida y estrategias técnicas para la optimización del reciclaje de las baterías para vehículos eléctricos. Se buscaron estudios relevantes publicados entre 2019 y abril de 2025 en publicaciones científicas indexadas en base de datos relevantes. Los datos se organizaron y analizaron con base en indicadores cuantitativos y cualitativos relacionados con los métodos de reciclaje, remanufactura, esquemas de optimización para reducir costos operativos, el impacto ambiental y los beneficios sociales cuando se implementan políticas públicas definidas por el gobierno en diferentes países. Además, se exploran metodologías actuales para optimizar la gestión de estas baterías, incluyendo la recuperación de materiales y la reducción de costos. Se describen diferentes políticas gubernamentales e innovaciones tecnológicas que facilitan el reciclaje de baterías, y se destacan los beneficios a largo plazo. La investigación concluye que las baterías recicladas tienen un gran potencial para reutilizarse en aplicaciones dentro de hogares y pequeñas micro redes eléctricas.

Palabras Clave:

Reciclaje de baterías, ciclo de vida, baterías eléctricas, sostenibilidad ambiental.

Abstract

This work presents a systematic review of the life cycle and technical strategies for the optimization of recycling used in lithium-ion batteries for electric vehicles. Relevant studies published between 2019 and April, 2025, in indexed scientific publications were sought. The data were organized and analyzed based on quantitative and qualitative indicators related to recycling methods, optimization schemes to reduce operating costs, environmental impact, and social benefits when public policies defined by the government are implemented in different countries. Additionally, current methodologies are explored to optimize the management of these batteries, including material recovery and cost reduction. Different government policies and technological innovations that facilitate battery recycling are described, and the long-term benefits are highlighted. The research concludes that recycled batteries have great potential for reuse in applications within homes and smart grids.

Keywords: Battery recycling, life cycle, electric batteries, environmental sustainability..

1. Introducción

Debido al calentamiento global, el aumento de la contaminación urbana en las principales ciudades del mundo y además la escasez de combustibles fósiles volviéndose cada vez más graves, muchos países de todo el mundo están an-

siosos por reemplazar los vehículos de combustible tradicionales con vehículos de que usen otros combustibles para aliviar la crisis de recursos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Burger *et al.*, 2022). En este contexto, los vehículos impulsados con energías alternas han generado importantes oportunidades de desarrollo, y varios países han

* Autor para correspondencia: omar_aguilar@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ma508369@uaeh.edu.mx (Axel Jacob Martínez Luna), omar_aguilar@uaeh.edu.mx (Omar Aguilar-Mejía), hertwin.minor@upaep.mx (Hertwin Minor-Popocatl), avalder@up.edu.mx (Antonio Valderrabano-Gonzalez), carlos.enriquez@upt.edu.mx (Carlos Enríquez-Ramírez), manuel.andrade@uanl.edu.mx (Manuel Antonio Andrade Soto).

Historial del manuscrito: recibido el 03/07/2025, última versión-revisada recibida el 19/10/2025, aceptado el 16/10/2025, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15376>



lanzado una serie de planes de promoción del mercado para la electrificación del transporte usando baterías eléctricas para almacenar la energía requerida por los motores eléctricos (Krause *et al.*, 2020). Mercedes-Benz ha anunciado que todos sus vehículos estarán electrificados para 2030 (Achillas e Iosifidou, 2024). En 2020, las ventas globales de vehículos eléctricos fueron de 3.952 millones, y se prevé que alcancen los 10 millones, 28 millones y 56 millones en 2025, 2030 y 2040, respectivamente (Chang *et al.*, 2022).

Además, esta tendencia es impulsada por políticas globales, como la estrategia de China para alcanzar la neutralidad de carbono para 2060, y el aumento proyectado en ventas de vehículos eléctricos, que se estima llegarán a 18 millones de unidades en 2025 con una tasa compuesta anual del 29% (Zhang *et al.*, 2024a). Entre las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, las baterías de iones de litio se posicionan como los dispositivos más prometedores para aplicaciones en vehículos eléctricos debido a su alta densidad de potencia de almacenamiento de energía y eficiencia de operación. Sin embargo, la vida útil o su ciclo de vida sigue siendo un indicador crítico que determina su desempeño y seguridad en el uso práctico. Diversos factores tanto internos (la formación de una capa de interfase de electrolito sólido y la degradación del ánodo y cátodo) como externos (temperatura de operación, periodos de carga/descarga y la inconsistencia entre celdas) afectan considerablemente la duración y seguridad de las baterías (Yang *et al.*, 2022; Faraz *et al.*, 2021). El auge de la movilidad eléctrica en los últimos años ha provocado un aumento considerable en la demanda de baterías para vehículos eléctricos (BEV), particularmente aquellas de iones de litio, que son esenciales para la eficiencia energética de estos vehículos. Este cambio ha generado un creciente interés por abordar el reciclaje y la optimización de los periodos de carga y descarga. El reciclaje de BEV no solo juega un papel fundamental en la sostenibilidad ambiental, sino también en la reducción de la dependencia de recursos naturales y la disminución de residuos peligrosos.

En este contexto, diversas investigaciones han explorado cómo los algoritmos de optimización pueden extender la vida útil de las BEV, maximizando su uso en aplicaciones secundarias (Syré *et al.*, 2024). La implementación de un modelo de economía circular para la reutilización y reciclaje de BEV ofrece múltiples beneficios, tanto económicos como medioambientales, al mismo tiempo que contribuye a la creación de una infraestructura más sostenible para la transición hacia una movilidad eléctrica sustentable (Kallitsis *et al.*, 2022). A lo largo de los últimos años, los costos de las BEV han mostrado una tendencia a la baja, lo que ha impulsado la adopción masiva de estos vehículos. Desde 2018, los costos de las baterías de iones de litio han experimentado una disminución significativa, pasando de un costo de aproximadamente 300-350 USD por kWh en 2018 a menos de 150 USD por kWh en 2024. Este descenso en los precios ha sido el resultado de varias innovaciones tecnológicas, economías de escala y el aumento de la producción de baterías en todo el mundo. Se estima que en 2023, los precios de las baterías rondaron los 170-200 USD por kWh, y en 2024, el costo estimado ha caído a un rango de 140-160 USD por kWh.

Estas reducciones en los costos no solo han hecho que los

vehículos eléctricos sean más accesibles, sino que también han incrementado su competitividad frente a los vehículos con motores de combustión interna, acelerando la transición hacia la movilidad eléctrica (Zheng y Xu, 2023). A pesar de los avances tecnológicos en el reciclaje de BEV, los métodos de gestión afrontaron múltiples barreras para su implementación a gran escala. Esto ha generado un debate continuo sobre cómo mejorar la eficiencia de los procesos de reciclaje, utilizando nuevas tecnologías como la inteligencia artificial para optimizar los sistemas de recogida y reciclaje. En particular, la optimización de los algoritmos de carga y descarga puede tener un impacto significativo en la prolongación de la vida útil de las BEV, lo que permitirá su uso durante más tiempo y reducirá el volumen de desechos generados (Fargnoli *et al.*, 2024).

La creciente adopción de vehículos eléctricos (VE) ha resaltado la necesidad urgente de una infraestructura adecuada para la carga y el reciclaje de baterías. El ciclo de vida de las baterías de iones de litio se ve afectado por varios factores, incluyendo la eficiencia de los sistemas de carga, la degradación de los materiales de la batería y la gestión de residuos (Arif *et al.*, 2021). La investigación sobre el ciclo de vida de estas baterías ha cobrado relevancia debido a los impactos ambientales y económicos asociados con su producción y disposición final. Esta tendencia ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías y políticas que buscan mitigar estos efectos y optimizar el uso de las BEV a lo largo de su vida útil (Burchart-Korol *et al.*, 2020).

La vida útil de las BEV está estrechamente relacionada con la manera en que se gestiona su operación durante su ciclo de vida. Los estudios sobre el impacto ambiental y la optimización del rendimiento de estas baterías han demostrado que los procesos de reciclaje son esenciales para minimizar los efectos negativos de las baterías usadas. Las estrategias para mejorar la eficiencia en los procesos de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos y presenta un enfoque integral para la gestión de las baterías al final de su vida útil, desde la recolección hasta la reutilización de los materiales (Shu *et al.*, 2021). El reciclaje y la reutilización de baterías de vehículos eléctricos no solo reducen los costos de producción, sino que también se planteó disminuir la huella de carbono de la industria automotriz. Por lo tanto, se presenta la necesidad de definir políticas definidas y transparentes para garantizar el reciclaje de las BEV al final de su vida útil. A través de una combinación de avances tecnológicos y normativas gubernamentales, se espera fomentar un entorno más sostenible que maximice la reutilización de materiales y reduzca la dependencia de la minería de recursos críticos (Zhu *et al.*, 2024). El reciclaje de las BEV ha ganado importancia, no solo por su impacto ambiental, sino también por los beneficios económicos que puede aportar. Por lo cual, el reciclaje de las baterías de iones de litio puede contribuir a reducir los costos asociados con la extracción de materiales raros y la producción de nuevas baterías. Además, las políticas gubernamentales pueden ayudar a fomentar la inversión en tecnologías de reciclaje y acelerar la transición hacia una economía circular en la industria automotriz (Zhao y Burke, 2022; Zhu *et al.*, 2024).

