



**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero
Automotriz**

INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autor: Sebastián Suárez Suárez

Tutor: Ing. Fernando Gómez Berrezueta, M.Sc.

**Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio de Vehículos Eléctricos en
Ecuador**

Certificado de Autoría

Yo, Sebastián Suárez Suárez, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada. Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

Sebastián Suárez Suárez

C.I.: 0922456900

Aprobación del Tutor

Yo, Fernando Gómez Berrezueta certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Ing. Fernando Gómez Berrezueta, M.Sc.

C.I.: 0103441846

Director de Proyecto

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres y familiares, por su apoyo y por enseñarme el valor
del esfuerzo y la constancia.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y guiarnos con sabiduría en este
camino.

A mis amigos, por su compañerismo y por estar siempre a mi lado, incluso en los
momentos más difíciles.

Y, finalmente, a mi esposa e hijo quienes me motivaron con la
realización de este proyecto.

Sebastián Suárez

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos que han hecho posible la ejecución de este proyecto. Agradezco a Dios por darme la salud y la fortaleza necesarias para llevar a cabo este trabajo.

A mi familia, por su constante apoyo, paciencia y por ser la fuente inagotable de inspiración y motivación en mi vida.

A mi tutor, el Ing. Fernando Gómez Berrezueta, por su guía y valiosos consejos a lo largo de este proceso.

A mis compañeros, por su amistad y por los momentos vividos que enriquecieron esta experiencia académica.

Sebastián Suárez

Índice General

Certificado de Autoría.....	iii
Aprobación del Tutor.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tablas.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
Capítulo I.....	1
Antecedentes.....	1
1.1 Tema de Investigación.....	1
1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema.....	1
1.2.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2.2 Formulación del Problema.....	4
1.2.3 Sistematización del Problema.....	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación y Delimitación de la Investigación.....	5
1.4.1 Justificación Teórica.....	5
1.4.2 Justificación Metodológica.....	6
1.4.3 Justificación Práctica.....	7
1.4.4 Delimitación Temporal.....	7

1.4.5	<i>Delimitación Geográfica</i>	7
1.4.6	<i>Delimitación del Contenido</i>	7
	Capítulo II	9
	Marco Referencial	9
2.1	Marco Teórico.....	9
2.1.1	<i>Conceptos Preliminares</i>	9
2.1.2	<i>Importancia de las Baterías en los Vehículos Eléctricos</i>	10
2.1.3	<i>La Crisis Energética y la Contaminación Ambiental</i>	11
2.1.4	<i>Desafíos Económicos del Reciclaje de Baterías de Iones de Litio</i>	12
2.1.5	<i>Antecedentes sobre las Baterías de Litio</i>	13
2.2	Marco Conceptual	14
2.2.1	<i>Caracterización de la Economía Circular</i>	14
2.2.2	<i>Atracción Histórica hacia las Baterías de Iones de Litio en los Vehículos Eléctricos</i>	15
2.2.3	<i>Baterías de los Vehículos Eléctricos</i>	17
2.2.4	<i>Batería de Iones de Litio</i>	17
2.2.5	<i>Antecedentes sobre las Baterías de Litio</i>	18
2.2.6	<i>Baterías de Iones de Litio como Residuos</i>	18
2.2.7	<i>Reutilización de las Baterías Usadas</i>	19
2.2.8	<i>El Destino Final de las Baterías de Iones de Litio</i>	20
2.2.9	<i>Reciclaje de Baterías de Ion de Litio Gastadas</i>	21
2.2.10	<i>Procesos de Tratamiento Preliminar</i>	22
2.2.11	<i>Second Life (Segunda vida)</i>	24
2.2.12	<i>Regulación sobre Reciclaje de Baterías</i>	25
	Capítulo III	26
	Estado Actual del Reciclaje de Baterías de Litio	26

3.1	Consideraciones de Economía Circular	27
3.1.1	<i>Mercado de Reciclaje de Baterías de Iones de Litio de Ecuador</i>	28
3.2	Reciclaje de las Baterías de los Vehículos Eléctricos	28
3.2.1	<i>Gestión de Residuos</i>	29
3.3	Cadena de Suministro de los Vehículos Eléctricos	30
3.3.1	<i>Pretratamiento de Descarga</i>	30
3.4	Reciclaje de Baterías de Iones de Litio	31
3.4.1	<i>Características del Proceso</i>	32
3.5	Buenas Prácticas de Gestión del Final de Vida Útil de LIB.....	33
3.5.1	<i>Recolección y Transporte</i>	34
3.6	Principales Normas Internacionales	35
3.7	Tasas de Recuperación de Materiales	37
2.2.9	<i>Papel de los Sistemas de Responsabilidad Ampliada del Productor</i>	38
3.8	Descripción General del Reciclaje	39
Capítulo IV.....		43
Implementación Procesos de Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en Ecuador.....		43
4.1	Descripción.....	43
4.2	Reciclaje de las Baterías de los Vehículos Eléctricos	43
4.3	Viabilidad para Implementación de Procesos de Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en Ecuador.....	45
4.3.1	<i>Contexto Actual</i>	45
4.3.2	<i>Potencial Económico</i>	45
4.3.3	<i>Infraestructura Tecnológica</i>	46
4.3.4	<i>Factores Ambientales</i>	46
4.3.5	<i>Marco Regulatorio</i>	47

4.3.6	<i>Reutilización de Baterías</i>	47
4.3.7	<i>Desafíos</i>	48
	Conclusiones	50
	Recomendaciones.....	51
	Bibliografía.....	52

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de Reciclaje Circular de Baterías</i>	3
Figura 2 <i>Reutilización de Baterías de Litio</i>	4
Figura 3 <i>Tamaño y Tendencias del Mercado del Reciclaje de Baterías</i>	10
Figura 4 <i>Optimización del Rendimiento de los Vehículos</i>	11
Figura 5 <i>Materiales de una Batería de Ion Litio</i>	13
Figura 6 <i>Economía Circular de las Baterías</i>	15
Figura 7 <i>Cuota de Mercado de Diversas Baterías para Vehículos Eléctricos en Estados Unidos</i>	16
Figura 8 <i>Proceso de Reutilización de Baterías</i>	19
Figura 9 <i>Ciclo de Vida de una Batería</i>	21
Figura 10 <i>Diagrama de Reciclaje Circular de Baterías</i>	23
Figura 11 <i>Reciclaje de Baterías de Autos Eléctricos</i>	24
Figura 12 <i>Mejores Prácticas para el Reciclaje</i>	26
Figura 13 <i>Cadena de Suministro Inversa Optimizada para Baterías de Vehículos Eléctricos</i>	34
Figura 14 <i>Responsabilidad Ampliada del Productor (REP)</i>	38
Figura 15 <i>Preparación del Modelo 3D</i>	40
Figura 16 <i>Demanda de Baterías</i>	41
Figura 17 <i>Tamaño de las Baterías</i>	44
Figura 18 <i>Análisis PESTEL del Reciclado de Baterías de Vehículos Eléctricos</i>	49

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Pros, Contras y Desafíos de los Diferentes Procesos de Reciclaje</i>	22
Tabla 2 <i>Tasas Obligatorias de Recuperación de Materiales para el Reciclaje de Baterías de Vehículos Eléctricos en China</i>	37

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo principal analizar la problemática del reciclaje y reúso de baterías de litio provenientes de vehículos eléctricos en Ecuador, dada la creciente adopción de esta tecnología y los desafíos ambientales que implica su disposición final. Para ello, se plantean tres objetivos específicos: investigar el estado actual del reciclaje de baterías de litio, evaluando las normativas vigentes en el país; determinar los impactos ambientales asociados a las prácticas de reciclaje y reúso de estas baterías; y evaluar la viabilidad de implementar procesos eficientes y sostenibles de reciclaje y reúso a nivel nacional. Se realiza un análisis documental de normativas locales e internacionales, seguido de una evaluación de los efectos ambientales relacionados con el manejo de las baterías y disposición final y se plantea alternativas para reutilizar las baterías en aplicaciones secundarias como sistemas de almacenamiento de energía. Se verifica la factibilidad técnica, económica y social de establecer sistemas de reciclaje y reúso en Ecuador. Este proyecto busca contribuir al desarrollo de una economía circular en el país, mitigando los impactos ambientales de las baterías de litio y fomentando prácticas sostenibles en el sector automotriz.

Palabras Clave: Baterías de litio, reciclaje, normativas, economía circular.

Abstract

The main objective of this project is to analyze the problem of recycling and reuse of lithium batteries from electric vehicles in Ecuador, given the growing adoption of this technology and the environmental challenges involved in its final disposal. To this end, three specific objectives are proposed: investigate the current state of lithium battery recycling, evaluating the regulations in force in the country; determine the environmental impacts associated with the recycling and reuse practices of these batteries; and evaluate the feasibility of implementing efficient and sustainable recycling and reuse processes at the national level. A documentary analysis of local and international regulations is carried out, followed by an evaluation of the environmental effects related to the handling of the batteries and final disposal, and alternatives are proposed to reuse the batteries in secondary applications such as energy storage systems. The technical, economic and social feasibility of establishing recycling and reuse systems in Ecuador is verified. This project seeks to contribute to the development of a circular economy in the country, mitigating the environmental impacts of lithium batteries and promoting sustainable practices in the automotive sector.

Keywords: Lithium batteries, recycling, regulations, circular economy.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Tema de Investigación

Reciclaje y reúso de baterías de litio de vehículos eléctricos en Ecuador.

