

MÉTODOS DE RECICLAJE DE LAS BATERÍAS UTILIZADAS EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL ECUADOR

RECYCLING METHODS FOR RECYCLING METHODS FOR BATTERIES USED IN ELECTRIC VEHICLES IN ECUADOR

Galo Eduardo Maurad Maurad ^{1*}

¹ Instituto Superior Tecnológico Portoviejo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3552-9089>.
Correo: galo.maurad@itsup.edu.ec

Ligia Vanessa Sánchez Parrales ²

² Instituto Superior Tecnológico Portoviejo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1719-8944>.
Correo: ligia.sanchez@itsup.edu.ec

* Autor para correspondencia: galo.maurad@itsup.edu.ec

Resumen

El aumento de vehículos eléctricos a nivel mundial impulsa una transición hacia una movilidad más sostenible y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, uno de los desafíos críticos que acompaña a esta transformación es el manejo y reciclaje adecuado de las baterías utilizadas en estos vehículos. En Ecuador se agudiza esta situación por falta de infraestructura adecuada y políticas específicas para el manejo y reciclaje de estas baterías, lo que plantea desafíos significativos. En este sentido se propone como objetivo: Identificar los métodos y tecnologías de reciclaje de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos, más viables técnica y económicamente para disminuir el impacto ambiental en Ecuador. Se utilizó el paradigma de investigación mixto, con un enfoque de vinculación de métodos teóricos y empíricos. Se emplearon entrevistas semiestructuradas y encuestas y se consultaron documentos oficiales para obtener información pertinente. La muestra fue seleccionada con muestreo no probabilístico. Se obtuvo como resultados los métodos y tecnologías de reciclaje de baterías más aplicables al contexto ecuatoriano, teniendo en cuenta la viabilidad técnica y económica. Se evaluó el impacto que generan estos métodos y tecnologías en el medio ambiente para contribuir con los enfoques más sostenibles.

Palabras clave: métodos; tecnologías; reciclaje; baterías; impacto ambiental

Abstract

The increase in the number of electric vehicles worldwide is driving a transition towards more sustainable and environmentally friendly mobility. However, one of the critical challenges accompanying this

transformation is the proper management and recycling of the batteries used in these vehicles. In Ecuador, this situation is exacerbated by the lack of adequate infrastructure and specific policies for the management and recycling of these batteries, which poses significant challenges. In this sense, the objective is to identify the most technically and economically feasible methods and technologies for recycling the batteries used in electric vehicles in order to reduce the environmental impact in Ecuador. A mixed research paradigm was used, with a focus on linking theoretical and empirical methods. Semi-structured interviews and surveys were used and official documents were consulted to obtain relevant information. The sample was selected with non-probabilistic sampling. The most applicable battery recycling methods and technologies in the Ecuadorian context were obtained as results, taking into account technical and economic feasibility. The impact of these methods and technologies on the environment was evaluated in order to contribute to more sustainable approaches.

Keywords: *methods; technologies; recycling; batteries; environmental impact*

Fecha de recibido: 18/07/2024

Fecha de aceptado: 26/09/2024

Fecha de publicado: 02/10/2024

Introducción

Con los avances científicos tecnológicos del hombre las necesidades de transportarse a disímiles lugares se han vuelto cada vez más fáciles de satisfacer. Los medios de transporte han evolucionado y con esto se ha disminuido el consumo de combustibles y se han comenzado a utilizar variantes y alternativas más ecológicas y sustentables (Zagorodny, 2023). El aumento de la adopción de vehículos eléctricos a nivel del mundo está impulsando una transición hacia una movilidad más sostenible y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, uno de los desafíos críticos que acompaña a esta transformación es el manejo y reciclaje adecuado de las baterías utilizadas en estos vehículos (Dávila Tafur & Villalobos Gómez, 2021).

