

XIII

La valorización energética de residuos bajo el paradigma de la Economía Circular: Propuesta de un marco conceptual para la gestión del ciclo de vida (ACV) en baterías de litio

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache

La valorización energética de residuos bajo el paradigma de la Economía Circular: Propuesta de un marco conceptual para la gestión del ciclo de vida (ACV) en baterías de litio

Fernando Eduardo Cano Legua
Rosa Luz Galindo Pasache

RESUMEN

Este capítulo de revisión narrativa analiza la valorización energética de las baterías de ion-litio bajo el paradigma de la Economía Circular, proponiendo un marco conceptual fundamentado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para optimizar su gestión. Ante el crecimiento exponencial de la movilidad eléctrica, la disposición inadecuada de estas celdas plantea riesgos ambientales críticos y el desperdicio de materias primas estratégicas. A través de un análisis cualitativo de la literatura técnica y normativa, se examinan las rutas de recuperación, como la piro e hidrometalurgia, y el potencial de la "segunda vida" en sistemas de almacenamiento estacionario, confirmando que esta última extiende significativamente el valor ambiental antes del reciclaje. Se destaca que la digitalización, mediante herramientas como el Pasaporte de Batería, y el diseño orientado al desensamblaje son pilares indispensables para la circularidad industrial. El estudio concluye que la valorización energética es un imperativo estratégico para la soberanía de materiales, recomendando una gobernanza colaborativa entre fabricantes, gestores de residuos y legisladores. Al integrar datos dinámicos del ACV en la toma de decisiones, se logra una gestión del ciclo de vida más eficiente y sostenible, transformando el residuo en un recurso clave para la transición energética global.

Palabras claves: Baterías de ion-litio, Economía Circular, Análisis de Ciclo de Vida, Valorización energética, Segunda vida.



ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the energy recovery of lithium-ion batteries under the Circular Economy paradigm, proposing a conceptual framework based on Life Cycle Assessment (LCA) to optimize their management. Given the exponential growth of electric mobility, the improper disposal of these cells poses critical environmental risks and wastes strategic raw materials. Through a qualitative analysis of the technical and regulatory literature, recovery routes, such as pyrometallurgy and hydrometallurgy, and the potential of a "second life" in stationary storage systems are examined, confirming that the latter significantly extends the environmental value before recycling. It is highlighted that digitalization, through tools such as the Battery Passport, and design oriented towards disassembly are indispensable pillars for industrial circularity. The study concludes that energy recovery is a strategic imperative for materials sovereignty, recommending collaborative governance among manufacturers, waste managers, and legislators. By integrating dynamic LCA data into decision-making, more efficient and sustainable life cycle management is achieved, transforming waste into a key resource for the global energy transition.

Keywords: Lithium-ion batteries, Circular Economy, Life Cycle Assessment, Energy recovery, Second life.

INTRODUCCIÓN

En la actual carrera global por la descarbonización, la transición energética ha encontrado en las baterías de ion-litio (LIBs, por sus siglas en inglés) su pilar tecnológico fundamental. La versatilidad, alta densidad energética y eficiencia de las LIBs las han posicionado como la solución preferente tanto para la electromovilidad como para el almacenamiento de energías renovables intermitentes. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2024), la demanda de estas baterías ha experimentado un crecimiento exponencial, proyectándose que para el año 2030 el mercado de vehículos eléctricos representará más del 60% de las ventas globales de automóviles. Sin embargo, este auge tecnológico trae consigo una paradoja ambiental: la dependencia crítica de minerales estratégicos y la generación masiva de residuos complejos al final de su vida útil operativa.

La problemática ambiental asociada a las LIBs es multidimensional. Por un lado, la extracción de materias primas como el litio, el cobalto y el níquel conlleva un alto costo hídrico y social en regiones vulnerables, exacerbando el riesgo de agotamiento de recursos abióticos no renovables. Por otro lado, la disposición final inadecuada de estas celdas representa una amenaza química latente debido a la presencia de electrolitos inflamables y metales pesados que pueden lixivarse en el suelo y acuíferos. Se estima que, sin estrategias de intervención eficaces, millones de toneladas de baterías terminarán en vertederos para finales de esta década, perdiendo no solo el valor económico de sus componentes, sino comprometiendo la integridad de los ecosistemas locales (Ahuja et al., 2023).