1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

Las preocupaciones por la crisis energética y la contaminación ambiental aceleran el desarrollo de los vehículos eléctricos (VE). Los VE se desarrollaron rápidamente en la última década, y el stock mundial de VE aumentó un 63% con respecto a 2017 y alcanzó los 5 millones en 2018 (Till Bunsen et al., 2019).

En la actualidad la movilidad de los vehículos eléctricos ha generado una relevancia radical en el ámbito de tecnología y ayuda al medio ambiente como alternativa de los vehículos de combustión interna significativamente en términos de rendimiento y funcionalidad. En todo el mundo se venden millones de vehículos eléctricos que contienen grandes baterías de iones de litio. Por razones de seguridad y sostenibilidad, estas baterías deben reciclarse o desecharse con cuidado cuando los vehículos llegan al final de su vida útil.

Elsa Olivetti, profesora de ingeniería en el Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales (DMSE) y codirectora del Consorcio de Clima y Sostenibilidad del MIT, afirma que, como todas las formas de reciclaje, el negocio del reciclaje de baterías de vehículos eléctricos dependerá de qué materiales sean más rentables de recuperar.

Los vehículos eléctricos pueden recorrer entre 120.000 y 240.000 km a lo largo de toda su vida útil y se espera que las baterías de iones de litio de los vehículos eléctricos duren unos 8-10 años con una capacidad restante del 70-80% (Chen et al., 2019; Martinez-Laserna et al., 2018).

En el caso de las baterías de iones de litio, afirma, eso suele significar metales como el níquel y el cobalto. Estos materiales son caros y a menudo se extraen en países de bajos ingresos en condiciones problemáticas.

1.2.1 Planteamiento del Problema

A nivel mundial, ha habido un crecimiento exponencial en la producción y aplicación de baterías de iones de litio (LIBs), impulsado por la transición energética y el mercado de vehículos eléctricos. La escasez de materias primas y la estrategia de economía circular de las LIBs incentivan la necesidad de reutilizar componentes, reciclar y dar una segunda vida a las baterías usadas.

Las baterías son la principal fuente de almacenamiento de energía, y el mercado de baterías de iones de litio (LIB) está creciendo a un ritmo rápido. La tendencia es que seguirá creciendo significativamente en los próximos años, con los vehículos eléctricos ligeros (LEV) como el principal impulsor de esta revolución. Para 2030, se estima que se colocarán en el mercado un total de 10,5 TWh de LIB, y los vehículos eléctricos (EV) representarán el 77% del total de LIB instaladas a nivel mundial, equivalente a aproximadamente 8,1 TWh.

Una de las principales razones del importante crecimiento en el uso de vehículos eléctricos son los incentivos gubernamentales destinados a reducir los gases de efecto invernadero y las políticas públicas. Dichos incentivos incluyen tanto a los fabricantes de equipos originales (OEM) como a los consumidores de vehículos eléctricos (Melin, 2021).

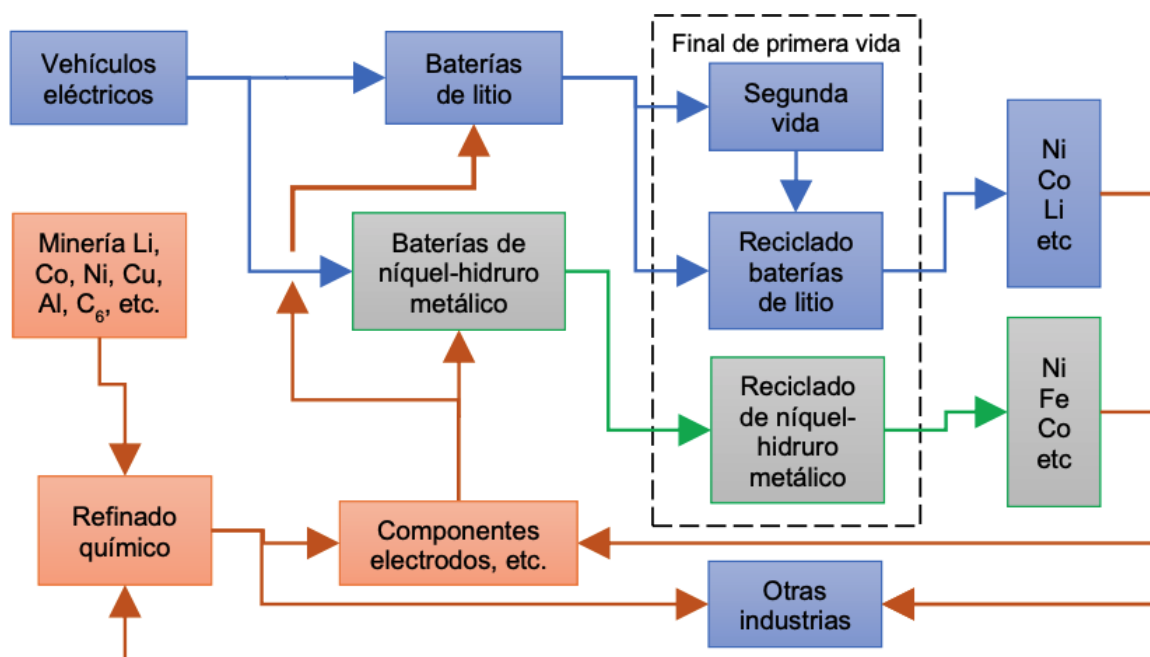
El incremento del uso de vehículos eléctricos en Ecuador ha impulsado la demanda de baterías de litio, fundamentales para su funcionamiento.

Una vez agotada su vida útil, la gestión de estas baterías se convierte en un desafío ambiental y técnico. Actualmente, no hay un sistema robusto para el reciclaje y reúso de baterías de litio en el país, lo que plantea riesgos de contaminación y desperdicio de materiales valiosos.

Esto genera la necesidad de implementar un análisis integral que considere las oportunidades y obstáculos para desarrollar una cadena de reciclaje eficiente y sustentable (Figura 1).

Figura 1

Diagrama de Reciclaje Circular de Baterías



Tomadode: <https://blog.enerlink.com/economia-circular-y-reciclaje-de-baterias-de-vehiculos-electricos>

Debido a que se utilizan muchas baterías de ion de litio, es esencial preocuparse por el destino de estas baterías cuando llegan al final de su vida útil en la aplicación en la que se encuentran. Durante la fabricación de nuevas baterías se producen impactos ambientales significativos. Estos impactos son incluso más importantes que la elección de la química de la batería (Haram, 2021). Además, existe cierta preocupación por la escasez de materias primas y la posibilidad de reducir el valor de las baterías a través del reciclaje. Frente a tales situaciones, existen dos alternativas a la simple eliminación de las baterías de ion de litio: la segunda vida y el reciclaje (Figura 2).

Figura 2

Reutilización de Baterías de Litio

Tomado de: <https://www.cesvicolombia.com/que-hacer-con-las-baterias-de-los-autos-electricos-e-hibridos/>

1.2.2 Formulación del Problema

¿Cómo se puede desarrollar un análisis integral del reciclaje y reúso de baterías de litio provenientes de vehículos eléctricos en Ecuador?

1.2.3 Sistematización del Problema

- ¿Por qué es importante conocer el estado actual del reciclaje de baterías de litio, evaluando las normativas existentes?
- ¿Cuál es la importancia de determinar los impactos ambientales asociados al reciclaje y reúso de baterías de litio?
- ¿Existen la viabilidad de implementar procesos de reciclaje y reúso de baterías de litio en Ecuador?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar un análisis integral del reciclaje y reúso de baterías de litio provenientes de vehículos eléctricos en Ecuador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar el estado actual del reciclaje de baterías de litio, evaluando las normativas existentes.
- Determinar los impactos ambientales asociados al reciclaje y reúso de baterías de litio.
- Evaluar la viabilidad de implementar procesos de reciclaje y reúso de baterías de litio en Ecuador.

1.4 Justificación y Delimitación de la Investigación

La transición hacia la movilidad eléctrica ha tomado un papel central en la búsqueda de soluciones sostenibles para el transporte. Los vehículos eléctricos (EV) representan una alternativa ecológica a los vehículos de combustión interna, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, el rendimiento y la durabilidad de los paquetes de baterías son aspectos críticos que determinan la viabilidad y aceptación generalizada de los EV.

1.4.1 Justificación Teórica

La justificación teórica del proyecto se basa en la creciente demanda de vehículos eléctricos (VE) como una alternativa sostenible a los vehículos de combustión interna, impulsada por la necesidad de reducir emisiones de gases contaminantes y combatir el cambio climático.

Las baterías de ion-litio, que son fundamentales para el funcionamiento de los VE, presentan desafíos tanto en su fabricación como en su disposición final, debido a la escasez de materias primas y los impactos ambientales de su desecho inadecuado.

El reciclaje y reúso de estas baterías representan una oportunidad crucial para mitigar estos efectos, ya que permiten reducir la extracción de materiales críticos como el litio, cobalto y níquel, y minimizan la contaminación.

Desde un enfoque teórico, este proyecto se apoya en principios de sostenibilidad, economía circular y gestión de residuos electrónicos, promoviendo la maximización del ciclo de vida de las baterías. En Ecuador, donde la adopción de vehículos eléctricos está en aumento, es vital desarrollar estrategias eficientes para el manejo de baterías agotadas, alineadas con las normativas ambientales locales e internacionales.

Este análisis busca proporcionar una visión integral de las posibles soluciones para reducir el impacto ambiental y generar un modelo viable para la implementación de tecnologías de reciclaje y reúso en el contexto ecuatoriano.