Se entiende por reciclar, someter materiales o productos usados a un proceso para convertirlos en nuevos productos, con el fin de reducir el consumo de recursos naturales, minimizar la cantidad de desechos y disminuir el impacto ambiental. El reciclaje es una de las tres "R" de la sostenibilidad (reducir, reutilizar, reciclar), y es fundamental para la protección del medio ambiente y el ahorro de energía. Se aplica a diversos materiales como el plástico, vidrio, papel, metales, y otros productos que pueden ser reutilizados en nuevos procesos productivos (Pelegrí, 2022). Los métodos y tecnologías utilizados en el proceso de reciclaje de baterías están descritos en la literatura especializada, algunos más utilizados y otros aún en desarrollo. Algunos de los más extendidos son (Yang, 2021):

- Reciclaje pirometalúrgico: que implica la fundición de las baterías a altas temperaturas en un horno para recuperar los metales valiosos, como cobalto, níquel, cobre y hierro. La batería se descompone en sus componentes básicos, dejando los metales que luego se pueden reutilizar. Este método es muy utilizado actualmente debido a su capacidad para recuperar metales de alto valor.

- **Reciclaje hidrometalúrgico:** es un proceso donde las baterías se disuelven en soluciones ácidas o alcalinas. Luego, se utilizan diferentes procesos químicos para separar los metales. El litio, cobalto, níquel, manganeso y otros metales se pueden extraer en forma pura o en compuestos utilizables. Este método es más eficiente y respetuoso con el medio ambiente que el pirometalúrgico y es ideal para extraer litio y otros metales ligeros.
- **Reciclaje directo (mecánico):** en este método, las baterías se desensamblan mecánicamente para recuperar sus componentes sin necesidad de someterlos a altas temperaturas o productos químicos. Los materiales como los electrodos y los electrolitos se pueden recuperar y reutilizar directamente en nuevas baterías. Este es un método en desarrollo que aún enfrenta desafíos técnicos, pero tiene un gran potencial para el futuro, especialmente en la reutilización de materiales de baterías.
- **Reciclaje electroquímico:** es un método emergente que utiliza técnicas electroquímicas para recuperar los materiales activos de las baterías, especialmente los metales. Mediante la aplicación de corriente eléctrica, los iones de los metales se separan en una solución. Este proceso tiene un futuro prometedor, pero aún no está ampliamente utilizado en el reciclaje de baterías de VE.
- **Reutilización y segunda vida:** las baterías de VE que ya no son aptas para su uso en automóviles pueden seguir teniendo una capacidad considerable y ser reutilizadas en aplicaciones de menor demanda de energía, como sistemas de almacenamiento de energía para hogares o empresas. Esto se conoce como el concepto de "segunda vida" de las baterías. Este método ya se está implementando, especialmente en sistemas de almacenamiento de energía renovable.
- **Reciclaje biológico (biohidrometalurgia):** método experimental utiliza microorganismos para extraer metales de las baterías. Los microbios oxidan los metales, facilitando su recuperación sin necesidad de altas temperaturas ni productos químicos agresivos. Este es un campo en desarrollo con potencial para el futuro, pero actualmente no es un método ampliamente utilizado.

El abordaje de este tema tiene gran importancia en el desarrollo de la ciencia. Los beneficios de reciclar las baterías de los vehículos eléctricos abarcan desde la protección ambiental y el ahorro de recursos hasta la creación de empleo, la reducción de costos y el impulso a la innovación tecnológica. Esto contribuye a una economía más sostenible y a una mayor seguridad energética (Setti, Quintero, & Pimentel, n.d.).

Algunos de los impactos probados en materia de reciclaje es que de acuerdo con la literatura especializada (Dubois et al., 2021), se relacionan con la conservación de recursos: las baterías de los VE, especialmente las de iones de litio, contienen materiales valiosos como litio, cobalto, níquel y manganeso. Estos minerales son limitados y su extracción tiene un alto costo económico y ambiental. El reciclaje permite recuperar estos materiales y reutilizarlos en nuevas baterías, reduciendo la necesidad de extraer más recursos naturales. Con el reciclaje se reducen volúmenes de residuos peligrosos que contienen las baterías, productos químicos y metales pesados que pueden ser tóxicos y dañinos para el medio ambiente si se desechan de forma incorrecta. Si se liberan en vertederos o cuerpos de agua, pueden contaminar el suelo y las fuentes de agua, afectando tanto a la vida silvestre como a los seres humanos.