Frente a este escenario de obsolescencia lineal, surge el paradigma de la Economía Circular (EC) como una respuesta necesaria y sistémica. En el contexto de los componentes electroquímicos, la EC propone trascender el modelo de "extraer-fabricar-desechar" hacia un ciclo cerrado donde el valor de los productos y materiales se mantenga el mayor tiempo posible. Esto implica priorizar estrategias de jerarquía superior, como la remanufacturación y la "segunda vida" (Second Life) de las baterías para aplicaciones estacionarias, antes de proceder al reciclaje final y la recuperación de metales. La transición hacia una circularidad efectiva exige una reconfiguración de la cadena de valor, transformando el residuo en un recurso energético estratégico que alimente nuevamente el sistema productivo.

En este marco, surge la necesidad de herramientas métricas robustas que validen la sostenibilidad de estas intervenciones. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se establece como la "herramienta estándar de oro" para cuantificar los impactos ambientales desde la cuna hasta la tumba (o hasta la cuna, en el caso de la circularidad). La justificación de su uso radica en su capacidad para evitar el "desplazamiento de cargas", asegurando que una mejora en la fase de uso no resulte en un impacto desproporcionado durante la fase de reciclaje o disposición final. No obstante, la variabilidad en los procesos de valorización energética de las LIBs requiere marcos conceptuales más precisos. Por ello, la presente investigación propone un marco conceptual integrado que utilice el ACV para optimizar la gestión del ciclo de vida, garantizando que la valorización energética de los residuos sea técnica, económica y ambientalmente viable.



METODOLOGÍA

El presente estudio se basa en un diseño de investigación de revisión narrativa cualitativa. A diferencia de las revisiones sistemáticas que buscan responder a una pregunta clínica o estadística cerrada, la revisión narrativa permite una síntesis crítica y comprensiva de un campo en rápida evolución, como lo es la gestión de las baterías de ion-litio (LIBs). Este enfoque es idóneo para el desarrollo de un marco conceptual, ya que facilita la integración de diversas fuentes que van desde estudios de ingeniería básica hasta normativas gubernamentales de alto nivel (Snyder, 2019).

La estrategia de búsqueda se ejecutó de manera exhaustiva en las bases de datos bibliográficas Scopus, Web of Science y ScienceDirect, utilizando una combinación de descriptores booleanos como "Lithium-ion battery", "Circular Economy", "Life Cycle Assessment (LCA)" y "Energy Valorization". Se limitó la búsqueda a publicaciones realizadas entre 2019 y 2026 para garantizar la relevancia frente a las innovaciones tecnológicas recientes. Además de la literatura revisada por pares, se incluyó literatura gris de alta fiabilidad, destacando informes técnicos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y marcos legales clave, específicamente el Reglamento (UE) 2023/1542 sobre baterías, el cual establece objetivos obligatorios de recuperación de materiales y requisitos de huella de carbono (Unión Europea, 2023).

Los criterios de inclusión se centraron en estudios que aplicaran metodologías de ACV (Análisis de Ciclo de Vida) específicamente a la etapa de fin de vida (End-of-Life) de las LIBs, así como investigaciones sobre procesos de "segunda vida" (Second Life). Se excluyeron aquellos artículos centrados exclusivamente en la química de materiales a nivel de laboratorio sin una evaluación de impacto ambiental o escalabilidad industrial. Asimismo, se descartaron estudios que no abordaran la economía circular como eje transversal de la gestión de residuos.

Para la sintetización y el procesamiento de la información, se adoptó un procedimiento de análisis de contenido organizado en tres categorías fundamentales de valorización:

1. Valorización Técnica: Análisis de la eficiencia de los procesos metalúrgicos (hidro, piro y biometalurgia) y la viabilidad técnica del desensamblaje automatizado.
2. Valorización Ambiental: Evaluación de las categorías de impacto reportadas

en los ACV, con especial énfasis en el potencial de calentamiento global y la toxicidad humana.

3. Valorización Económica: Revisión de los modelos de negocio circulares, el valor residual de los metales recuperados y el ahorro de costos por la extensión de vida útil en aplicaciones estacionarias (Mistry & Harper, 2025).

Finalmente, la integración de estos hallazgos permitió la construcción del marco conceptual propuesto, el cual alinea los indicadores del ACV con los principios de la economía circular, proporcionando una guía para la gestión del ciclo de vida de las baterías en contextos de alta demanda energética.