1.4.2 Justificación Metodológica

La justificación metodológica para el proyecto se fundamenta en la necesidad de adoptar enfoques sostenibles para la gestión de residuos tecnológicos, en especial los relacionados con baterías de vehículos eléctricos, cuya demanda ha crecido exponencialmente.

La metodología empleada es de tipo descriptivo y analítico, utilizando fuentes documentales, datos estadísticos y estudios de caso específicos de Ecuador. Se seleccionarán técnicas de recolección de datos como entrevistas a expertos, encuestas a actores clave del sector automotriz y análisis comparativo de normativas internacionales. Esto permitirá evaluar tanto el impacto ambiental como el potencial económico del reciclaje y reúso de baterías en el contexto local.

1.4.3 Justificación Práctica

La justificación práctica del proyecto radica en la creciente adopción de vehículos eléctricos en el país, lo que genera una necesidad urgente de gestionar adecuadamente las baterías una vez que alcanzan el final de su vida útil. El reciclaje y reúso de estas baterías no solo ayudan a mitigar los impactos ambientales asociados a su disposición, sino que también promueven la recuperación de materiales valiosos, como el litio y el cobalto, y fomentan la economía circular.

Además, este análisis integral permitirá identificar oportunidades y desafíos en la cadena de valor del reciclaje en Ecuador, proporcionando datos para el desarrollo de políticas sostenibles y estrategias que reduzcan la dependencia de la importación de materias primas y mejoren la sostenibilidad del sector automotriz.

1.4.4 Delimitación Temporal

El proyecto se realiza durante un período de 6 meses, el cual inicia en octubre de 2024 y finaliza en abril de 2025.

1.4.5 Delimitación Geográfica

El trabajo se desarrolla en función de la base de datos de vehículos eléctricos en el Ecuador.

1.4.6 Delimitación del Contenido

La delimitación de contenido para este proyecto abarca los siguientes aspectos:

- Marco conceptual y normativo: Revisión de la legislación y políticas vigentes en Ecuador sobre la gestión de residuos electrónicos, en particular baterías de litio, y normativas internacionales aplicables.
- Tecnologías de reciclaje: Análisis de los métodos más avanzados para el reciclaje de baterías de ion-litio, incluyendo procesos de desmantelamiento, recuperación de materiales y reutilización de componentes.

- Reúso de baterías: Exploración de las aplicaciones secundarias de las baterías de vehículos eléctricos, como almacenamiento de energía estacionaria y proyectos de microrredes.
- Estudio de caso en Ecuador: Evaluación de la infraestructura, actores involucrados (gobierno, industria privada, recicladoras), y las prácticas actuales en Ecuador relacionadas con el reciclaje y reúso de baterías.
- Impacto ambiental y económico: Análisis del impacto ambiental de la disposición de baterías y los beneficios potenciales del reciclaje y reúso, así como el costo-beneficio de implementar procesos sostenibles en el país.
- Proyecciones futuras: Consideración de la evolución del mercado de vehículos eléctricos en Ecuador y su relación con la gestión de baterías, incluyendo proyecciones a mediano y largo plazo para la adopción de tecnologías de reciclaje y reúso.

Capítulo II

Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

Los vehículos ecológicos, como los vehículos eléctricos (EV), están adquiriendo una notable popularidad entre los consumidores de todo el mundo. El propósito de esta investigación es establecer los vehículos eléctricos como una solución viable a largo plazo para el futuro de la tecnología en la industria automovilística, que puede reducir la dependencia actual de los combustibles fósiles y también reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Como parte de los beneficios a largo plazo, la adopción de vehículos eléctricos brinda a la sociedad una innovación respetuosa con el medio ambiente.

Es posible que muchas baterías de coches eléctricos se reutilicen, no se reciclen. Una batería de un vehículo eléctrico más antigua puede que ya no sea útil para viajes de larga distancia, pero aún podría tener suficiente capacidad de almacenamiento para encontrar una segunda vida en otro lugar. Se podrían utilizar bloques de baterías viejas para aliviar la tensión en la red eléctrica proporcionando electricidad de reserva cuando más se necesita. En 2018, Nissan experimentó con esta idea utilizando baterías nuevas y viejas de su modelo Leaf EV para alimentar el estadio de fútbol del Ajax de Ámsterdam (Olivetti. 2023).

2.1.1 *Conceptos Preliminares*

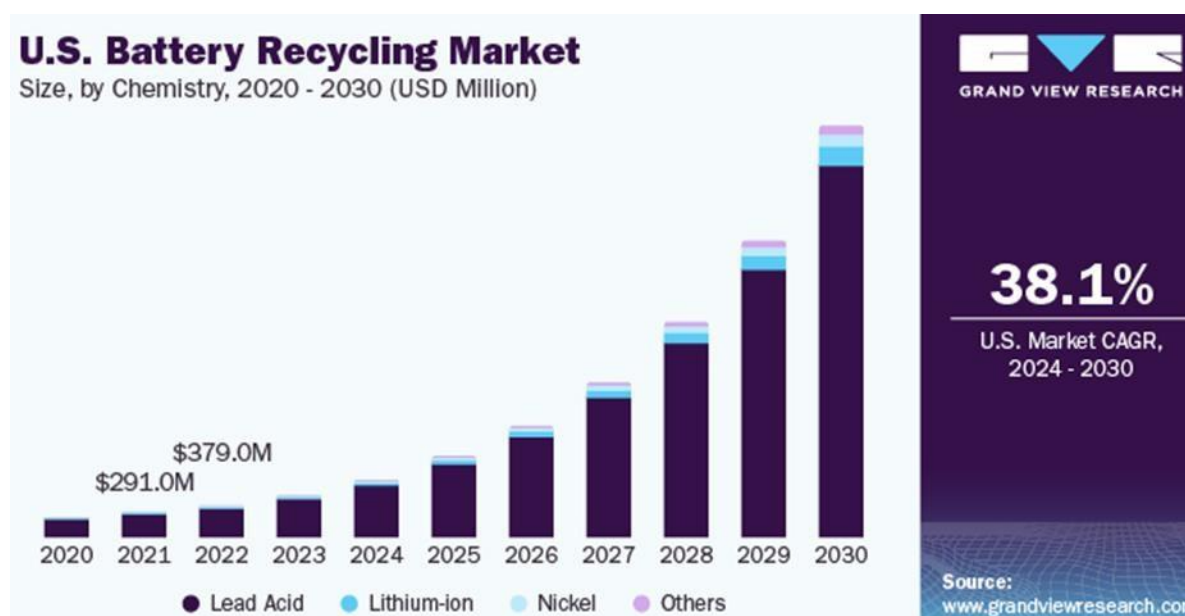
Con el rápido desarrollo de los vehículos eléctricos, la eliminación de baterías de litio retiradas es un gran desafío para la gestión de residuos basada en criterios de fiabilidad, eficiencia y sostenibilidad. La mayoría de los estudios en la revisión de la literatura se han centrado en la minimización de la contaminación ambiental y la maximización de las ganancias económicas (Lai, 2021). Sin embargo, la literatura todavía está a favor de diferentes criterios de fiabilidad, eficiencia y sostenibilidad que son urgentes y esenciales para el reciclaje de baterías de iones de litio gastadas (SLIB).

En la actualidad, existe un gran interés en el desarrollo de energías renovables y usos de energía limpia a nivel mundial. Estos hechos resaltan que la aplicación del almacenamiento de energía basado en baterías de iones de litio (LIB) se ha vuelto cada vez más extendida.

El tamaño del mercado mundial de reciclaje de baterías se estimó en USD 1.83 mil millones en 2023 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 37,6% entre 2024 y 2030 (Figura 3).

Figura 3

Tamaño y Tendencias del Mercado del Reciclaje de Baterías



Tomado de: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/battery-recycling-market>

2.1.2 Importancia de las Baterías en los Vehículos Eléctricos

Las baterías representan uno de los componentes más críticos en los vehículos eléctricos (EV), ya que determinan el rendimiento, la autonomía y la vida útil del vehículo. La tecnología de baterías, especialmente las de iones de litio, ha avanzado significativamente, pero sigue enfrentando desafíos como la degradación con el tiempo, el calentamiento excesivo y la pérdida de capacidad. Estos factores impactan directamente la eficiencia energética y la sostenibilidad económica de los EVs (Figura 4).

Figura 4

Optimización del Rendimiento de los Vehículos



Tomado de: <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/eficiencia-energetica-un-futuro-sostenible>

2.1.3 La Crisis Energética y la Contaminación Ambiental

La crisis energética y la contaminación ambiental han afectado gravemente el desarrollo económico y el nivel de vida de las personas. Los fabricantes de automóviles y los gobiernos han confirmado y aprobado ampliamente los vehículos de nueva energía que tienen enormes ventajas, como bajas emisiones y un alto ahorro de energía.

Para los vehículos de nueva energía, el componente clave que afecta la seguridad del vehículo es la batería. Como portador de la batería, no se puede subestimar la importancia del paquete de baterías. La resistencia, rigidez, disipación de calor y resistencia al agua del cuerpo del paquete de baterías deben cumplir altos requisitos de diseño (Feng y Hu, 2020).

Cuando un vehículo eléctrico choca, se sale de control o se vuelca durante la conducción, el módulo de batería de energía explotaría, provocaría un cortocircuito, se

apretaría, tendría fugas, se agrietaría y se desplazaría, lo que provocaría daños mecánicos, daños químicos, daños eléctricos y la explosión del módulo de la batería provocarían graves lesiones a los ocupantes de los vehículos eléctricos (Du et al., 2019; Aikhuele, 2020; Huang et al., 2021).