Debido a la complejidad de los procesos de degradación y

la variabilidad en condiciones operativas, el estudio y la predicción precisa de la vida útil y el estado de salud de las baterías (SOH) se han convertido en un foco central de muchas investigaciones en los últimos años. Por lo cual, se han desarrollado diversos métodos para la estimación del SOH y la vida útil restante (RUL), que incluyen enfoques basados en bases de datos, modelos matemáticos y métodos híbridos que combinan ambas estrategias. Esta revisión sistemática de la literatura (RSL) apunta a analizar las diferentes estrategias que se utilizan en diferentes enfoques en el desarrollo de baterías más duraderas y seguras para vehículos eléctricos (Xiao *et al.*, 2022; Arif *et al.*, 2021; Di Rienzo *et al.*, 2023). Además, la complejidad de la composición de las BEV porque incluyen metales pesados como níquel (Ni), cobalto (Co) y manganeso (Mn), junto con electrolitos orgánicos de bajo punto de inflamación, plantea importantes riesgos ambientales y para la salud humana si no se manejan adecuadamente al momento de su desecho. Esta composición hace imprescindible el desarrollo de tecnologías eficientes y seguras para el reciclaje, dado que un manejo inadecuado puede generar contaminación y riesgos de seguridad durante la manipulación y transporte de baterías retiradas. Por ello, las baterías son clasificadas como productos peligrosos, y su transporte requiere vehículos autorizados, lo cual incrementa los costos de logística y representa un obstáculo significativo para la cadena de reciclaje.

La integración de una plataforma de reciclaje inteligente basada en big data se utiliza como una solución para superar estos retos, facilitando la trazabilidad, mejorando la gestión y reduciendo riesgos asociados al proceso de reciclaje (Yu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2023; Tavana *et al.*, 2024). Ahora bien, el proceso de reciclar de baterías de vehículos eléctricos con materiales críticos como litio, cobalto y níquel tiene un gran valor económico. La valorización de estos elementos mediante técnicas de reutilización y recuperación eficientes contribuye a aumentar la rentabilidad del proceso de reciclaje y promueve la sostenibilidad del sector. La implementación de tecnologías avanzadas, como big data para la recopilación y análisis de información durante todo el ciclo de vida de la batería, posibilita la optimización logística y la toma de decisiones inteligentes, reduciendo costos operativos y estimulando la transformación industrial hacia modelos más sostenibles. Este enfoque integra múltiples etapas del proceso de reciclaje, desde la generación de residuos hasta la reutilización de materiales, ampliando las oportunidades para todos los actores involucrados en la cadena industrial (Li *et al.*, 2019b; Xu *et al.*, 2023).

Por lo tanto, diversos países como China y la unión europea están utilizando redes de colaboración de logística inversa para el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos, para enfrentar los desafíos ambientales, económicos y sociales asociados con el rápido crecimiento de estos vehículos. Dentro de los procesos definidos, considera la clasificación de baterías en diferentes categorías según su rendimiento, así como aspectos como la apertura, reapertura y expansión de instalaciones de reciclaje, lo que permite una gestión más eficiente y adaptable del proceso de reciclaje. De esta manera, buscas minimizar los costos totales de la red y reducir los impactos negativos derivados del manejo inadecuado de resi-

duos electrónicos, garantizando al mismo tiempo la seguridad y la protección ambiental (Akram y Abdul-Kader, 2021; Mu *et al.*, 2023; Tan *et al.*, 2023).

2. Metodología

En la Figura 1 se muestran las tres fases implementadas para seleccionar los estudios usados en esta RSL y el número de estudios considerados en cada fase. La estrategia de búsqueda para realizar la RSL abarcó diversas palabras clave y publicaciones de investigación en revistas indexadas de los últimos cinco años. Se usaron básicamente tres bases de datos y se limitó a realizar la búsqueda de artículos indexados en el JCR que deberían arrojar resultados relevantes que respondan las preguntas de investigación, que se describen en la Tabla 1 y que cumplan con los criterios de inclusión de la Tabla 2. Además, la inclusión de tres perspectivas sectoriales facilitó la recopilación de investigaciones sobre diversas aplicaciones de baterías de litio. El proceso para realizar la búsqueda para las tres dimensiones de las BEV se centró en la revisión bibliográfica de artículos de investigación publicados entre 2019 y al primer cuatrimestre del 2025.

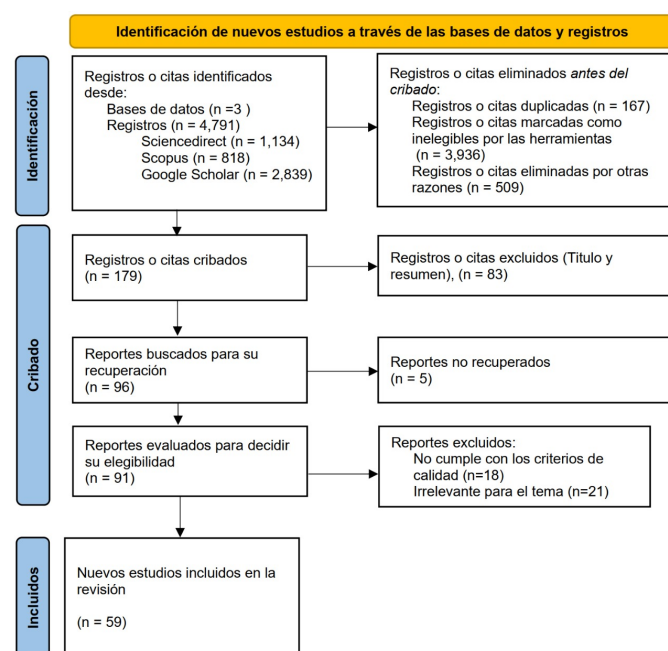


Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento de revisión sistemática fundamentado en el proceso de PRISMA 2020.

La búsqueda de literatura se realizó en las bases de datos ScienceDirect, MDPI, Scopus y Google Scholar. La selección de estos motores de búsqueda se basó en su prestigio internacional, amplia cobertura de revistas indexadas de alto impacto y su complementariedad: Scopus ofrece un amplio espectro multidisciplinario con herramientas de análisis robustas, ScienceDirect proporciona acceso a una colección profundamente especializada en ciencias e ingeniería, y Google Scholar permite capturar literatura gris, tesis y publicaciones emergentes que podrían no estar indexadas aún en las otras bases. Para minimizar el sesgo de publicación y garantizar la exhaustividad, la estrategia de búsqueda se diseñó utili-

zando una combinación de palabras clave en inglés ("battery recycling", "electric vehicle battery optimization", "battery life cycle", "sustainable battery management", y "public policies on battery recycling"), las cuales se aplicaron de forma sistemática en las tres plataformas. Además, se emplearon cadenas de búsqueda con operadores booleanos (AND, OR) y se revisaron las listas de referencias de los artículos clave para identificar estudios relevantes no capturados inicialmente. La búsqueda se estructuró en torno a tres áreas centrales para las baterías de vehículos eléctricos (BEV): optimización, ciclo de vida y reciclado, incluyendo también los pilares de la Logística 4.0 como enfoque de optimización (Tripathy et al., 2023). (Tripathy *et al.*, 2023).