También se ha manifestado impacto en la disminución de la huella ambiental, la extracción de materias primas y la fabricación de baterías genera una considerable huella de carbono. El reciclaje reduce la demanda de nuevas extracciones, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la destrucción de ecosistemas, ayudando así a combatir el cambio climático. En cuanto a la seguridad, las baterías de los VE

tienen una gran cantidad de energía almacenada, lo que puede generar riesgos si se manejan de manera inadecuada. El reciclaje profesional asegura que las baterías se desmantelen y procesen de forma segura, evitando incendios, explosiones y fugas de materiales peligrosos. Por su parte implica un ahorro energético debido a que producir nuevas baterías desde cero requiere mucha energía. El reciclaje de las baterías usadas reduce la energía necesaria para producir nuevas baterías, contribuyendo a una mayor eficiencia en el uso de recursos.

Actualmente, el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos (VE) afronta varias dificultades, técnicas, económicas y logísticas. Estos deben ser superados para que el reciclaje sea más eficiente, rentable y sostenible (Giner Salcedo, 2022; Ortiz Jaén & Others, 2021; Yang, 2021):

1. Complejidad en el desmantelamiento de baterías
2. Variedad de tecnologías de baterías
3. Recuperación limitada de materiales
4. Costos elevados
5. Disponibilidad limitada de infraestructura
6. Riesgos de seguridad
7. Reciclaje insuficiente de litio
8. Regulaciones insuficientes
9. Logística y transporte de baterías usadas
10. Eficiencia del proceso de reciclaje
11. Desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje

Superar estos desafíos requiere inversión en investigación y desarrollo, mayor infraestructura de reciclaje, incentivos económicos, y regulaciones más estrictas para facilitar el reciclaje eficiente y seguro de las baterías de VE. En Ecuador, donde la infraestructura para vehículos eléctricos está en desarrollo, la implementación de métodos eficientes y sostenibles para el reciclaje de baterías es fundamental para evitar problemas ambientales y de salud pública. Este documento explora los diversos métodos de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos disponibles, evaluando su viabilidad y aplicación en el contexto ecuatoriano. Se analizarán las tecnologías de reciclaje más avanzadas, como la hidrometalurgia y la pirometalurgia, así como las iniciativas y políticas gubernamentales necesarias para fomentar una economía circular en el sector automotriz eléctrico del país. Se han tomado como referencia investigaciones desarrolladas localmente que han abordado los desafíos y propuestas de solución de acuerdo a limitaciones o ventajas locales (Cañizares & Jeanneth, 2022; Cantos & Piguave, 2022; Solano Quilumbango & Tituaña Maldonado, 2022).

El aumento de vehículos eléctricos en Ecuador, impulsado por la búsqueda de alternativas sostenibles al uso de combustibles fósiles, está generando una creciente acumulación de baterías de ion de litio al final de su vida útil. Este fenómeno se ve agravado por la falta de infraestructura adecuada y políticas específicas para el manejo y reciclaje de estas baterías, lo que plantea desafíos significativos tanto a nivel ambiental como económico. En este sentido la investigación pretende identificar los métodos y tecnologías de reciclaje de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos más viables técnica y económicamente para disminuir el impacto ambiental en Ecuador.

A partir del contexto descrito se identificó como problema de la investigación: ¿Cuáles son los métodos y tecnologías de reciclaje de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos más viables en el contexto ecuatoriano? Por lo que se definió como objetivo general: Identificar los métodos y tecnologías de reciclaje de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos más viables técnica y económicamente para disminuir el impacto ambiental en Ecuador.

Materiales y métodos

Este estudio utilizó el paradigma de investigación mixto, por su enfoque permite utilizar métodos y técnicas cualitativos y cuantitativos con el objetivo de obtener, analizar y procesar los datos de forma adecuada. El estudio de los métodos y tecnologías de reciclaje de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos requiere la vinculación de datos e información provenientes de expertos en el tema y además información recopilada de fuentes teóricas, literatura especializada y actualizada en el tema.

Para la selección de los métodos se utilizó un enfoque de análisis teórico-práctico, donde se combina la revisión bibliográfica con la aplicación práctica. Se investigan las teorías y conceptos relacionados con los métodos de reciclaje de baterías utilizadas en vehículos eléctricos, mediante el método teórico de análisis y síntesis, pero también se realizan pruebas, mediciones y se obtienen datos en entornos reales. Se utilizaron además métodos empíricos, entrevistas semi estructuradas a expertos en el tema, ingenieros y profesionales del sector. También se diseñaron encuestas para recopilar datos sobre prácticas de reciclaje más sustentables.