2.1.4 Desafíos Económicos del Reciclaje de Baterías de Iones de Litio

Las baterías de iones de litio se han vuelto cada vez más comunes en diversas aplicaciones, desde la electrónica de consumo hasta los vehículos eléctricos. Sin embargo, a medida que estas baterías llegan al final de su vida útil, la cuestión de cómo reciclarlas de una manera económicamente viable y sostenible se vuelve cada vez más importante.

Uno de los principales desafíos del reciclaje de baterías de iones de litio es el bajo valor de los materiales recuperados. Las baterías de iones de litio contienen una variedad de metales, incluidos litio, cobalto, níquel y otros, que se pueden recuperar y reutilizar en la producción de nuevas baterías.

Sin embargo, los precios de mercado de estos materiales a menudo no son lo suficientemente altos como para que el reciclaje sea económicamente viable. Esto es particularmente cierto en el caso del litio y el cobalto, que a menudo se recuperan en pequeñas cantidades y tienen precios bajos por unidad.

En la actualidad, la investigación sobre el reciclaje de baterías de litio ya fuera de uso se centra en la recuperación de metales de ánodo de alto valor, cobalto y litio.

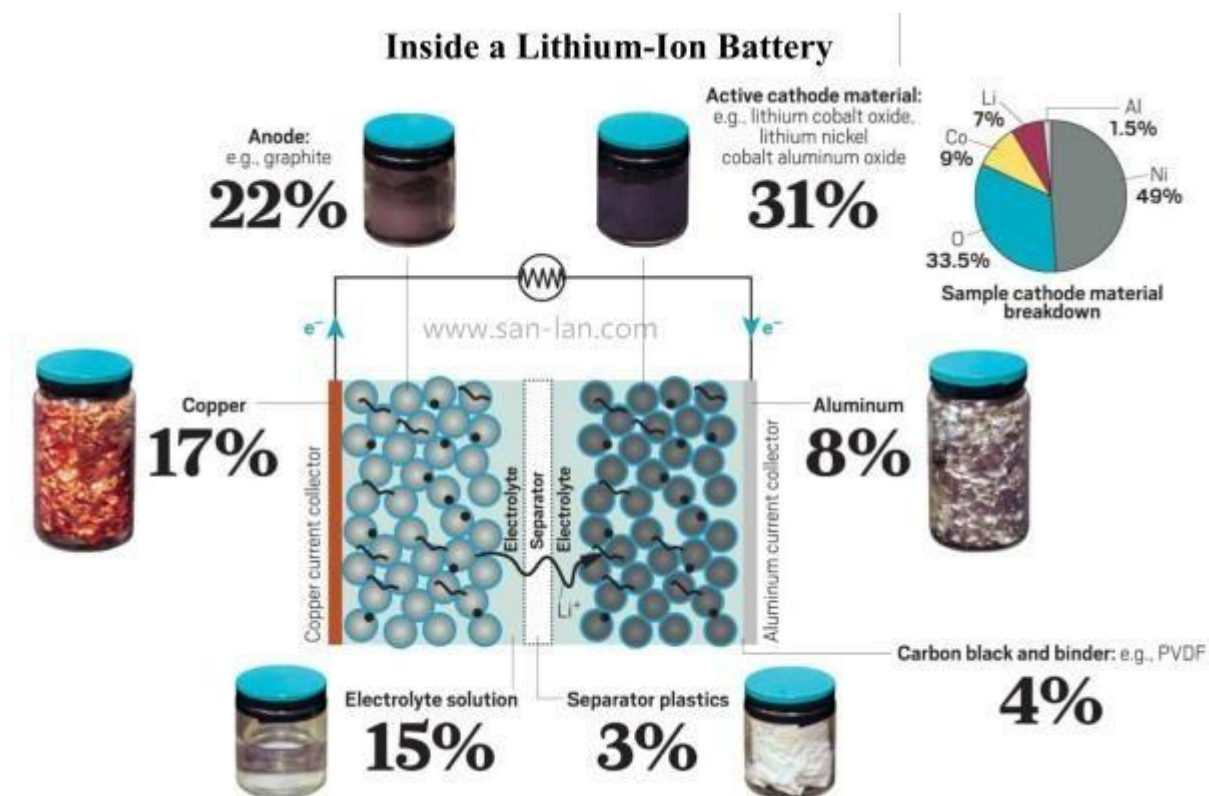
El cobre en el electrodo negativo de la batería de litio de desecho (contenido de hasta el 35%) es una importante materia prima de producción ampliamente utilizada (Figura 5).

El reciclaje de baterías de iones de litio puede reducir los impactos ambientales del ciclo de vida de los vehículos eléctricos (VE) y ayudar a asegurar las cadenas de suministro nacionales. Sin embargo, Estados Unidos, el tercer mercado más grande de VE, no tiene políticas para el reciclaje de baterías al final de su vida útil. La Unión Europea ha propuesto

estándares de contenido reciclado (RCS) para ayudar a impulsar un cambio climático sostenible.

Figura 5

Materiales de una Batería de Ion Litio



Tomado de: <https://groups.google.com/g/vehiculos-electricos/c/IN1ol0hbobU?pli=1>

2.1.5 Antecedentes sobre las Baterías de Litio

Las baterías de iones de litio son un tipo de baterías recargables de uso común que varían en tamaño y diseño, pero funcionan de manera muy similar. Una batería está formada por una o más celdas, y cada celda individual funciona para producir electricidad.

Una celda contiene una capa de ánodo, una capa de cátodo y un separador, todos los cuales están en contacto con un electrolito, que generalmente es un líquido. Estos componentes se apilan o enrollan juntos y se colocan en un embalaje exterior, que generalmente es una lata de acero o una bolsa de aluminio o polímero.

Según la lista de 2022 del Servicio Geológico de Estados Unidos, de estos materiales de uso común, el aluminio, el litio, el níquel, el cobalto, el manganeso y el grafito son minerales críticos, lo que significa que son muy importantes para la seguridad nacional y la economía de Estados Unidos.

La batería primaria no puede recargarse, mientras que la batería secundaria es recargable y se puede reutilizar durante muchos ciclos. Las baterías recargables comprenden principalmente baterías de iones de litio, baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH) y baterías de plomo-ácido. En comparación con otras baterías secundarias, las baterías de iones de litio tienen muchas ventajas superiores, como un mayor voltaje de celda, mayor densidad de energía, larga vida útil, menor efecto memoria, fácil de cargar y mantener, baja autodescarga, respetuosas con el medio ambiente, posibilidad de miniaturización y factores de forma muy delgados (Zeng et al., 2014). Las baterías de iones de litio fueron investigadas inicialmente a fines de la década de 1970 por Armand, sin embargo, Sony fue el primero en comercializar las baterías en 1991 (Blomgren, 2016).

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Caracterización de la Economía Circular

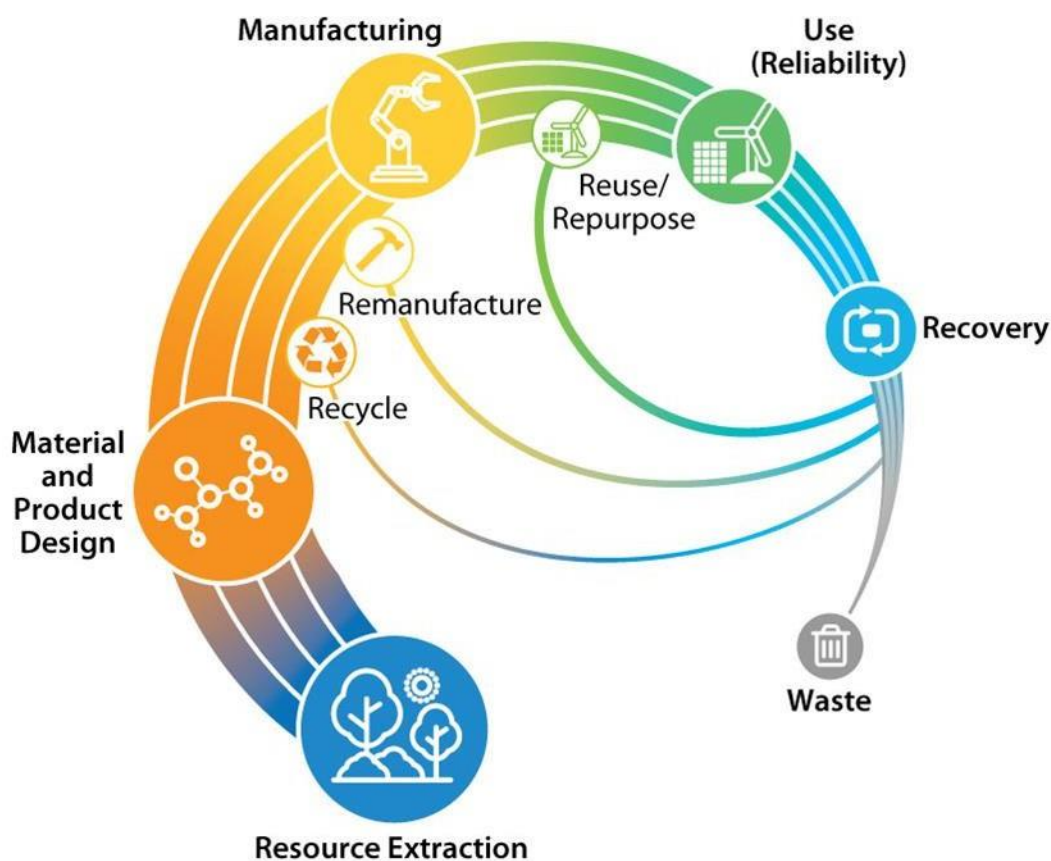
El análisis de la cadena de suministro de reciclaje de baterías del NREL permite a los investigadores evaluar la evolución de los mercados de baterías desde las perspectivas de la oferta y la demanda. El modelo caracteriza toda la economía circular de las baterías de iones de litio, lo que incluye:

- Costo de los recursos, por ejemplo, oferta y demanda de materias primas.
- Cambios en la química de la batería.
- Diseño para la economía circular.
- Duración de la batería y tamaño del mercado.
- Recogida y transporte de baterías al final de su vida útil.