La rigurosidad de la RSL dependió de la variedad y profundidad de la literatura incluida. Incluso con criterios de búsqueda cuidadosos y sistemáticos, posiblemente se hayan pasado por alto algunos estudios importantes, ya que se limita a artículos de investigación publicados y no incluye otros tipos de trabajos, como actas de congresos o informes técnicos. Además, puede haber estudios relevantes que no utilicen las palabras clave exactas incluidas en el protocolo de búsqueda, lo que podría resultar en la omisión de resultados importantes. Por lo tanto, puede ser útil incluir palabras clave adicionales o realizar una búsqueda manual de la literatura para garantizar que se incluyan todos los estudios relevantes. Considerando el estatus relativamente consolidado de la tecnología de baterías de iones de litio para las BEV en comparación con las de litio-aire, litio-metal, se realiza una meticulosa búsqueda bibliográfica de para analizar la optimización del ciclo de vida de las BEV. Específicamente, la búsqueda se centró en los años 2020-2025 para la investigación de baterías de iones de litio con objetivo era comprender mejor el ciclo de vida de las baterías de iones de litio utilizando conjuntos de datos de publicaciones recientes y actualizadas. Se excluyeron artículos publicados que no estuvieran enfocados específicamente en baterías de vehículos eléctricos, o que no incluyeran información relevante sobre reciclaje, optimización o ciclo de vida.

Tabla 1: Preguntas de Investigación relacionadas con el reciclaje y reutilización de las BEV

Item	Pregunta de investigación
PI.1	¿Cuáles son los desafíos técnicos y económicos en la reutilización de baterías para aplicaciones de almacenamiento de energía?
PI.2	¿Cómo pueden las estrategias de optimización reducir los costos de operación del reciclado de pilas?.
PI.3	¿Cómo influyen las políticas gubernamentales en la optimización de los procesos de reciclaje de las BEV?

Tabla 2: Criterios de inclusión y exclusión

Criterio de inclusión	Criterio de exclusión
Revista indexada JCR Trabajos en inglés	Revista No indexada Trabajos en otros idiomas
Responde a las preguntas de investigación	No responde a las preguntas de investigación
Artículos publicados en los últimos 5 años	Trabajos publicados hace más de 5 años.

Además, trabajos de investigación que no fueran JCR y que no fueran accesibles en texto completo, limitando así la capacidad de realizar un análisis exhaustivo. La sostenibilidad de las baterías de litio puede variar significativamente según el contexto temporal y geográfico debido a las diferencias en las combinaciones energéticas, los avances tecnológicos y los entornos regulatorios. Es posible que la revisión de la bibliografía no sea fácilmente generalizable a diferentes regiones. Pero la fiabilidad de los resultados de la RSL depende en gran medida de la calidad y la disponibilidad de los datos. Las lagunas o inconsistencias en los datos, especialmente en cómo se evalúa el ciclo de vida de las baterías en diferentes contextos sociales y las tecnologías emergentes de baterías, pueden generar incertidumbre.

3. Análisis y resultados

El análisis de los artículos seleccionados se realizó mediante una síntesis cualitativa. Este enfoque permitió identificar patrones comunes y diferencias significativas en las metodologías y enfoques utilizados en los estudios. A través de este análisis, se extrajeron conclusiones clave sobre los avances y los retos existentes en el campo del reciclaje y la optimización de baterías de vehículos eléctricos. La Tabla 3 muestra un resumen de varios artículos relevantes sobre revisiones sistemáticas de la literatura previos. En la Tabla se incluyen detalles sobre los autores que realizaron cada trabajo, el número de artículos revisados, el cuartil en el que se encuentra la revista donde se publicó el trabajo según la base de datos Web of Science (WOS), el número de citas que han recibido los artículos, el período de publicación y los objetivos principales de cada investigación. Estos estudios abordan temas como el análisis del ciclo de vida de las baterías, los desafíos en los procesos de desensamble de las baterías de vehículos eléctricos y la optimización de los costos asociados con las estaciones de carga.

La Tabla 3 resulta muy útil porque permite realizar un análisis de las temáticas y aspectos más importantes de las BEV y tener una visión clara de los tópicos que se deben considerar para realizar la RSL sobre el reciclado de las BEV y no repetir trabajos anteriores. Además, la información sobre los objetivos de investigaciones previas ayuda a comprender mejor las áreas específicas que los investigadores están abordando, lo cual es clave para entender las posibles soluciones y áreas de mejora en la sostenibilidad de las BEV. En la Tabla 4 se presenta el número de artículos clasificados por editorial,

Tabla 3: Trabajos previos de revisiones sistematicas relacionadas al el ciclo de vida de las BEV

Autores	Periodo	# Trabajos Revisados	Objetivo del trabajo	# citas
Arif <i>et al.</i> (2021)	2011-2020	85	Describir los procesos de desensamble de los sistemas BEV para conocer las diferentes metodologías, niveles de automatización, uso de tecnologías digitales, desafíos en los procesos de desensamble, y recomendaciones para la implementación y optimización de los procesos.	93
Temporelli <i>et al.</i> (2020)	2012-2023	26	Analizar la variabilidad en la evaluación de los principales impactos del ciclo de vida de las BEV, enfatizando al cambio climático (cuantifica las emisiones de Co2), para apoyar a los investigadores con sugerencias metodológicas en el campo del ciclo de vida de las BEV comparado con los vehículos a gasolina y diésel.	65
Hertel <i>et al.</i> (2024)	2012-2023	57	Conocer los principales desafíos para la optimización del proceso de desmontaje automatizado de los sistemas de las BEV mediante algoritmos de inteligencia artificial, para estandarizar el diseño de los sistemas de BEV, con el propósito de gestionar de manera adecuada su vida útil y reducir la contaminación ambiental causada por su eliminación inadecuada de los residuos.	10

junto con la cantidad de publicaciones asociadas a cada una. En la Tabla 4 se puede observar que la mayoría de los artículos están concentrados en la editorial MDPI, que tiene una notable superioridad en comparación con otras editoriales, como Elsevier y Springer, que también publican una cantidad significativa de trabajos. En cambio, editoriales como IEEE, Wiley, y Oxford University Press tienen una presencia menor, con un número mucho más reducido de publicaciones. Esta tendencia resalta la prevalencia de algunas editoriales en el área de investigación sobre vehículos eléctricos, mientras que otras tienen un alcance limitado.

Tabla 4: Número de artículos publicados por editorial

Editorial	Número de publicaciones
MDPI	14
Sciedirect	13
Springer	4
IEEE	2
Wiley	3
PLOS	2
Taylor and Francis	1
Oxford University Press	1

La Tabla 5 muestra la cantidad de trabajos publicados por año en relacionado con varios temas del ciclo de vida de la BEV que cumplen con elementos de inclusión, como son: Impacto Ambiental, Optimización y Reciclaje, Ingeniería y Logística, Energía Renovable y Sostenibilidad. A través de la tabla, se puede observar cómo el número de trabajos para cada tema han fluctuado a lo largo de los años del 2019 al 2025. La Tabla 5 muestra la evolución del número de publicaciones sobre reciclaje y optimización de baterías de vehículos eléctricos a lo largo de los años, desde 2019 hasta 2025. En la tabla se observa un crecimiento significativo de publicaciones en 2023, alcanzando su punto máximo con 20 artículos.

Tabla 5: Número de artículos publicados por editorial

Año de publicación	Número de publicaciones
2019	5
2020	4
2021	7
2022	11
2023	20
2024	2
2025	1

En la Figura 2 se pueden observar la cantidad de trabajos publicados por año en relación con varios temas clave: Impacto Ambiental, Optimización y Reciclaje, Ingeniería y Logística, Energía Renovable y Sostenibilidad. A través de la gráfica, se indica cómo el número de trabajos para cada tema ha fluctuado a lo largo de los años. El tema Impacto Ambiental muestra un aumento significativo en 2020, mientras que otros temas como Energía Renovable e Ingeniería y Logística también muestran variaciones a lo largo del tiempo, alcanzando su punto máximo en 2023. La gráfica proporciona una representación visual clara de las tendencias en la investigación relacionada con estos temas.

En la Tabla 6 se presenta el resumen de tres trabajos previos de RSL con temáticas relacionadas con el proceso de reciclado y remanufactura de las BEV para reducir los costos; como influyen las políticas gubernamentales en el impacto social y ambiental de los procesos de reciclaje; y describir los desafíos técnicos y económicos en la reutilización de baterías para aplicaciones de almacenamiento de energía. Esta clasificación ofrece al lector una visión completa de las tendencias actuales en la investigación sobre el tema, ayudándole a identificar los enfoques más destacados en esta disciplina. Los artículos seleccionados fueron clasificados en diferentes categorías temáticas según su enfoque: desafíos técnicos y económicos, impacto de políticas públicas y optimización de los procesos del ciclo de vida. Esta clasificación ayuda a identificar las áreas de mayor interés dentro de la investigación sobre

construcción prefabricada.