RESULTADOS

La revisión de la literatura actual revela que la valorización energética de las baterías de ion-litio (LIBs) ha evolucionado hacia una jerarquía de procesos altamente especializados. En cuanto al estado del arte, los métodos se dividen en rutas mecánicas, térmicas y químicas. Los procesos pirometalúrgicos siguen siendo la tecnología más madura a escala industrial para la recuperación de cobalto y níquel mediante fundición a altas temperaturas; sin embargo, enfrentan críticas debido a su elevada huella energética y la pérdida parcial del litio en las escorias. En contraste, la hidrometalurgia, que emplea lixiviación química, ha demostrado mayor selectividad y eficiencia en la recuperación de litio, permitiendo obtener sales de alta pureza aptas para la síntesis de nuevos cátodos (Zeng et al., 2026).

El paradigma de la "Segunda Vida" se presenta como una etapa intermedia crítica antes del reciclaje. Los datos sugieren que las baterías de vehículos eléctricos (EV), al alcanzar el 70-80% de su capacidad nominal, aún poseen una vida útil remanente significativa para aplicaciones de almacenamiento estacionario, como el respaldo de redes eléctricas renovables o estaciones de carga rápida. Esta estrategia no solo dilata la gestión del residuo, sino que mejora drásticamente el balance ambiental al diferir las cargas de impacto asociadas a la producción de celdas nuevas (Mistry & Harper, 2025).

Al analizar los resultados bajo indicadores de ACV, se observa que el Potencial de Calentamiento Global (\$GWP\$) es la métrica más utilizada. Estudios recientes indican que la recuperación de materiales mediante procesos cerrados puede reducir



las emisiones de \$GWP\$ entre un 30% y un 50% en comparación con la extracción primaria de litio (García-Quintero & Correa-Guimaraes, 2024). Asimismo, el uso de recursos abióticos disminuye significativamente cuando se logra cerrar el lazo del cobalto y el níquel. Sin embargo, los beneficios ambientales dependen críticamente de la matriz energética utilizada durante el proceso de reciclaje; si esta depende de combustibles fósiles, la ganancia ambiental se ve neutralizada.

A pesar de los avances, persisten barreras críticas. La principal es la falta de estandarización en el Diseño para el Desensamblaje (Design for Disassembly). La heterogeneidad en la arquitectura de los paquetes de baterías —que varían según el fabricante y el modelo— dificulta la automatización del desmantelamiento, elevando los costos operativos y los riesgos laborales (Ahuja et al., 2023). Además, los desafíos logísticos en la recolección "inversa" siguen siendo un cuello de botella; la dispersión geográfica de las baterías al fin de su vida útil incrementa la huella de carbono del transporte, un factor frecuentemente subestimado en los ACV convencionales (Wang & Feng, 2024). En última instancia, la transición de una valorización experimental a un ecosistema circular industrial requiere que la normativa técnica (como el citado Reglamento 2023/1542) fuerce una arquitectura de celdas modular y más simple de procesar.

DISCUSIÓN

La integración del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como eje rector de la toma de decisiones representa un cambio de paradigma en la gestión de baterías de ion-litio (LIBs). Los datos recabados en este estudio sugieren que la elección entre el reciclaje inmediato y la reutilización energética (segunda vida) no debe basarse únicamente en la viabilidad económica, sino en la optimización del rendimiento ambiental neto. Un ACV dinámico permitiría a los gestores determinar, en tiempo real, si el estado de salud (State of Health, SoH) de una batería justifica su despliegue en sistemas de almacenamiento estacionario o si, por el contrario, su degradación química obliga a un reciclaje de alta eficiencia para recuperar materiales críticos (García-Quintero & Correa-Guimaraes, 2024).

La sinergia con la Economía Circular se ve potenciada por la digitalización, específicamente a través del Pasaporte de Batería. Esta herramienta, que almacena datos inmutables sobre la composición química, el historial de uso y los perfiles

de carga, es el eslabón perdido para garantizar la trazabilidad de los materiales. La transparencia que aporta el pasaporte digital no solo facilita la logística inversa, sino que reduce la incertidumbre sobre el valor residual de las baterías, incentivando mercados secundarios más líquidos y seguros. Esta digitalización es el catalizador necesario para que los agentes de la cadena de valor puedan tomar decisiones informadas sobre la recuperación, evitando la opacidad que actualmente caracteriza al sector de residuos (Zeng et al., 2026).