- Mercado de baterías de segunda vida.
- Reciclaje de chatarra de fabricación.
- Reciclaje directo y remanufactura.
- Reciclaje pirometalúrgico e hidrometalúrgico.
- Eliminación segura.

Figura 6

Economía Circular de las Baterías



Tomado: <https://www.nrel.gov/transportation/battery-recycling-supply-chain-analysis.html>

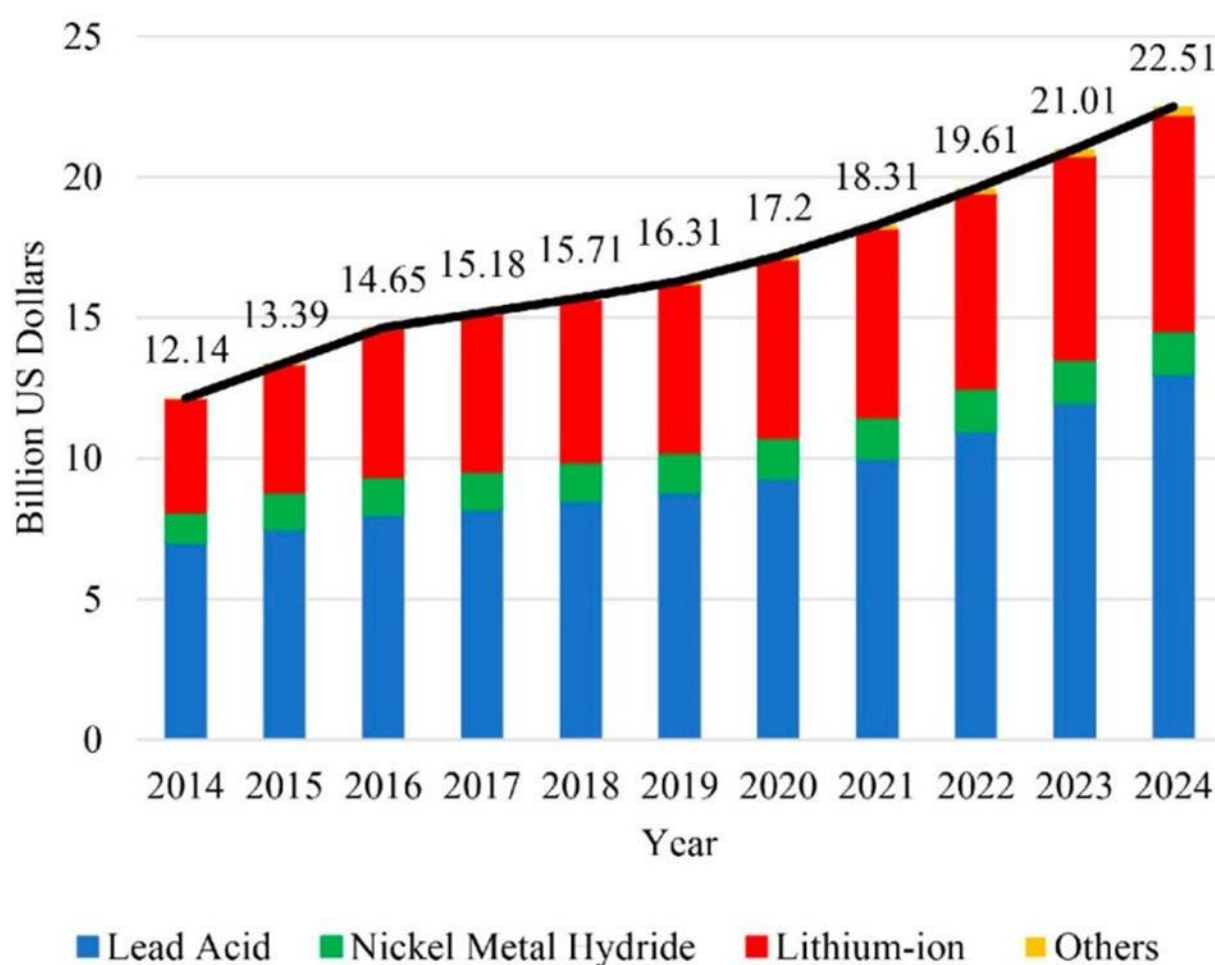
2.2.2 Atracción Histórica hacia las Baterías de Iones de Litio en los Vehículos Eléctricos

Durante los tiempos antes mencionados de la década de 1970, hubo cierta experimentación sobre la viabilidad de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos (Sherif, 2010). Esta tendencia comenzó debido a que Nissan lanzó su modelo EV Altra en 1997

(Li, 2018). Sin embargo, al principio, tuvo ventas mediocres debido a su costoso precio (\$50.99). De hecho, solo se vendieron 139 unidades (Tzev.com, 2020). Sin embargo, después, comenzó a producirse un mayor interés industrial para aumentar sus eficiencias operativas y disminuir el costo total del precio. Después de un tiempo de desarrollo constante, las empresas automotrices a gran escala comenzaron a utilizar baterías de iones de litio con sus vehículos (Eftekhari, 2019). Avanzando rápidamente hasta los tiempos actuales, la participación de mercado de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos está ganando gradualmente más atención. Por ejemplo, dentro del mercado estadounidense, las baterías de iones de litio se han utilizado cada vez más debido a los avances en sus capacidades (Figura 7).

Figura 7

Cuota de Mercado de Diversas Baterías para Vehículos Eléctricos en Estados Unidos



Tomado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10488475/>

2.2.3 Baterías de los Vehículos Eléctricos

Pueden contener más de 200 kg de metales, con hasta 30 kg de níquel y 8 kg de cobalto. Esto se traduce en enormes oportunidades de negocio para los recicladores. Además, los gobiernos occidentales están cada vez más preocupados por obtener metales críticos de socios poco fiables: las mayores reservas de cobalto se encuentran en la República Democrática del Congo; Rusia es un importante productor de níquel; mientras que la mayor parte del litio se extrae en América del Sur y Australia y se procesa en China.

En 2023, la UE adoptó nuevas regulaciones para establecer un objetivo de recuperación de litio de los residuos de baterías. Los niveles mínimos de contenido reciclado para las baterías de los vehículos eléctricos se establecieron en el 16% para el cobalto, el 6% para el litio y el 6% para el níquel. Las baterías de los vehículos eléctricos también deberán mostrar su huella de carbono.

2.2.4 Batería de Iones de Litio

La batería de iones de litio es la fuente de energía indispensable de los vehículos eléctricos modernos. Es recargable y tiene una densidad de energía más alta que otras baterías disponibles comercialmente. Debido a su peso ligero, también se utiliza en teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, etc. Cada batería consta de una cantidad de baterías generalmente llamadas celdas.

La corriente eléctrica llega a las celdas a través de superficies conductoras. Para estas baterías, el aluminio y el cobre son las superficies conductoras más utilizadas.

Al igual que otras baterías, también tiene electrodos positivos y negativos, a saber, cátodo (+) y ánodo (-). El cátodo, que es un electrodo positivo, está compuesto de óxido de litio muy puro (LiMO_2 ; $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}$).

2.2.5 Antecedentes sobre las Baterías de Litio

Los distintos tipos de baterías de iones de litio reciben su nombre de las sustancias químicas que se utilizan en el interior de sus celdas, en particular la química del cátodo. Existen muchas variantes de baterías de iones de litio, pero algunos tipos comunes son:

- Óxido de litio y cobalto.
- Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio.
- Fosfato de hierro y litio.

Las baterías de iones de litio de diferentes composiciones químicas difieren en la cantidad total de energía que pueden proporcionar en una carga, la rapidez con la que se libera esa energía, la estabilidad de la batería, la rapidez con la que se puede recargar y la cantidad total de veces que se puede cargar y descargar, entre otras variables. Debido a estas diferencias, ciertas composiciones químicas se utilizan comúnmente para aplicaciones específicas. Por ejemplo, las composiciones químicas de óxido de litio y cobalto son comunes en la electrónica de consumo, mientras que las composiciones químicas de óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio se utilizan a menudo para baterías de vehículos eléctricos.

2.2.6 Baterías de Iones de Litio como Residuos

La EPA determinó que la mayoría de las baterías de iones de litio que se encuentran en el mercado probablemente se conviertan en desechos peligrosos cuando se las desecha, ya que pueden incendiarse o explotar si no se las manipula con cuidado. La mayoría de las baterías de iones de litio que se desechan probablemente se consideren desechos peligrosos inflamables y reactivos (con los códigos de desechos D001 y D003, respectivamente).

Las baterías de iones de litio al final de su vida útil contienen minerales críticos valiosos necesarios para la producción de baterías nuevas. Las tecnologías de energía limpia, como los sistemas de almacenamiento de energía renovable y las baterías de vehículos eléctricos,

demandarán grandes cantidades de estos minerales, y el reciclaje de baterías de iones de litio usadas podría ayudar a satisfacer esa demanda.