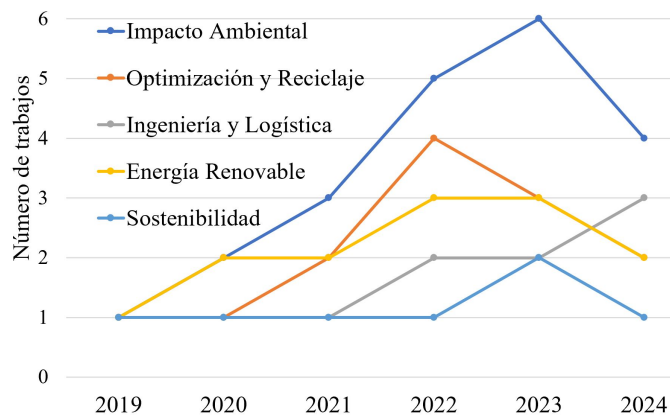


Figura 2: Número de trabajos por año de los temas clave de la RSL.

La Tabla 6 organiza los artículos seleccionados para la revisión sistemática, clasificándolos según los temas principales que se han abordado en la investigación sobre la cadena de suministro inversa de la remanufactura de baterías eléctricas. Cada categoría se vincula con los autores relevantes que han explorado estos temas, brindando una visión clara de las tendencias y áreas de estudio dentro de esta disciplina. Las categorías que se incluyen son gestión de proyectos, tecnologías emergentes y sostenibilidad e impacto ambiental que causa la manufactura de las BEV. Esta clasificación ofrece una visión detallada de los temas tratados en la literatura seleccionada, resaltando las áreas clave que han sido investigadas por los autores y cómo se distribuye la investigación en cada campo temático. El análisis de la clasificación de artículos por tema específico permite identificar los temas recurrentes y emergentes en la literatura. A través de este análisis, se observaron patrones en los términos más utilizados en los artículos, lo que facilitó la identificación de tendencias clave en la investigación.

Tabla 6: Clasificación de los artículos seleccionados por tema específico del ciclo de vida de las BEV

Clasificación	Fuentes Identificadas
Impacto de políticas públicas	Burchart-Korol <i>et al.</i> (2020), Aishwarya <i>et al.</i> (2025), Jannesar Niri <i>et al.</i> (2024), Nguyen-Tien <i>et al.</i> (2022), Zhang <i>et al.</i> (2023), Liu y Wang (2021), Wilson <i>et al.</i> (2021), Ding <i>et al.</i> (2020), Zhang <i>et al.</i> (2024b), Li <i>et al.</i> (2024), Tang <i>et al.</i> (2024), Shao <i>et al.</i> (2024), Wang <i>et al.</i> (2024), Nousdilis <i>et al.</i> (2020), Zhu <i>et al.</i> (2024), Wu <i>et al.</i> (2025), Wei <i>et al.</i> (2022), Tsao y Ai (2024), Wang <i>et al.</i> (2023b), Li <i>et al.</i> (2019a)
Desafíos técnicos y económicos	Han <i>et al.</i> (2025), Li y Zhao (2021), Yang <i>et al.</i> (2024), Sorooshian <i>et al.</i> (2024), Kellner <i>et al.</i> (2018), Zhang y Yang (2023), Braco <i>et al.</i> (2020), Zhao y Burke (2022), Chang <i>et al.</i> (2022), Fagnoli <i>et al.</i> (2024), Hertel <i>et al.</i> (2024), Kallitsis <i>et al.</i> (2022), Kotak <i>et al.</i> (2021), Krause <i>et al.</i> (2020), Lai <i>et al.</i> (2022), Li <i>et al.</i> (2019b), Rosenberg <i>et al.</i> (2023), Sathre y Gustavsson (2021), Shu <i>et al.</i> (2021), Syré <i>et al.</i> (2024), Tavana <i>et al.</i> (2024), Tian <i>et al.</i> (2021), Yang <i>et al.</i> (2022), Zheng y Xu (2023).
Optimización de los procesos	Akram y Abdul-Kader (2021), Al-Quradaghi <i>et al.</i> (2022), Di Rienzo <i>et al.</i> (2023), da Silva <i>et al.</i> (2022), He <i>et al.</i> (2024b), Ioakimidis <i>et al.</i> (2019), Karthick <i>et al.</i> (2024), He <i>et al.</i> (2024a), Yu <i>et al.</i> (2020), Xu <i>et al.</i> (2023), Xiao <i>et al.</i> (2022), Tan <i>et al.</i> (2023), Mu <i>et al.</i> (2023), Kappner <i>et al.</i> (2019), Afroozzi <i>et al.</i> (2025), Baazouzi <i>et al.</i> (2021), Arif <i>et al.</i> (2021).

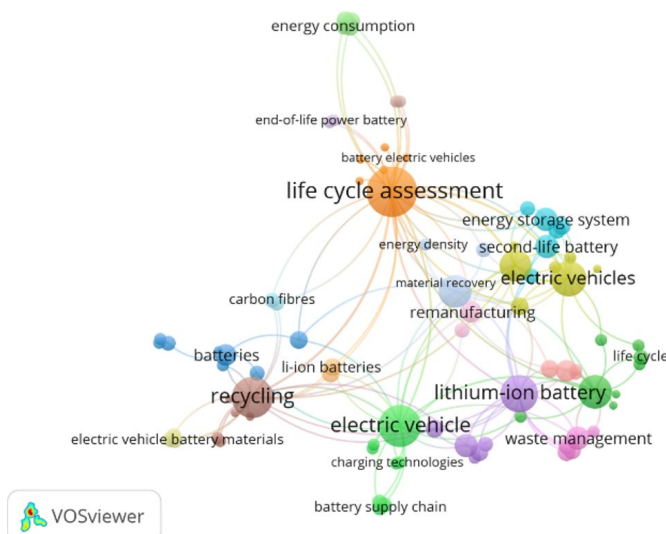


Figura 3: Red de frecuencias de los términos clave en los resúmenes de artículos por año de publicación visualizada con el software VOSviewer.

La Figura 3 muestra una red de frecuencia de términos clave relacionados con el estudio de las BEV, confirmando la relevancia temática de los trabajos seleccionados en relación con el enfoque de esta revisión de la literatura. Los diferentes colores y tamaños de los nodos representan la frecuencia de los conceptos clave, como baterías de iones de litio, impacto ambiental, optimización, energía, y algoritmos; y las conexiones muestran una ocurrencia común de términos clave en un artículo que están conectados entre sí dentro del contexto de la investigación. Los términos más grandes, como estado, temperatura, carga, batería de vehículos eléctricos están más interconectados, porque son las palabras clave buscadas en las bases de datos, pero también son las variables físicas y eléctricas que presentan una mayor intervención al responder las preguntas de investigación. Esta visualización que se observa en la Figura 3 ayuda a identificar áreas clave de investigación y su interrelación en el campo de las baterías y la sostenibilidad. Los colores indican el año promedio de publica-

ción de los artículos en los que estos términos clave aparecieron con mayor frecuencia. Es evidente que el concepto central de esta publicación —ciclo de vida— se menciona en los trabajos más recientemente publicados. Esta visualización es una herramienta muy útil para identificar las áreas más relevantes de investigación dentro del campo de las BEV. Además, al mostrar cómo estos términos se interrelacionan, facilita la comprensión de las tendencias y prioridades en la investigación actual, ayudando a orientar futuras líneas de estudio.

La Figura 4 se muestra una nube de palabras que visualiza la frecuencia de diferentes países mencionados en los artículos relacionados con el tema de baterías de vehículos eléctricos. Los nombres de los países están representados con distintos tamaños y colores, indicando su frecuencia de aparición en los documentos revisados. En la nube de palabras se puede observar que China y Alemania destacan por su tamaño, lo que sugiere que son los países más mencionados en este contexto, seguidos de Italia y Estados Unidos. Esta visualización permite identificar rápidamente las naciones que están más involucradas en la investigación sobre el tema de interés.

Esta visualización que se muestra en la Figura 4 es muy útil para identificar rápidamente las naciones que lideran la investigación sobre baterías de vehículos eléctricos. El tamaño de los países como China, Alemania, Italia y Estados Unidos resalta su relevancia en este campo, lo que refleja el enfoque de investigación y las políticas de sostenibilidad que se están implementando en estos países.



Figura 4: Nube de palabras de naciones que lideran la investigación de BEV.

4. Narrativa de la revisión de literatura

Las siguientes reflexiones narrativas describen los estudios analizados para mostrar sus diversas maneras de integrar los desafíos técnicos y económicos en la reutilización de baterías; identificar las estrategias de optimización para reducir costos de operación; y resumir las políticas gubernamentales de los procesos de reciclaje.