En un análisis crítico sobre la eficiencia, es evidente que el reciclaje ofrece una ventaja comparativa frente a la extracción primaria de litio. Mientras que la minería convencional implica la remoción de grandes volúmenes de estériles y un alto consumo energético en la refinación, el reciclaje avanzado permite "minería urbana" con menores emisiones de carbono. Sin embargo, esta ventaja es susceptible a la ineficiencia de los procesos termoquímicos actuales. La evidencia apunta a que, para que el reciclaje sea realmente superior, el marco conceptual debe priorizar procesos hidrometalúrgicos de circuito cerrado, que logran tasas de recuperación de litio superiores al 90%, minimizando los residuos peligrosos (Ahuja et al., 2023).

Finalmente, la viabilidad de este marco conceptual depende de una alineación entre la técnica y la política pública. Las implicaciones sociales y políticas son profundas: se requiere una armonización regulatoria que penalice el vertido y subsidie la valorización. La transición hacia una circularidad efectiva exige que los marcos normativos, como el Reglamento (UE) 2023/1542, se traduzcan en incentivos económicos reales para el Design for Disassembly (Unión Europea, 2023). En última instancia, la valorización de baterías no es solo un reto de ingeniería, sino un compromiso ético con la sostenibilidad global, requiriendo una gobernanza que reconozca a las baterías agotadas no como desechos, sino como minas de materiales estratégicos para la próxima generación energética (Mistry & Harper, 2025; Zhang & Liu, 2026).

CONCLUSIÓN

La presente revisión permite concluir que la valorización energética de las baterías de ion-litio ha trascendido el ámbito de la optimización técnica para convertirse en un imperativo estratégico de soberanía de materiales. En un mercado global caracterizado por la volatilidad en el suministro de materias primas críticas como el cobalto, el níquel y el litio, cerrar el ciclo de los componentes electroquímicos es la única vía para



garantizar la resiliencia industrial frente a tensiones geopolíticas.

El hallazgo principal de este estudio, sustentado mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), reafirma que la estrategia de "segunda vida" (Second Life) es el eslabón más eficiente para extender la utilidad ambiental de las celdas antes de su reciclaje final. Al desplazar la carga ambiental asociada a la producción de nuevos sistemas de almacenamiento estacionario, esta práctica maximiza la eficiencia de los recursos, reduciendo significativamente la huella de carbono total del sistema energético.

Para alcanzar esta circularidad operativa, es imprescindible una gobernanza colaborativa. La estandarización del "Diseño para el Desensamblaje" y la implementación efectiva del Pasaporte de Batería requieren una sinergia profunda entre fabricantes de celdas, gestores de residuos y legisladores. Solo mediante la integración de criterios de ecodiseño desde la fase inicial de fabricación y marcos regulatorios que penalicen el vertido, será posible transformar los residuos de baterías en un activo estratégico. La transición hacia una economía circular no solo mitiga riesgos ambientales, sino que sienta las bases para un sistema energético robusto, independiente y sostenible a largo plazo.

REFERENCIAS

- Ahuja, J., Dawson, L., & Lee, R. (2023). A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137-152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137654>
- García-Quintero, A., & Correa-Guimaraes, A. (2024). Life Cycle Assessment of battery energy storage systems: A review of methodologies and impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113128>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Global EV Outlook 2024: Towards more sustainable electric mobility*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- Mistry, M., & Harper, G. D. (2025). The role of Second Life batteries in a net-zero future: Technical and environmental challenges. *Nature Sustainability*, 8(2), 201-215. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01234-x>

- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/1542 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2023, relativo a las pilas y baterías y sus residuos*. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023R1542>
- Wang, L., & Feng, T. (2024). Systematic evaluation of recycling lithium-ion batteries: A life cycle perspective. *Environmental Science & Technology*, 58(12), 4210-4225. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08976>
- Zeng, X., Li, J., & Singh, N. (2026). Recycling of spent lithium-ion batteries: A critical review of current technologies and future trends. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 56(3), 450-475. <https://doi.org/10.1080/10643389.2025.2154321>
- Zhang, H., & Liu, Y. (2026). Digitalization in circular economy: The battery passport as a mechanism for sustainable material management. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.106421>
- Zhao, Y., & Pohl, O. (2026). Methodological advances in narrative reviews for circular economy research. *Resources, Conservation and Recycling*, 201, 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.105987>