Otros métodos empíricos y técnicas fueron la revisión de documentos porque permite establecer los criterios actualizados a través de documentos oficiales (decretos y legislaciones) así como las normativas ajustadas al contexto nacional que son adoptados para las mejores prácticas en el proceso de reciclaje de las baterías para VE. Por su parte, los cuestionarios permiten valorar cuantitativamente algunos de los factores identificados de acuerdo a la experiencia de especialistas en el contexto ecuatoriano.

Resultados y discusión

La información obtenida mostró que Ecuador, enfrenta una serie de particularidades y desafíos específicos en cuanto al reciclaje de baterías de vehículos eléctricos. Estas particularidades abarcan aspectos ambientales, económicos, logísticos y normativos.

La tabla 1 ofrece una visión comparativa de los diferentes métodos de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos, destacando sus características clave, ventajas, desventajas, y su aplicación actual o futura.

Tabla 1. Visión comparativa de los diferentes métodos de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos

Método de reciclaje	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Pirometalúrgico	Fundición de baterías a altas temperaturas para recuperar metales valiosos.	<ul style="list-style-type: none"> • Recupera metales como cobalto y níquel. • Proceso simple. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de energía. • No recupera litio ni otros componentes. • Emite gases contaminantes. 	Utilizado ampliamente para recuperar metales de alto valor.

Hidrometalúrgico	Disolución de baterías en soluciones químicas para extraer metales.	<ul style="list-style-type: none"> • - Recupera litio, cobalto, níquel, • - Menos emisiones y residuos. • Eficiencia elevada. 	<ul style="list-style-type: none"> • - Uso de productos químicos peligrosos. • - Proceso más complejo y costoso. 	Método eficiente y respetuoso con el medio ambiente, ideal para extraer litio.
Reciclaje Directo (Mecánico)	Desmontaje mecánico de las baterías para reutilizar sus componentes directamente.	<ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo de energía. • Reutiliza componentes directamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • -Difícil de desensamblar sin dañar los materiales. • No siempre recupera todos los materiales eficientemente. 	Método emergente con gran potencial en el futuro.
Electroquímico	Uso de corriente eléctrica para separar y recuperar los metales en solución.	<ul style="list-style-type: none"> • Método limpio y controlado. • Recupera materiales de alta pureza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aún en fase experimental. • Costoso y complicado a gran escala. 	Futuro prometedor, pero limitado actualmente.
Reutilización (Segunda Vida)	Reutilización de baterías agotadas en aplicaciones de menor demanda de energía.	<ul style="list-style-type: none"> • Extiende el ciclo de vida de las baterías. • Alternativa más económica y sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de la batería disminuye con el tiempo. • Eventualmente necesitan ser recicladas. 	Se utiliza en sistemas de almacenamiento de energía.
Biohidrometalurgia	Uso de microorganismos para extraer metales de las baterías.	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo consumo de energía. • Método limpio y sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso lento. • Aún en fase experimental. • No viable a gran escala. 	En desarrollo con potencial futuro.

Nota: Tomado de (Cañizares and Jeanneth 2022).

Además del análisis de los métodos es relevante examinar los desafíos y oportunidades fundamentales del entorno ecuatoriano para ponderar los elementos económicos y medio ambientales en la persecución del objetivo de este trabajo. Los desafíos reconocidos son:

1. Infraestructura limitada

En Ecuador, no existe una infraestructura establecida para el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos (VE) a gran escala. Las instalaciones dedicadas al manejo y reciclaje de baterías de iones de litio son pocas o inexistentes, lo que obliga a exportar las baterías usadas para su reciclaje en otros países con mayor capacidad

tecnológica. Esto genera mayores costos de transporte y logística, lo que dificulta la implementación de una cadena de reciclaje efectiva en el país.

2. Falta de regulaciones específicas

Las normativas ecuatorianas sobre el reciclaje de baterías, en especial las de vehículos eléctricos, son limitadas. Aunque existen leyes ambientales generales que promueven la gestión adecuada de residuos peligrosos, no hay una legislación específica que regule el ciclo de vida completo de las baterías de VE, desde su producción hasta su disposición final. La falta de regulaciones claras y específicas dificulta la creación de incentivos y obligaciones tanto para los consumidores como para los fabricantes y recicladores de baterías.