4.1. Desafíos técnicos y económicos en la reutilización de baterías

Los desafíos técnicos y económicos en la reutilización de baterías para aplicaciones de almacenamiento de energía radican en la complejidad y el costo de los procesos involucrados. En Lai *et al.*, 2022 explican que la recompra, desarme, clasificación y reagrupamiento de las baterías retiradas son actividades que demandan mucho tiempo y elevado esfuerzo laboral, lo que incrementa los costos asociados. Además, señalan que la vida útil secundaria de las baterías depende en gran medida de la eficiencia en estas etapas, así como de la adecuada selección de los escenarios de aplicación, factores que determinan el valor ecológico y económico que se puede obtener. También, se destaca la incorporación de energías renovables en todo el proceso de reutilización, lo cual es fundamental para potenciar los beneficios ambientales derivados de esta segunda vida.

En Wei *et al.*, 2022 realizaron la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de las baterías de Litio-Ferro-Fosfato y de las baterías de iones de litio donde han demostrado que ambos tipos de baterías presentan diferentes características de impacto ambiental en distintas fases. Por ejemplo, las baterías de Litio-Ferro-Fosfato son más respetuosas con el medio ambiente en la fase de producción, mientras que las baterías de iones de litio son en las fases de aplicación y transporte. A pesar de ello, las baterías de Litio-Ferro-Fosfato son, en general, más respetuosas con el medio ambiente. Además, los resultados sugieren que, debido a su mayor masa, las baterías de Litio-Ferro-Fosfato probablemente puedan obtener mayores beneficios al reutilizarse para el almacenamiento de energía debido a su mayor peso y volumen. Este análisis comparativo sugiere que, pesar de sus limitaciones para usos móviles, las baterías Litio-Ferro-Fosfato resultan generalmente más sostenibles y pueden ser una opción favorable para aplicaciones estacionarias, aunque el estudio no profundiza en los desafíos técnicos y económicos específicos de dicha reutilización.

Según (Sathre y Gustavsson, 2021) la expansión del mercado de vehículos eléctricos ha generado nuevas oportunidades para el manejo de baterías al final de su vida útil. Las baterías retiradas de estos vehículos pueden destinarse al almacenamiento estacionario de energía, lo que facilita la integración de fuentes renovables intermitentes. Los autores explican que, al momento de su retiro, las baterías aún conservan entre el 70 % y 80 % de su capacidad original, haciéndolas adecuadas para aplicaciones donde la capacidad y potencia por unidad de masa no son críticas, prolongando así su vida útil. Asimismo, cuando las baterías ya no son reutilizables, los materiales valiosos que contienen, como litio, níquel, cobalto y cobre, pueden ser recuperados mediante procesos de reciclaje hidrometalúrgico y pirometalúrgico.

La optimización de la red de reciclaje puede lograrse mediante un modelo MILP (Mixed-Integer Linear Programming, por sus siglas en inglés), el cual maximiza la rentabilidad al considerar costos de transporte, operación, construcción, reciclaje, empaquetado y emisiones, además de ingresos y subsidios. El análisis de sensibilidad sugiere que dividir las funciones entre distintas instalaciones incrementa los ingresos y mejora la precisión en el proceso de reciclaje. Esto demuestra

que las estrategias de optimización efectivas no solo reducen costos operativos, sino que también promueven el desarrollo tecnológico como lo sugiere (Wang *et al.*, 2023a). Esto evidencia que las estrategias de optimización adecuadas son clave para hacer sostenible el reciclaje.

Según Temporelli *et al.*, 2020 uno de los principales desafíos técnicos en la reutilización de baterías para almacenamiento de energía está relacionado con los materiales que generan mayores impactos durante su producción, como el material activo del cátodo y los metales utilizados en el ánodo, específicamente cobre y aluminio. La obtención y procesamiento de estos materiales implican altos costos energéticos y ambientales. Además, extender la vida útil de las baterías y mejorar su eficiencia y densidad energética son factores clave para minimizar estos impactos. Sin embargo, garantizar la eficiencia de las baterías reutilizadas y mantener su desempeño adecuado representa un desafío técnico significativo, mientras que los costos asociados a su reacondicionamiento y los procesos de reciclaje afectan su viabilidad económica.

La reutilización de las BEV para almacenamiento de energía presenta algunos desafíos técnicos, según Kotak *et al.*, 2021, que pueden ser químicos o del diseño de las propias baterías, lo que complica su identificación, prueba y adaptación. Mientras que la reutilización directa es menos costosa pero limitada en aplicaciones, el desmantelamiento hasta el nivel de celda ofrece mayor versatilidad, pero incrementa los costos por modificaciones y sistemas de control. Económicamente, la baja disponibilidad de baterías usadas a gran escala y la preferencia del mercado por baterías nuevas representan barreras significativas. En países de la zona europea, la reutilización podría facilitar el acceso a la energía en zonas rurales, pero enfrenta dificultades para rastrear el destino de las baterías y la falta de infraestructura adecuada, complicando su manejo efectivo. Estos desafíos requieren una gestión integral y estrategias de economía circular para garantizar la viabilidad de la reutilización.

4.2. Estrategias de optimización reducir costos operativos

Con el creciente número de los vehículos eléctricos en las calles y baterías eléctricas usadas, el medio ambiente exige el desarrollo de industrias eficientes para el reciclaje de baterías. Un desafío clave que se presenta en el proceso del ciclo de vida es el desajuste entre la oferta y la demanda. En respuesta a este desajuste He *et al.*, 2024a, Afroozi *et al.*, 2025, Zhao *et al.*, 2021, Tian *et al.*, 2021, entre otros, analizan diferentes esquemas de optimización dinámica para ajustar la relación desigual entre la oferta y la demanda en periodos de tiempo para hacer predicciones de cambios en el volumen de transacciones. Por ejemplo, en los resultados de las simulaciones de He *et al.*, 2024a, muestran que, si se combina menores volúmenes de reciclaje y se aumenta el precio del reciclaje, se tiene como salida el incremento en los ingresos de la empresa, pero agrava los costos ambientales y reduce el bienestar social. Además, los ingresos de la empresa son más sensibles a las tasas de comisión que el bienestar social, que a su vez es más vulnerable a los precios del reciclaje. Además, priorizar el bienestar social genera un mayor volumen de reciclaje en comparación con priorizar los ingresos, pero también crea un desequilibrio entre la oferta y la demanda,

desestabilizando el mercado del reciclaje. Los resultados de la optimización de los modelos ayudan a las empresas a comprender el impacto de las decisiones de precios y comisiones en sus ingresos y el bienestar social, lo que permite mejorar la toma de decisiones.

Xiao *et al.*, 2022 utiliza un enfoque de optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético en conjunto con el software ADVISOR y MATLAB para evaluar diferentes configuraciones y parámetros del vehículo eléctrico para optimizar el uso de recursos y mejoren el rendimiento general de un sistema híbrido de almacenamiento de energía (SHAE). Los resultados muestran que ciertas funciones son sensibles a los pesos asignados en la optimización, permitiendo personalizar sistemas de HESS para satisfacer distintos criterios de rendimiento. El autor analiza y debate los costos asociados con el SHAE. El trabajo se centra en la optimización de un SHAE que combina baterías de iones de litio y supercondensadores para vehículos eléctricos. Los resultados revelan que el algoritmo genético es más efectivo que los métodos de optimización directa, permitiendo soluciones óptimas en menos tiempo y contribuyendo a la eficiencia en la industria automotriz. Los beneficios incluyen una mejora en el rendimiento energético, reducción de costos y adaptación a las preferencias de los consumidores en cuanto a autonomía y aceleración. Además, Xiao *et al.*, 2022, utilizaron redes bayesianas dinámicas para determinar la secuencia ideal considerando las relaciones previas entre componentes, lo que contribuye a optimizar el proceso y reducir costos asociados.

En (Rosenberg *et al.*, 2023) menciona que los modelos de optimización cuantitativa existentes hasta la fecha carecen de características dinámicas relevantes para el crecimiento exponencial del mercado de vehículos eléctricos que usan baterías para su movilidad, lo cual genera un aumento BEV al final de su vida útil. Los autores proponen un modelo dinámico de optimización dentro de la cadena de suministro inversa para las baterías al final de su vida útil para planificar múltiples periodos y capas de la cadena de suministro, a la vez que analiza y propone ampliar la capacidad de los centros de desmontaje y las plantas de reciclaje. El modelo se aplica a un caso práctico de un fabricante de equipos originales (OEM) de vehículos eléctricos a batería que gestiona todas las actividades de reciclaje de sus baterías al final de su vida útil en una única red impulsada por las partes interesadas en Alemania. Se estimó que los costos promedio al final de su vida útil por BEV disminuirían en más de un 35 % entre 2030 y 2044 debido al uso de instalaciones de procesamiento más grandes que se benefician de las economías de escala y de menores costos de transporte gracias a la existencia de más ubicaciones.