2.2.7 Reutilización de las Baterías Usadas

Se recomienda retirar las baterías si su energía eléctrica actual es inferior al 80 % de su valor original (Hasselbach y Herrmann, 2011). En estas baterías de iones de litio al final de su vida útil queda una cantidad significativa de energía que se puede capitalizar mediante opciones de "reutilización". Esto es importante desde el punto de vista económico, ya que las baterías eléctricas podrían representar aproximadamente el 50 % de los costos totales de los vehículos (Li et al., 2018c). La reutilización de las baterías de iones de litio gastadas de los vehículos eléctricos incluye la refabricación y la readaptación.

Figura 8

Proceso de Reutilización de Baterías



Tomado de: <https://prensa.toyota.es/toyota-inicia-un-novedoso-proyecto-de-reutilizacion-y-reciclaje-de-baterias/>

La remanufactura es una opción para las baterías de iones de litio retiradas, mediante la cual las baterías de iones de litio de potencia se reacondicionan y se emplean en sus aplicaciones

originales (Chen et al., 2019b). La remanufactura incluye el diagnóstico, el desmantelamiento de paquetes de baterías de iones de litio, la sustitución de las celdas de batería dañadas y los módulos de batería dañados en los paquetes y su reensamblaje en nuevos paquetes de baterías de iones de litio.

Se prevé que las cantidades de baterías de iones de litio de vehículos gastadas alcancen aproximadamente el 50 % de la demanda de baterías nuevas entre los años 2020 y 2033, y se estima que la remanufactura de baterías de iones de litio gastadas ahorrará aproximadamente el 40 % del costo del uso de baterías de iones de litio nuevas (Foster et al., 2014).

2.2.8 El Destino Final de las Baterías de Iones de Litio

Según la jerarquía de gestión de residuos, la remanufactura y la reutilización son preferibles al reciclaje. La remanufactura es la opción más ideal para las baterías de iones de litio gastadas, ya que maximiza el valor de las baterías y minimiza las emisiones y el consumo de energía.

El reciclaje directo de las baterías de iones de litio de su primera vida útil (en vehículos) es menos preferible por las razones de un beneficio insuficiente y las inevitables pérdidas de energía y material durante el proceso.

Por otro lado, el reciclaje es ventajoso ya que, en lugar de ser rechazadas, las baterías de iones de litio al final de su vida útil se están convirtiendo en parte de la economía circular, lo que reduce parcialmente la demanda de extracción de nuevos recursos.

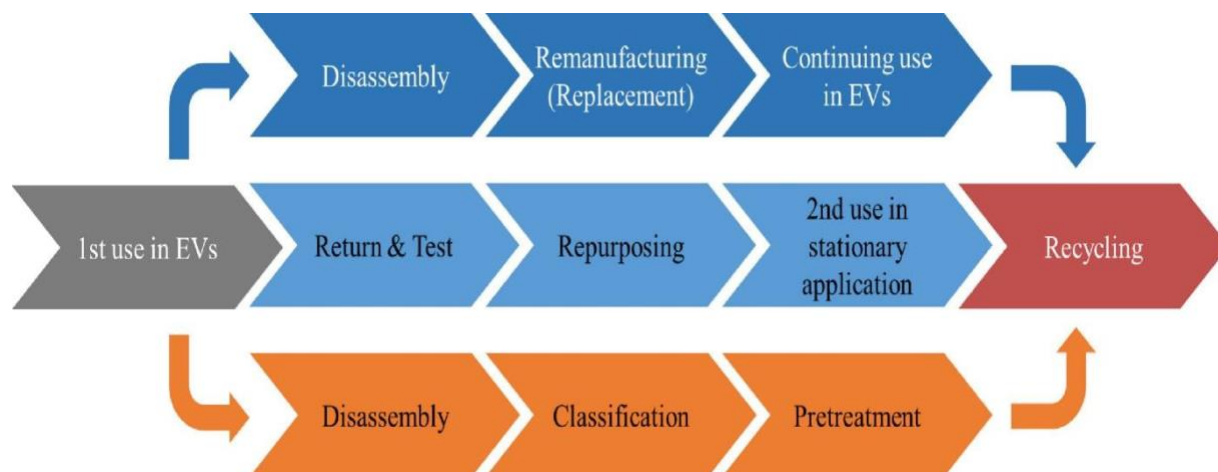
Por el momento, la reutilización está firmemente establecida para las baterías de iones de litio usadas desde el punto de vista económico. Sin embargo, se espera que el creciente número de baterías de iones de litio retiradas supere en gran medida la capacidad del mercado de segundo uso (Sun et al., 2018a).

Al final, las baterías de iones de litio retiradas finalmente deben reciclarse, sin importar si primero se reutilizan o se remanufacturan para una aplicación de segundo uso. La

remanufactura o reutilización solo pospone el reciclaje, que es el destino final de todas las baterías de iones de litio (Figura 9).

Figura 9

Ciclo de Vida de una Batería



Tomado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723010089#fig6>

2.2.9 Reciclaje de Baterías de Ion de Litio Gastadas

La hidrometalurgia, la pirometalurgia y el reciclaje directo son las tres vías principales utilizadas para reciclar las baterías de ion-litio gastadas.

En términos de reciclaje de baterías de iones de litio, actualmente solo se reciclan níquel, cobalto, aluminio, cobre y acero por razones de viabilidad técnica y económica. Otros elementos como el grafito, el litio y el manganeso apenas se consideran, mientras que los plásticos se utilizan como combustible para fines de recuperación de energía (Mossali et al., 2020).

Se concluye que los principales estudios se centran en los materiales de los cátodos Xu et al., 2008).

Los procesos típicos para reciclar baterías de ion de litio gastadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1*Pros, Contras y Desafíos de los Diferentes Procesos de Reciclaje*

Proceso	Ventajas	Desventajas	Desafío
Proceso hidrometalúrgico	• Alta tasa de recuperación • Producto de alta pureza • Bajo consumo de energía • Menos gases residuales • Alta selectividad	• Más aguas residuales • Proceso largo	• Tratamiento de aguas residuales • Optimizar el proceso
Proceso pirometalúrgico	• Operación sencilla y flujo corto • No se requieren categorías ni tamaño de entradas • Alta eficiencia	• No se recuperan Li y Mn • Alto consumo de energía • Baja eficiencia de recuperación • Más gases residuales y mayor costo del tratamiento de estos	• Reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes • Reducir los riesgos ambientales • Combinar bien la hidrometalurgia
Proceso de reciclaje directo	• Ruta de recuperación corta • Bajo consumo de energía • Respetuoso con el medio ambiente • Alta tasa de recuperación	• Altos requerimientos operativos y de equipamiento • Recuperación incompleta	• Reducir los costos de recuperación • Disminuir los requisitos para las categorías • Optimizar aún más el rendimiento del producto

2.2.10 Procesos de Tratamiento Preliminar

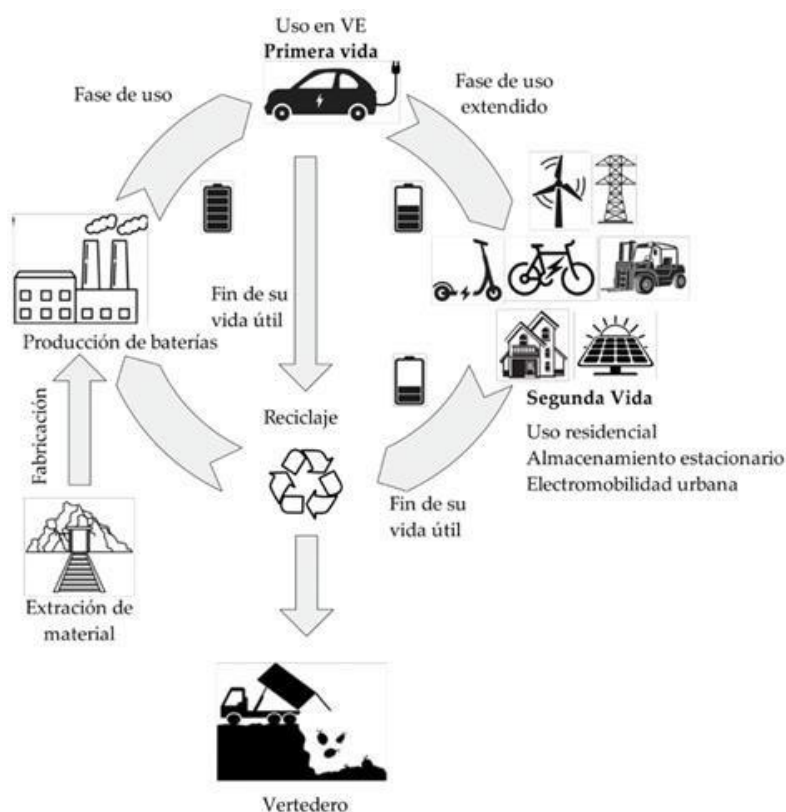
La composición de las baterías de ion-litio al final de su vida útil es compleja, por lo que se necesitan procesos de tratamiento preliminar para separar los distintos elementos de la batería y obtener las sustancias activas valiosas que luego se someten a un procesamiento

adicional. El tratamiento preliminar de las baterías de ion-litio gastadas generalmente comprende tres etapas principales, a saber, descarga, desmantelamiento y separación. La etapa de separación consta de procesos físicos (flotación), mecánicos (tritución y trituración), térmicos (evaporación de componentes orgánicos), químicos (disolución de aglutinante o láminas) o mecanoquímicos (Yao et al., 2018). Algunos materiales o metales valiosos como el ánodo, el Cu y el Al se pueden reciclar fácilmente mediante un pretratamiento debido a sus diferencias en las propiedades físicas.