3. Dependencia de importaciones

Ecuador depende de la importación de vehículos eléctricos y sus baterías, ya que no cuenta con una industria local de fabricación de baterías de iones de litio. Esta dependencia implica que el país tiene un acceso limitado a los conocimientos técnicos y a la capacidad industrial para gestionar el reciclaje de estas baterías de manera eficiente. La dependencia de la tecnología extranjera limita la capacidad local para desarrollar procesos de reciclaje especializados y genera la necesidad de exportar baterías usadas.

4. Costos elevados de transporte y manejo

El transporte de baterías de VE usadas implica altos costos debido a su peso, tamaño y los riesgos asociados al manejo de materiales peligrosos. En Ecuador, la infraestructura de transporte y manejo de residuos peligrosos es limitada, lo que encarece el envío de baterías a plantas de reciclaje en el extranjero. Los altos costos de transporte y logística reducen la viabilidad económica del reciclaje de baterías en Ecuador.

5. Baja adopción de vehículos eléctricos

A pesar de los esfuerzos del gobierno ecuatoriano para promover el uso de vehículos eléctricos, la adopción de estos vehículos sigue siendo relativamente baja en comparación con otros países de la región. Esto significa que la cantidad de baterías de VE que necesitan ser recicladas es actualmente limitada. La baja demanda de reciclaje de baterías hace que las inversiones en infraestructura de reciclaje local no sean rentables a corto plazo, lo que frena el desarrollo de este sector.

6. Oportunidades de economía circular

Aunque la infraestructura de reciclaje es limitada, Ecuador tiene una creciente conciencia sobre la sostenibilidad y la economía circular. El país ya cuenta con programas de reciclaje para otros tipos de residuos electrónicos y peligrosos, lo que podría facilitar la futura inclusión de baterías de VE en estos esquemas. Con el desarrollo de regulaciones e incentivos adecuados, Ecuador podría aprovechar la economía circular para fomentar el reciclaje de baterías de VE y disminuir su dependencia de las importaciones de materias primas.

7. Capacitación y desarrollo tecnológico

Ecuador carece de los conocimientos técnicos avanzados necesarios para el reciclaje eficiente de baterías de VE, ya que este proceso requiere equipos especializados y expertos en química de materiales y gestión de residuos peligrosos. Además, el país necesita más capacitación en el manejo seguro de baterías y la implementación de tecnologías de reciclaje. La falta de capacidad técnica retrasa el desarrollo de soluciones

locales y puede hacer que Ecuador dependa de la tecnología y servicios extranjeros para el reciclaje de baterías.

8. Riesgos ambientales y de salud

Si las baterías de VE no se manejan adecuadamente, pueden representar un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública debido a los metales pesados y productos químicos tóxicos que contienen. En Ecuador, la gestión inadecuada de residuos peligrosos ya es un problema en otros sectores. La falta de infraestructuras adecuadas para el manejo seguro de baterías usadas aumenta el riesgo de contaminación ambiental y problemas de salud relacionados con la exposición a materiales peligrosos.

9. Falta de incentivos financieros

El reciclaje de baterías de VE es un proceso costoso, y actualmente en Ecuador no existen suficientes incentivos financieros para promover este tipo de reciclaje. Los costos de reciclaje suelen superar los beneficios económicos inmediatos, lo que desincentiva a empresas privadas a invertir en infraestructura de reciclaje. Sin incentivos financieros, la implementación de programas de reciclaje de baterías de VE se ve limitada, lo que aumenta la probabilidad de que estas baterías sean desechadas de manera inapropiada.

10. Oportunidad de colaboración regional

Ecuador podría beneficiarse de la colaboración regional con otros países de América Latina que están más avanzados en el desarrollo de tecnologías e infraestructuras para el reciclaje de baterías de VE, como Brasil, México o Chile. Esta cooperación podría reducir los costos de investigación, desarrollo e implementación de soluciones de reciclaje. La colaboración regional facilita el acceso a tecnologías de reciclaje avanzadas y mejoraría la capacidad de Ecuador para gestionar las baterías de VE de manera sostenible.