Yu *et al.*, 2020 menciona que las estrategias de optimización en el reciclaje de las BEV incluyen el uso de algoritmos inteligentes, como el modelo de colonia de hormigas (ACA) para determinar rutas de transporte más cortas, reduciendo costos y riesgos en el proceso de traslado. Además, las tecnologías de la industria 4.0 como el big data y mapas inteligentes permiten diseñar rutas eficientes, mientras que la gestión logística avanzada considera factores como la carga, el clima y el tráfico. El monitoreo en tiempo real y una plataforma de big data mejoran la seguridad y la eficiencia, disminuyendo

costos operativos.

Muchos investigadores mencionan que el reciclaje de las BEV retiradas no solo aporta beneficios económicos, sino que también favorece el desarrollo sostenible del medio ambiente y la sociedad. Por lo cual Mu *et al.*, 2023 menciona que se debe poner especial atención al diseño y optimización de las redes logísticas inversas para que sean sostenibles. En este sentido, los autores proponen un modelo de red logística inversa dinámica (RLID) de seis niveles que contempla aspectos económicos, ambientales y sociales. Para analizar el sistema de reciclaje proponen un modelo de optimización multicriterio con multiobjetivo, que permite explorar la configuración más eficiente de la red de reciclaje. La validez del modelo se corroboró mediante un estudio de caso, cuyos resultados indican que los nodos de instalaciones cercanos a la cabecera de la red presentan mayores fluctuaciones en su apertura y cierre, que la RLID supera a su contraparte estática en rendimiento, y que las variaciones en los costos de cooperación influyen tanto en el volumen de intercambios entre terceros y empresas relacionadas como en el costo total de la red.

Según Al-Quradaghi *et al.*, 2022, el diseño de una red sostenible de reciclaje basada en programación lineal entera mixta permite optimizar los costos operativos al integrar el reciclaje de pilas dentro de un parque industrial ecológico. Esta red optimiza la selección de puntos de colección, plantas de desmontaje, instalaciones de procesamiento y mercados, garantizando rutas y flujos eficientes de materiales. Al minimizar costos fijos y variables, y maximizar la rentabilidad del sistema, se facilita la recuperación y valorización de materiales, reduciendo los costos relacionados al reciclaje de pilas y mejorando la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.

Baazouzi *et al.*, 2021 proponen un sistema basado en un planificador adaptativo con optimizador de estrategia integrado utilizando algoritmos heurísticos para mejorar la eficiencia del desensamble de baterías de vehículos eléctricos. Los resultados del análisis muestran un aumento en la rentabilidad del proceso de desmontaje y una mejora en la gestión de recursos al recuperar materiales valiosos de las baterías. El enfoque implementa el uso de un software de optimización y modelado para determinar las estrategias de desmontaje más efectivas. Aunque puede incurrir en costos significativos por la automatización y desarrollo del software, estos se compensan con los ingresos obtenidos por la recuperación de materiales. El artículo aborda la optimización de estrategias de desmontaje de las BEV mediante un planificador adaptativo. Este sistema resuelve el desafío de desensamblar baterías eficientemente en un contexto de economía circular. El sistema lo logra combinando datos sobre el estado de las baterías, técnicas de desmontaje y estrategias de recuperación. Los beneficios incluyen la maximización de ganancias a través de la recuperación de componentes valiosos y la reducción de costos operativos. El propósito del modelo y su implementación es facilitar la transición hacia la sostenibilidad en el tratamiento de baterías al final de su vida útil. Los resultados son favorables, mostrando un aumento en la rentabilidad del proceso.

4.3. Influencia de políticas gubernamentales en los procesos de reciclaje de las BEV

Realizar un reciclaje efectivo depende en gran medida de un marco regulatorio sólido. Las políticas gubernamentales juegan un papel crucial al garantizar que las empresas recicladoras cumplan con estándares de seguridad y protección ambiental. Por lo cual, usando políticas gubernamentales se puede organizar el mercado y acelerar la inclusión de empresas calificadas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro, el ciclo de vida y la rentabilidad del reciclaje Wang *et al.*, 2023a. En Wu *et al.*, 2025 los autores analizan con diferentes escenarios que una regulación adecuada es esencial para promover un reciclaje responsable y sostenible. En su trabajo prueban un conjunto de reglas para la toma de decisiones dentro de una cadena de suministro para las BEV cuando existe la intervención de políticas gubernamentales. El modelo tiene la capacidad de comparar el rendimiento de la cadena de suministro en varias condiciones operativas de recuperación y los efectos del uso de diferentes políticas. Los resultados muestran que, en términos de ingresos totales y tasa de recuperación, cuando el sistema está en modo de recuperación del productor de baterías, el modo de recuperación mixto que involucra al fabricante de automóviles y al reciclador profesional, por lo tanto, es más efectivo. La solución óptima para la variable de decisión está influenciada por las políticas gubernamentales, y esta influencia se mantiene constante en los diferentes modos de recuperación. El impacto positivo del sistema de depósito-devolución está vinculado a la relación entre el monto del depósito y la escala de recompensa. Si el reembolso constituye una proporción demasiado pequeña del depósito, tanto los ingresos totales como la tasa de recuperación disminuirán. Reducir los costos del canal de reciclaje y mejorar la conciencia ambiental de los compradores puede aumentar la tasa de reciclaje de baterías y los ingresos totales. Este método presentado combina la participación de productores, fabricantes de automóviles y recicladores profesionales, lo que permite mejorar las tasas de recuperación y maximizar los beneficios económicos. Al integrar estos actores y optimizar los canales de reciclaje, se reducen costos de operación, mejorando la eficiencia general de la cadena de reciclaje.

Los subsidios gubernamentales juegan un papel crucial en incentivar las inversiones iniciales en reciclaje sostenible, especialmente en el caso de las baterías de vehículos eléctricos. Un estudio basado en un modelo de teoría de juegos evolutivos reveló que las decisiones de inversión están influenciadas por las interacciones entre fabricantes, recicladores y gobiernos. Sin embargo, estos subsidios resultan insuficientes para cubrir completamente las necesidades de inversión a largo plazo, fomentando comportamientos de "free-rider" que pueden ser controlados mediante impuestos de carbono. El análisis indica que, a medida que aumenta el coeficiente de intensidad del subsidio, las empresas muestran mayor disposición a participar en la inversión verde. No obstante, cuando el coeficiente es inferior a 0.5, los fabricantes son los primeros en abandonar las estrategias sostenibles, demostrando que son más sensibles a la intensidad del subsidio gubernamental que los recicladores Zheng y Xu, 2023.

En Kappner *et al.*, 2019 se menciona que, aunque los sub-

sidios iniciales impulsan la inversión, su efectividad a largo plazo depende de una regulación adecuada y mecanismos de control que garanticen el compromiso empresarial con las estrategias sostenibles. Japón es un actor reconocido en la producción de sistemas de almacenamiento de energía, aunque en el contexto del mercado residencial alemán, fabricantes europeos y otras regiones mantienen una presencia significativa. Por ejemplo, empresas como Sonnen en Alemania lideran el mercado de baterías para uso domiciliario, mientras que fabricantes internacionales como LG Electronics y Samsung ofrecen productos competitivos. Aunque la capacidad de producción japonesa en baterías para vehículos eléctricos es destacada a nivel global, con innovación en eficiencia y durabilidad, el análisis financiero realizado en el contexto alemán muestra que, actualmente, los sistemas de almacenamiento de baterías para hogares no resultan rentables pese a las subvenciones gubernamentales vigentes. Este hallazgo subraya que el desarrollo tecnológico y la reducción de costos, incluyendo los impulsados por fabricantes japoneses, serán clave para mejorar la viabilidad económica y promover una mayor adopción de estas tecnologías en el futuro.