El reciclaje y la reutilización de los componentes de las baterías son estrategias esenciales para garantizar una gestión sostenible de las baterías de vehículos eléctricos y reducir su impacto ambiental, al tiempo que se aprovechan los valiosos recursos contenidos en estas baterías (Figura 10).

Figura 10

Diagrama de Reciclaje Circular de Baterías



Tomado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec>

2.2.11 *Second Life (Segunda vida)*

La estrategia de Second Life implica brindar una segunda oportunidad a las baterías al utilizarlas en aplicaciones secundarias después de que su capacidad de almacenamiento de energía haya disminuido al punto de no ser adecuadas para vehículos eléctricos.

Las baterías que ya no cumplen con los requisitos para vehículos pueden encontrar una nueva vida en aplicaciones como el almacenamiento de energía en hogares, empresas o instalaciones industriales. Estas baterías aún pueden retener una cantidad significativa de capacidad útil y, por lo tanto, pueden aprovecharse en aplicaciones de respaldo de energía, reducción de picos de demanda o almacenamiento de energía renovable. Volkswagen AG, por medio de su subsidiaria Volkswagen Group Components, comenzó un proyecto para reciclar baterías de automóviles eléctricos en una planta especializada en este proceso en Salzgitter, Alemania (Figura 11).

Figura 11

Reciclaje de Baterías de Autos Eléctricos



Tomado de: <https://www.volkswagen-group.com/en>

2.2.12 Regulación sobre Reciclaje de Baterías

Se han estudiado leyes alternativas y regulaciones para el reciclaje de baterías con el fin de seguir el ritmo de los avances de la ingeniería. La colaboración con grupos gubernamentales, públicos y privados es crucial durante la evolución de sectores en crecimiento, incluidos el reciclaje de baterías y la sostenibilidad.

En enero de 2024, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, que lidera las regulaciones en materia de residuos universales y se centra en mejorar los estándares de seguridad, anunció un nuevo grupo de trabajo intersectorial para centrarse en las directrices propuestas para el etiquetado y la recolección de baterías de litio al final de su vida útil.

Capítulo III

Estado Actual del Reciclaje de Baterías de Litio

La creciente demanda de baterías de iones de litio (LIB), asociada al almacenamiento de energía para vehículos eléctricos, electrónica y energías renovables, ha generado preocupación sobre su adecuada eliminación, reciclaje y gestión del final de su vida útil (EoL).

Actualmente, solo la mitad de todos los LIB que llegan al final de su vida útil a nivel mundial se reciclan y el resto se elimina. Los LIB se consideran residuos peligrosos por su contenido de sustancias peligrosas, así como de electrolitos inflamables. La manipulación y eliminación inadecuadas pueden provocar contaminación ambiental e incendios. Se necesita con urgencia una gestión eficaz y segura del final de su vida útil, una extensión de la vida útil y la recuperación de materiales, especialmente en aquellos países donde aún no se han implementado las mejores prácticas para la eliminación y el reciclaje (Figura 12).

Figura 12

Mejores Prácticas para el Reciclaje



Tomado de: <https://fastercapital.com/es/tema/t%C3%A9cnicas-y-mejores-pr%C3%A1cticas-de-reciclaje.html>

La demanda de baterías de iones de litio está creciendo en América Latina y el Caribe (ALC) debido al aumento de la generación de energía renovable y la adopción de vehículos

eléctricos. La región tiene objetivos ambiciosos para la mitigación del cambio climático y la generación de energía renovable, y se espera que la generación de energía solar y eólica aumente en un 550% para 2030 (con respecto a los niveles de 2015). El uso de sistemas de almacenamiento basados en baterías es crucial para lograr estos objetivos.

3.1 Consideraciones de Economía Circular

La Economía Circular (EC) vincula el uso eficaz de los recursos con el crecimiento económico y es un enfoque regenerativo destinado para reducir los residuos y destinado a garantizar la ecosostenibilidad de los productos postpuso. La creciente demanda de LIB ha generado preocupaciones ambientales y sobre la cadena de suministro global. Algunos problemas que surgen de la demanda actual y futura de LIB incluyen riesgos geopolíticos, cuestiones ambientales y sociales, así como presiones económicas:

- Los materiales críticos utilizados para el ánodo y el cátodo de LIB, como litio, níquel, cobalto, etc., son finitos y están concentrados en los países. que pueden tener regulaciones menos estrictas sobre la salud humana y el medio ambiente.
- Contaminación vinculada a una gestión inadecuada al final de la vida de LIB que contiene materiales tóxicos.
- Uso de agua en la extracción y procesamiento de litio.
- A pesar de la urgente necesidad de utilizar el litio de manera más eficiente, aproximadamente el 90% termina en vertederos, en parte debido a limitaciones técnicas, barreras económicas, lagunas regulatorias y problemas logísticos (Costa et al. 2021). A medida que los problemas ambientales continúan aumentando, las partes interesadas, los formuladores de políticas y los reguladores han comenzado a identificar barreras para una economía circular para LIB y soluciones para impulsar y permitir una gestión ULIB ambientalmente sostenible.

- La economía circular para LIB en este contexto se refiere a la transición de un sistema económico lineal de “tomar, fabricar, consumir y desechar” a un sistema circular que permite una vida útil prolongada, un alto rendimiento y la reutilización o recuperación de materiales críticos (Curtis et al.2021).

3.1.1 Mercado de Reciclaje de Baterías de Iones de Litio de Ecuador

- Es probable que el mercado crezca a una CAGR del 16,32% durante el período de pronóstico de 2024 a 2031.
- El tamaño del mercado de reciclaje de baterías de iones de litio de Ecuador se valoró en 25,58 (nulo) en 2023.
- En 2023, el segmento Química dominó el mercado con la mayor participación de mercado.
- Se espera que el segmento de productos de litio-níquel, manganeso y cobalto (Li-NMC) experimente el crecimiento más rápido durante el período de pronóstico.

3.2 Reciclaje de las Baterías de los Vehículos Eléctricos

Las baterías de vehículos eléctricos son muy difíciles de reciclar, pero algunos de sus componentes, especialmente el níquel y el cobalto, son lo suficientemente valiosos como para amortizar la inversión. En todo el mundo se venden millones de vehículos eléctricos que contienen grandes baterías de iones de litio. Por razones de seguridad y sostenibilidad, estas baterías deben reciclarse o desecharse con cuidado cuando los vehículos llegan al final de su vida útil.

Elsa Olivetti, profesora de ingeniería del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales (DMSE) y codirectora del Consorcio de Clima y Sostenibilidad del MIT, afirma que, como todas las formas de reciclaje, el negocio del reciclaje de baterías de vehículos eléctricos dependerá de qué materiales sean más rentables de recuperar. En el caso de las baterías de iones

de litio, afirma, eso suele significar metales como el níquel y el cobalto. Estos materiales son caros y a menudo se extraen en países de bajos ingresos en condiciones problemáticas.

Ahorrar níquel y cobalto de las baterías viejas podría reducir la cantidad que se necesita extraer de nuevo, especialmente si los recicladores cumplen con sus promesas. Se estima que más del 95 por ciento de estos materiales se pueden recuperar. Sin embargo, a medida que el mundo pase de vehículos a gasolina a vehículos eléctricos, la demanda de estos materiales superará con creces la oferta de reciclaje, por lo que la extracción de metales como el cobalto seguirá siendo necesaria.

Sin embargo, una batería de vehículo eléctrico contiene mucho más que níquel y cobalto. Es una amalgama de plásticos, cobre, aluminio y otros materiales, algunos de los cuales no se pueden recuperar por completo porque no son lo suficientemente valiosos como para que valga la pena. Los materiales que no se reciclan deben enviarse a un vertedero o, si son demasiado peligrosos, almacenarse de forma segura (ClimatePortal, 2024).

3.2.1 Gestión de Residuos

El MAE es la autoridad ambiental del Ecuador, en cooperación con el Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca (MPCEIP) diseñan e implementan la legislación en materia de gestión de residuos y economía circular. El Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) establece que los 221 gobiernos locales (GAD) son responsables de la gestión de los residuos sólidos municipales dentro de su jurisdicción, lo que incluye el diseño de planes y legislación. Ecuador cuenta con un Programa Nacional de Gestión de Residuos 2010-2021 cuyo principal objetivo es eliminar los basurales a cielo abierto de todos los municipios del país.

En este momento Ecuador no cuenta con una ley nacional de manejo de residuos, la legislación más importante en materia de manejo de residuos es el Código Orgánico Ambiental (COA). El COA, aprobado en 2018, promueve la garantía de un medio ambiente sano y la

protección de los derechos de la naturaleza. El capítulo 5 del documento describe las políticas generales de gestión integral de residuos, incluyendo residuos municipales, peligrosos y especiales (como serían los componentes de las baterías de los vehículos eléctricos).

3.3 Cadena de Suministro de los Vehículos Eléctricos

La transición a los vehículos eléctricos está impulsada por la necesidad de limitar las emisiones del sector del transporte, una ocasión excepcional en la que casi universalmente se exige un cambio drástico del statu quo. Los vehículos están pasando de las explosiones a la electricidad (los motores de combustión están dando paso a la tecnología de almacenamiento de energía) y la escala de crecimiento será enorme.

Bajo la superficie de este futuro eléctrico se esconde una cadena de suministro relativamente joven que lucha por mantenerse al día. El mercado de la demanda puede fluctuar a lo largo de meses (de hecho, las ventas de vehículos de nueva energía (NEV) chinos se han más que duplicado entre enero y septiembre del 2023). Pero la expansión de las fases upstream y midstream para producir materiales para baterías implica plazos de entrega de varios años. Como se trata de una industria tan nueva, la capacidad histórica para ponerla en marcha es limitada. Muchos ven este entorno propicio para que el reciclaje tenga un impacto tangible.