Los estudios de referencia identifican las siguientes como las más significativas oportunidades y desafíos:

- Limitaciones infraestructurales: Escasa infraestructura de reciclaje y manejo de residuos peligrosos.
- Regulaciones insuficientes: Falta de normativas específicas para baterías de VE.
- Dependencia tecnológica y logística: Falta de capacidades locales para el desmantelamiento y reciclaje.
- Oportunidades potenciales: Fomentar la economía circular y la colaboración regional.

Los datos encontrados permitieron hacer un análisis detallado a partir de las fuentes consultadas y el criterio de los expertos de las principales tecnologías de reciclaje y métodos existentes, en correspondencia con su viabilidad en Ecuador desde los puntos de vista técnico y económico, que se valora en los resultados de la tabla 2, sobre la comparación de métodos y tecnologías de reciclajes de las baterías.

Tabla 2. Comparación de métodos y tecnologías de reciclaje de baterías y su viabilidad técnica y económica.

Tecnología/Método	Viabilidad Técnica	Viabilidad Económica	Análisis comparativo
Pirometalurgia	Baja	Moderada	Altos costos de energía y la falta de infraestructura limitan su aplicación.

Hidrometalurgia	Moderada	Baja a Moderada	Mayor recuperación de materiales, pero costosa y requiere manejo de productos químicos peligrosos.
Reciclaje directo (Mecánico)	Moderada a Alta	Moderada	Menor inversión inicial y aplicable, pero depende de la estandarización de baterías.
Electroquímica	Baja	Baja	Aún en fase experimental, no es viable en el corto plazo.
Biohidrometalurgia	Baja	Baja	Tecnología emergente, aún en desarrollo.
Reutilización en segunda vida	Alta	Alta	Gran potencial para almacenamiento de energía, bajo costo.
Exportación para reciclaje	Alta	Moderada	Viable a corto plazo, aunque con costos logísticos elevados.

Nota: Tomado de (Cañizares and Jeanneth 2022).

La información encontrada refiere que la reutilización en segunda vida y la exportación de baterías son las opciones más viables en el contexto ecuatoriano a corto plazo, tanto técnica como económicamente. Las tecnologías más avanzadas como la pirometalurgia y la hidrometalurgia tienen potencial en el futuro, pero requieren inversiones significativas en infraestructura y tecnología. El reciclaje directo es una opción interesante que podría implementarse a escala local, aunque su viabilidad dependerá del tipo y cantidad de baterías en el mercado ecuatoriano. En la tabla. 3, se ofrece un análisis de como se comporta el impacto ambiental del reciclaje de baterías y cuales son sus beneficios y limitaciones en la actualidad.

Tabla 3. Impacto Ambiental Relacionado con Métodos de Reciclaje

Método de reciclaje	Beneficios ambientales	Limitaciones ambientales
Pirometalurgia	Recuperación de metales valiosos; reducción de necesidad de minería.	Altos costos energéticos; emisiones significativas de GEI; generación de residuos tóxicos.
Hidrometalurgia	Menor consumo de energía; menos emisiones comparado con pirometalurgia.	Manejo de productos químicos peligrosos; generación de residuos químicos.
Reciclaje Directo (Mecánico)	Menor impacto durante el reciclaje; menor consumo energético.	Eficiencia limitada en recuperación de metales; variabilidad en diseños de baterías.
Electroquímica	Alta pureza en la recuperación de metales; potencial menor impacto.	Tecnología emergente; altos costos operativos; falta de infraestructura.
Biohidrometalurgia	Sostenible; menor impacto ambiental.	Tecnología aún en desarrollo; proceso más lento.

Reutilización/Segunda Vida	Extensión de vida útil; reducción de residuos; menor demanda de nuevas baterías.	Logística compleja; capacidad limitada para algunas baterías.
Exportación para Reciclaje	Acceso a tecnología avanzada; recuperación efectiva de materiales.	Costos logísticos altos; impacto ambiental del transporte; dependencia de tecnologías extranjeras.

Nota: Tomado de (Cañizares and Jeanneth 2022).

Tanto los expertos como las fuentes consultadas coinciden en que la pirometalurgia y la hidrometalurgia son métodos robustos, pero tienen un impacto ambiental significativo en términos de consumo energético y residuos tóxicos. Por su parte el reciclaje directo (mecánico) y la biohidrometalurgia presentan ventajas en términos de menor impacto ambiental, pero con limitaciones en eficiencia y desarrollo. La reutilización en segunda vida es una solución prometedora para reducir la demanda de nuevas baterías y minimizar residuos, mientras que la exportación para reciclaje ofrece una solución inmediata, aunque con desafíos logísticos y ambientales asociados.