La competencia entre China, Corea del Sur y Japón en la industria de baterías para vehículos eléctricos se ha intensificado, impulsada por políticas gubernamentales estratégicas. Según Oskouei *et al.*, 2022, China ha consolidado su liderazgo mediante subsidios directos a fabricantes, regulaciones de contenido reciclado en baterías y restricciones a la exportación de minerales críticos. Corea del Sur se enfoca en financiamiento para investigación y desarrollo, además de políticas que exigen el reciclaje adecuado de baterías. Japón promueve la sostenibilidad a través de la Ley de Promoción del Reciclaje de Materiales de Recursos Específicos, que obliga a los fabricantes a recuperar baterías usadas ofreciendo incentivos fiscales para tecnologías avanzadas. Estas políticas han fortalecido la capacidad de producción, la eficiencia y la competitividad de cada país.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron 59 estudios que se centran en el ciclo de vida de las BEV y que inciden en los desafíos técnicos y económicos de la reutilización de baterías para aplicaciones de almacenamiento de energía, optimización de los costos de operación del reciclado y la influencia de políticas gubernamentales en la cadena de procesos para remanufacturar las BEV. Los resultados de la revisión sistemática de la literatura resaltan la importancia y la necesidad de seguir innovando y optimizando los procesos de remanufacturar las baterías eléctricas que ya no usan los vehículos eléctricos debido al aumento de VE que llegan al final de su vida útil sigue aumentando la cantidad de BEV ocasionando daños al medio ambiente. Debido al gran número de variables y variantes que intervienen en el ciclo de vida de las BEV, es imperante la necesidad de diseñar sistemas de remanufactura lo más automatizado posible, pero además de forma inteligente y flexible, mediante algoritmos de aprendizaje automático, usando los pilares de la fábrica digital. Los sistemas de remanufactura basados en el ciclo de vida adquieren cada vez mayor relevancia, considerando no solo los impactos ambientales, sino

también los sociales y económicos asociados a los productos y procesos de las BEV. Los resultados descriptivos han revelado que, a pesar del inmenso impacto ambiental, económico y social del sector a causa del desuso de las BEV, la adopción de modelos logísticos apropiados para su reuso sigue siendo relativamente limitada a nivel global. Sin embargo, una notable tendencia al aumento de publicaciones donde China y los países europeos están definiendo políticas públicas para incentivar la remanufactura de las BEV especialmente en los últimos años, han demostrado una mayor conciencia de la necesidad de una evaluación más exhaustiva de los productos que desechan los EV. Por lo tanto, existe una necesidad apremiante de ampliar los esfuerzos de investigación más allá de la aplicación tradicional de redes logísticas inversas en la industria automotriz, por lo cual se deben integrar las tres dimensiones de la sostenibilidad y ampliar el alcance geográfico de los estudios, especialmente más pertinente para abordar la dimensión social.

Referencias

- Achillas, C. e Iosifidou, P. (2024). Shifting towards electric vehicles: A case study of mercedes-benz from the perspective of cross-functional teams and workforce transformation. *World Electric Vehicle Journal*, 15(7).
- Afroozi, M. A., Gramifar, M., Hazratifar, B., Keshvari, M. M., y Razavian, S. B. (2025). Optimization of Lithium-Ion Battery Circular Economy in Electric Vehicles in Sustainable Supply Chain. *Battery energy*.
- Aishwarya, V., Ekren, B. Y., Singh, T., y Singh, V. (2025). Integrating sustainability across the lifecycle of electric vehicle batteries: Circular supply chain challenges, innovations, and global policy impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 216:115671.
- Akram, M. N. y Abdul-Kader, W. (2021). Electric vehicle battery state changes and reverse logistics considerations. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(3):390–403.
- Al-Quradaghi, S., Zheng, Q. P., Betancourt-Torcat, A., y Elkamel, A. (2022). Optimization model for sustainable end-of-life vehicle processing and recycling. *Sustainability*, 14(6).
- Arif, S. M., Lie, T. T., Seet, B. C., Ayyadi, S., y Jensen, K. (2021). Review of electric vehicle technologies, charging methods, standards and optimization techniques. *Electronics*, 10(16).
- Baazouzi, S., Rist, F. P., Weeber, M., y Birke, K. P. (2021). Optimization of disassembly strategies for electric vehicle batteries. *Batteries*, 7(4).
- Braco, E., San Martín, I., Berrueta, A., Sanchis, P., y Ursúa, A. (2020). Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32:101695.
- Buberger, J., Kersten, A., Kuder, M., Eckerle, R., Weyh, T., y Thiringer, T. (2022). Total co2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159:112158.
- Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folęga, P., y Pustejovska, P. (2020). Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in european union countries. *Journal of Cleaner Production*, 257:120476.
- Chang, L., Ma, C., Zhang, Y., Li, H., y Xiao, L. (2022). Experimental assessment of the discharge characteristics of multi-type retired lithium-ion batteries in parallel for echelon utilization. *Journal of Energy Storage*, 55:105539.
- da Silva, S. F., Eckert, J. J., Corrêa, F. C., Silva, F. L., Silva, L. C., y Dedini, F. G. (2022). Dual hess electric vehicle powertrain design and fuzzy control based on multi-objective optimization to increase driving range and battery life cycle. *Applied Energy*, 324:119723.
- Di Rienzo, R., Nicodemo, N., Roncella, R., Saletti, R., Vennettilli, N., Asaro, S., Tola, R., y Baronti, F. (2023). Cloud-based optimization of a battery model parameter identification algorithm for battery state-of-health estimation in electric vehicles. *Batteries*, 9(10).
- Ding, P., Zhao, Z., y Li, X. (2020). Government subsidies in the power battery recycling industry. *Industrial Management Data Systems*, 120(6):1059–1083.
- Faraz, A., Ambikapathy, A., Thangavel, S., Logavani, K., y Arun Prasad, G. (2021). *Battery Electric Vehicles (BEVs)*, pp. 137–160. Springer Singapore, Singapore.