Conclusiones

El diseño teórico-metodológico propuesto permitió desarrollar la investigación con éxito y la selección de los métodos y técnicas permitió obtener la información oportuna en cada caso. Se realizó una revisión bibliográfica detallada de la literatura especializada para identificar los métodos y tecnologías utilizadas en el reciclaje de baterías utilizadas en vehículos eléctricos. Se encontró que Pirometalurgia, Hidrometalurgia, Reciclaje Directo (Mecánico), Electroquímica, Biohidrometalurgia, Reutilización/Segunda Vida y Exportación para Reciclaje son los más recomendados a nivel internacional y también en Ecuador.

La investigación arrojó que el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos (VE) enfrenta varios desafíos técnicos, económicos y logísticos. Específicamente en el contexto ecuatoriano, la viabilidad técnica y económica de las tecnologías y métodos de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos (VE) enfrenta desafíos específicos, como la infraestructura limitada, la falta de regulación y la dependencia de importaciones

Se hizo un análisis detallado a partir de las fuentes consultadas y el criterio de los expertos, de las principales tecnologías y métodos de reciclaje existentes, en correspondencia con su viabilidad en Ecuador desde los puntos de vista técnico y económico.

Se analizaron los indicadores de impacto en el medio ambiente de cada uno de los métodos y tecnologías utilizadas en el reciclaje de baterías utilizadas en vehículos eléctricos para identificar los que menos agreden a los ecosistemas y por tanto son viables en el contexto ecuatoriano.

Referencias

- Cañizares, G., & Jeanneth, J. (2022). *Propuesta de procesos ambientales apropiados para el reciclaje de baterías de alta tensión presentes en vehículos híbridos y eléctricos*. Retrieved from <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/90137>
- Cantos, A. I. G., & Piguave, C. A. C. (2022). Manejo de desechos peligrosos (pilas alcalinas, de botón de PC,

baterías de portátiles y celulares usadas) de la Universidad. Jipijapa-Manabí-Ecuador. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(5), 352–373.

- Dávila Tafur, R. C., & Villalobos Gomez, A. L. (2021). *Estrategias de reutilización y reciclaje de baterías de Ion Litio de vehículos eléctricos: Una revisión sistemática*. Retrieved from <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85327>
- Dubois, F. I., Falco, M. L. R., Fuentes, C. A., gallegos, M. V., Peluso, M. A., & Sambeth, J. E. (2021). Un problema ambiental serio: el reciclado de pilas y baterías. *Dubois, Franco Ignacio; Falco, Maria Lorena Romina; Fuentes, Cynthia Analia; Gallegos, María Victoria; Peluso, Miguel Andrés; et al.; Un problema ambiental serio: el reciclado de pilas y baterías; Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible; Ambiente en Dialogo*, 2, 4.
- Giner Salcedo, R. (2022). *La economía circular de las baterías de litio en España*. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/187726>
- Ortiz Jaén, A., & Others. (2021). *Estudio de viabilidad en el reciclaje de los metales críticos de baterías y acumuladores*. Retrieved from <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/22706>
- Pelegrí, J. L. (2022). *Reducir, reutilizar y reciclar, claves para salvar los océanos y evitar un clima extremo antes de 2030*. Retrieved from <https://digital.csic.es/handle/10261/311119>
- Setti, A. F. R., Quintero, D. A. R., & Pimentel, M. B. C. (n.d.). Métodos alternativos de pré-tratamiento das baterias de íon- lítio descartadas. *Gov.br*. Retrieved from <https://www.gov.br/cti/pt-br/publicacoes/producao-cientifica/jicc/xxiv-jicc-2022/pdf/jicc-2022-paper-7.pdf>
- Solano Quilumbango, E. A., & Tituaña Maldonado, K. Y. (2022). *Análisis comparativo del impacto causado por las alternativas de reciclaje de baterías de alta tensión de los vehículos híbrido-eléctricos después de cumplir su vida* Retrieved from <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13475>
- Yang, D. (2021). *Reciclaje de baterías de litio para vehículos eléctricos*. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/358238>
- Zagorodny, J. P. (2023). *Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular*. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48838>