- Fargnoli, M., Parrella, E., Costantino, E., y Tronci, M. (2024). Hybrid solutions for agricultural vehicles: A comparative life cycle analysis from the users' standpoint. *Journal of Cleaner Production*, 485:144406.
- Han, B., Wang, M., Xu, Y., y Park, Y. (2025). An electric vehicle battery recycling and remanufacturing supply chain network design with sustainability and robustness under demand uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 390:126202.
- He, H., Zhang, C., Wang, S., Sun, J., Ma, F., y Sun, Q. (2024a). Dynamic optimization of battery recycling e-platforms under non-equalizing supply and demand: Recycling price and service commissions. *Waste Management*, 177:266–277.
- He, M., Li, Q., Wu, X., y Han, X. (2024b). A novel multi-level reverse logistics network design optimization model for waste batteries considering facility technology types. *Journal of Cleaner Production*, 467:142966.
- Hertel, D., Bräunig, G., y Thürer, M. (2024). Towards a green electromobility transition: A systematic review of the state of the art on electric vehicle battery systems disassembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 74:387–396.
- Ioakimidis, C. S., Murillo-Marrodán, A., Bagheri, A., Thomas, D., y Genikomsakis, K. N. (2019). Life cycle assessment of a lithium iron phosphate (lfp) electric vehicle battery in second life application scenarios. *Sustainability*, 11(9).
- Jannesar Niri, A., Poelzer, G. A., Zhang, S. E., Rosenkranz, J., Pettersson, M., y Ghorbani, Y. (2024). Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191:114176.
- Kallitsis, E., Korre, A., y Kelsall, G. H. (2022). Life cycle assessment of recycling options for automotive li-ion battery packs. *Journal of Cleaner Production*, 371:133636.
- Kappner, K., Letmathe, P., y Weidinger, P. (2019). Optimisation of photovoltaic and battery systems from the prosumer-oriented total cost of ownership perspective. *Energy Sustainability and Society*, 9(1).
- Karthick, K., Ravivarman, S., y Priyanka, R. (2024). Optimizing electric vehicle battery life: A machine learning approach for sustainable transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 15(2).
- Kellner, Q., Hosseinzadeh, E., Chouchelamane, G., Widanage, W. D., y Marco, J. (2018). Battery cycle life test development for high-performance electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 15:228–244.
- Kotak, Y., Marchante Fernández, C., Canals Casals, L., Kotak, B. S., Koch, D., Geisbauer, C., Trilla, L., Gómez-Núñez, A., y Schweiger, H.-G. (2021). End of electric vehicle batteries: Reuse vs. recycle. *Energies*, 14(8).
- Krause, J., Thiel, C., Tsokolis, D., Samaras, Z., Rota, C., Ward, A., Prenninger, P., Coosemans, T., Neugebauer, S., y Verhoeve, W. (2020). Eu road vehicle energy consumption and co2 emissions by 2050 – expert-based scenarios. *Energy Policy*, 138:111224.
- Lai, X., Chen, Q., Tang, X., Zhou, Y., Gao, F., Guo, Y., Bhagat, R., y Zheng, Y. (2022). Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. *eTransportation*, 12:100169.
- Li, J., Ku, Y., Liu, C., y Zhou, Y. (2019a). Dual credit policy: Promoting new energy vehicles with battery recycling in a competitive environment? *Journal of Cleaner Production*, 243:118456.
- Li, J., Wang, Z., Li, H., y Jiao, J. (2024). Which policy can effectively promote the formal recycling of power batteries in China? *Energy*, 299:131445.
- Li, S., He, H., y Li, J. (2019b). Big data driven lithium-ion battery modeling method based on sdae-elm algorithm and data pre-processing technology. *Applied Energy*, 242:1259–1273.
- Li, S. y Zhao, P. (2021). Big data driven vehicle battery management method: A novel cyber-physical system perspective. *Journal of Energy Storage*, 33:102064.
- Liu, K. y Wang, C. (2021). The impacts of subsidy policies and channel encroachment on the power battery recycling of new energy vehicles. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3):770–789.
- Mu, N., Wang, Y., Chen, Z.-S., Xin, P., Deveci, M., y Pedrycz, W. (2023). Multi-objective combinatorial optimization analysis of the recycling of retired new energy electric vehicle power batteries in a sustainable dynamic reverse logistics network. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16):47580–47601.
- Nguyen-Tien, V., Dai, G., Harper, G. D., Anderson, P. A., y Elliott, R. J. (2022). Optimising the geospatial configuration of a future lithium ion battery recycling industry in the transition to electric vehicles and a circular economy. *Applied Energy*, 321:119230.
- Nousdilis, A. I., Kryonidis, G. C., Kontis, E. O., Barzegkar-Ntovom, G. A., Panapakidis, I. P., Christoforidis, G. C., y Papagiannis, G. K. (2020). Impact of policy incentives on the promotion of integrated PV and battery storage systems: a techno-economic assessment. *IET Renewable Power Generation*, 14(7):1174–1183.
- Oskoue, M. Z., Şeker, A. A., Tunçel, S., Demirbaş, E., Gözel, T., Hocaoglu, M. H., Abapour, M., y Mohammadi-Ivatloo, B. (2022). A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network. *Sustainability*, 14(4):2110.
- Rosenberg, S., Glöser-Chahoud, S., Huster, S., y Schultmann, F. (2023). A dynamic network design model with capacity expansions for eol traction battery recycling – a case study of an oem in germany. *Waste Management*, 160:12–22.
- Sathre, R. y Gustavsson, L. (2021). A lifecycle comparison of natural resource use and climate impact of biofuel and electric cars. *Energy*, 237:121546.
- Shao, L., Peng, Y., y Wang, X. (2024). Cooperation and production strategy of power battery for new energy vehicles under carbon cap-and-trade policy. *Sustainability*, 16(22).
- Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., y Zhu, G. (2021). Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports*, 7:2302–2315.
- Sorooshian, S., Khiavi, S. F., Karimi, F., y Mina, H. (2024). Link between sustainable supply chain and Internet of Things technology in electric vehicle battery manufacturing industry: A business strategy optimization for pickup and delivery. *Business Strategy and the Environment*.
- Syré, A. M., Shyposha, P., Freisem, L., Pollak, A., y Göhlich, D. (2024). Comparative life cycle assessment of battery and fuel cell electric cars, trucks, and buses. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3).
- Tan, K., Tian, Y., Xu, F., y Li, C. (2023). Research on multi-objective optimal scheduling for power battery reverse supply chain. *Mathematics*, 11(4).
- Tang, J., Sheng, Z., y Zhao, D. (2024). Research on the trade-in modes for electric vehicle power batteries under deposit and fund policies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19:733–746.
- Tavana, M., Sohrabi, M., Rezaei, H., Sorooshian, S., y Mina, H. (2024). A sustainable circular supply chain network design model for electric vehicle battery production using internet of things and big data. *Expert Systems*, 41(7):e13395.
- Temporelli, A., Carvalho, M. L., y Girardi, P. (2020). Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries: An Overview of Recent Literature. *Energies*, 13(11):2864.
- Tian, X., Xiao, H., Liu, Y., y Ding, W. (2021). Design and simulation of a secondary resource recycling system: A case study of lead-acid batteries. *Waste Management*, 126:78–88.
- Tripathy, A., Bhuyan, A., Padhy, R., Kumar Mangla, S., y Roopak, R. (2023). Drivers of lithium-ion batteries recycling industry toward circular economy in industry 4.0. *Computers Industrial Engineering*, 179:109157.
- Tsao, Y.-C. y Ai, H. T. T. (2024). Remanufacturing electric vehicle battery supply chain under government subsidies and carbon trading: Optimal pricing and return policy. *Applied Energy*, 375:124063.
- Wang, C., Feng, X., Woo, S., Wood, J., y Yu, S. (2023a). The optimization of an ev decommissioned battery recycling network: A third-party approach. *Journal of Environmental Management*, 348:119299.
- Wang, E., Nie, J., y Wang, Y. (2023b). Government Subsidy Strategies for the New Energy Vehicle Power Battery Recycling Industry. *Sustainability*, 15(3):2090.
- Wang, Y., Dong, B., y Ge, J. (2024). How can the recycling of power batteries for evs be promoted in china? a multiparty cooperative game analysis. *Waste Management*, 186:64–76.
- Wei, L., Wang, C., y Li, Y. (2022). Governance strategies for end-of-life electric vehicle battery recycling in China: A tripartite evolutionary game analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 10.
- Wilson, N., Meiklejohn, E., Overton, B., Robinson, F., Farjana, S. H., Li, W., y Staines, J. (2021). A physical allocation method for comparative life cycle assessment: A case study of repurposing australian electric vehicle batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 174:105759.
- Wu, W., Li, M., y Huang, G. Q. (2025). Optimal Recovery Mode for New Energy Vehicle Battery Recycling Under Government Policies. *Managerial and Decision Economics*.
- Xiao, G., Chen, Q., Xiao, P., Zhang, L., y Rong, Q. (2022). Multiobjective optimization for a li-ion battery and supercapacitor hybrid energy storage electric vehicle. *Energies*, 15(8).
- Xu, L., Wu, F., Chen, R., y Li, L. (2023). Data-driven-aided strategies in battery lifecycle management: Prediction, monitoring, and optimization. *Energy Storage Materials*, 59:102785.
- Yang, C., Ye, Z., Xiong, X., Su, C., y Xie, M. (2024). Improving electric vehicles sustainability: Accurate forecasting of lithium-ion battery health using

- machine learning models. *Journal of Energy Storage*, 103:114280.
- Yang, Y., Lan, L., Hao, Z., Zhao, J., Luo, G., Fu, P., y Chen, Y. (2022). Life cycle prediction assessment of battery electrical vehicles with special focus on different lithium-ion power batteries in china. *Energies*, 15(15).
- Yu, H., Dai, H., Tian, G., Xie, Y., Wu, B., Zhu, Y., Li, H., y Wu, H. (2020). Big-data-based power battery recycling for new energy vehicles: Information sharing platform and intelligent transportation optimization. *IEEE Access*, 8:99605–99623.
- Zhang, J., Huang, H., Zhang, G., Dai, Z., Wen, Y., y Jiang, L. (2024a). Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review. *Journal of Energy Storage*, 93:112231.
- Zhang, M., Wu, W., y Song, Y. (2023). Study on the impact of government policies on power battery recycling under different recycling models. *Journal of Cleaner Production*, 413:137492.
- Zhang, W., Liu, X., Zhu, L., Wang, W., y Song, H. (2024b). Pricing and production rd decisions in power battery closed-loop supply chain considering government subsidy. *Waste Management*, 190:409–422.
- Zhang, W. y Yang, J. (2023). The impact of hybrid energy storage system on the battery cycle life of replaceable battery electric vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9).
- Zhao, J. y Burke, A. F. (2022). Electric vehicle batteries: Status and perspectives of data-driven diagnosis and prognosis. *Batteries*, 8(10).
- Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A. I., Collis, G. E., Mahon, P. J., Rüther, T., y Hollenkamp, A. F. (2021). A review on battery market trends, second-life reuse, and recycling. *Sustainable Chemistry*, 2(1):167–205.
- Zheng, Y. y Xu, Y. (2023). Optimizing Green Strategy for Retired Electric Vehicle Battery Recycling: An Evolutionary Game Theory Approach. *Sustainability*, 15(21).
- Zhu, J., Feng, T., Lu, Y., y Xue, R. (2024). Optimal government policies for carbon-neutral power battery recycling in electric vehicle industry. *Computers Industrial Engineering*, 189:109952.