3.3.1 Pretratamiento de Descarga

Es posible que todavía haya electricidad residual en las baterías de iones de litio usadas. Para evitar posibles peligros como explosiones o combustión espontánea durante el proceso de desmantelamiento, es necesario descargar las baterías antes del desmantelamiento (Castillo et al., 2002). Generalmente, las baterías usadas se colocan en una solución de electrolitos (generalmente electrolitos de carbonato (K_2CO_3 y Na_2CO_3) o electrolitos de sulfato ($FeSO_4$, $MnSO_4$) (Rouhi et al., 2022)) y la electricidad restante se descarga.

3.4 Reciclaje de Baterías de Iones de Litio

El reciclaje seguro de las baterías de iones de litio al final de su vida útil conserva los minerales críticos y otros elementos valiosos que se utilizan en las baterías y es un enfoque más sostenible que la eliminación. El reciclaje de baterías de iones de litio es frecuentemente un proceso de varios pasos. Aunque no existe un único camino que tomen todas las baterías al final de su vida útil, la electrónica de consumo, las baterías, y los dispositivos que contienen baterías suelen ser recogidos inicialmente por un minorista que vendió el artículo de reemplazo, por un recolector de desechos electrónicos o por una empresa de eliminación de activos de TI.

Las baterías de los vehículos eléctricos pueden acabar en un concesionario o taller mecánico de automóviles, si es necesario reemplazar la batería del vehículo, o en una desensambladora de automóviles, si todo el vehículo llega al final de su vida útil. En todos los casos, las baterías deben ser identificados y clasificados para un reciclaje adecuado y pueden cambiar de manos varias veces en el proceso, siendo enviados a otras instalaciones de recolección antes de llegar a una instalación que pueda procesarlos.

Los paquetes de batería más grande se pueden desmontar parcialmente en cualquier momento de este proceso en celdas o módulos para facilitar transporte, almacenamiento y procesamiento.

Algunos paquetes o módulos de baterías también pueden evaluarse para su reparación o reutilización, ya sea volviéndolos a colocar en un dispositivo del mismo diseño que su primera aplicación o reutilizado en un tipo diferente de producto. Por ejemplo, algunas empresas están experimentando con la reutilización de vehículos eléctricos usados.

Baterías para almacenamiento estacionario de energía. Los paquetes de baterías que se pueden reparar pueden tener uno o más módulos de bajo rendimiento se reemplazan antes de volver a usarlos en el original u otro destino.

3.4.1 Características del Proceso

Cuando una batería está programada para ser reciclada después de su recolección y evaluación, el siguiente paso común de gestión es pretratamiento o trituración. Dependiendo del tamaño del equipo de trituración, parte o la totalidad de la batería está destrozada. En algunos casos, también se puede triturar una parte de un dispositivo que contiene una batería.

Las baterías se descargan antes de este paso, se trituran en un ambiente inerte o se descomponen de otra manera que se logre evitar incendios durante la trituración. Muchos recicladores de baterías también aceptan materiales para baterías en forma de chatarra de fabricación para su procesamiento.

La operación de destrucción crea una serie de flujos diferentes, incluidos los siguientes:

- Masa negra, un material parecido a una torta de filtración formado por cátodos y ánodos triturados de las baterías.
- Láminas de cobre y aluminio sobre las que se recubren ánodos y cátodos.
- Separadores.
- Plásticos.
- Botes de acero.
- Electrolitos.

La masa negra contiene los materiales que se pueden procesar aún más para convertirlos en nuevos cátodos de batería y polvos de ánodo. Aunque comúnmente se utiliza el término “masa negra”, hoy en día no existen especificaciones para la masa negra y, dependiendo de los insumos y del proceso de trituración empleado, existen una gran variación de un sitio a otro en la composición exacta y la cantidad de líquido en este material.

Con frecuencia, la masa se envía a otra instalación para la recuperación de metales y puede exportarse para este fin.

Otros materiales de salida, como láminas y botes de acero, también se pueden reciclar mediante procesos separados.

3.5 Buenas Prácticas de Gestión del Final de Vida Útil de LIB

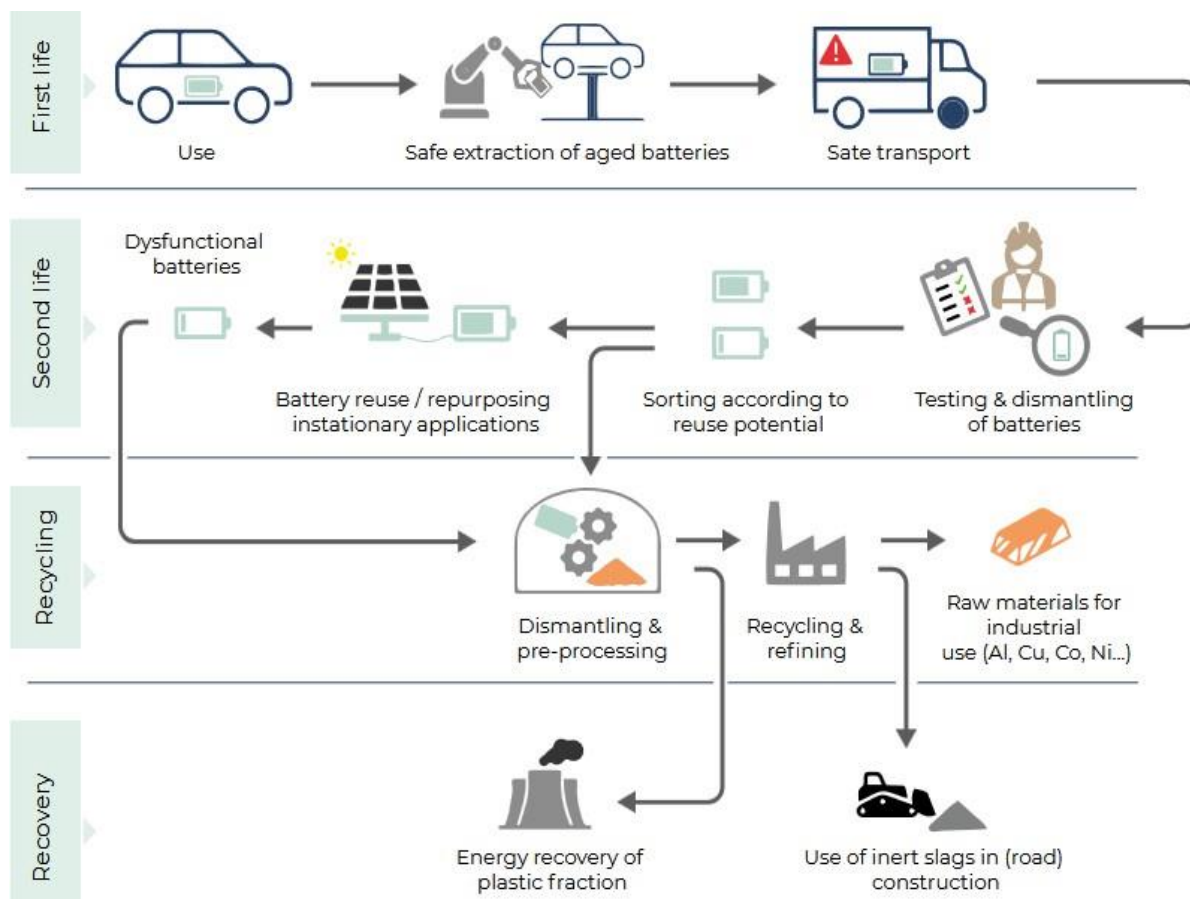
La Figura 13 ofrece una descripción general de una cadena de suministro inversa optimizada para las baterías de vehículos eléctricos:

- Después de que las baterías hayan alcanzado una capacidad restante demasiado baja para el vehículo funcionamiento, los paquetes de baterías se retiran, embalan y envían de forma segura a una instalación autorizada de prueba y tratamiento de baterías.
- La empresa receptora realiza una prueba del estado de salud de los paquetes de baterías y sus módulos. Los módulos reutilizables se utilizan para ensamblar almacenamiento de segunda vida (una práctica también conocida como “reutilización”). Otros componentes de módulos y batería pasan al reciclaje.
- Después de varios años más de uso en una segunda vida, las baterías no tienen un valor de reutilización relevante y también se dedican al reciclaje.
- El reciclaje comienza con el desmontaje manual de paquetes de baterías más grandes. El procesamiento se realiza en condiciones seguras en un ambiente sellado, incluido el polvo y controles de emisiones. La mayoría de los procesos de reciclaje implican un preprocesamiento mecánico, donde los módulos y celdas de la batería se trituran y clasifican en cobre, aluminio, plásticos y masa negra.
- La calidad de los plásticos recuperados suele ser demasiado baja para su reciclaje, por lo que este material se utiliza con fines de recuperación de energía.
- El aluminio, el cobre y la masa negra se pasan a fundiciones especializadas y procesos de refinación que generan materias primas para la producción industrial.

- Los subproductos inertes de las operaciones de fundición (escorias) pueden utilizarse en la construcción de carreteras como grava o arena.

Figura 13

Cadena de Suministro Inversa Optimizada para Baterías de Vehículos Eléctricos



Tomado de: <https://www.oeko.de/en/publications/>

3.5.1 Recolección y Transporte

La recolección de baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil está fuertemente influenciada por la legislación y el sistema de gestión de residuos. En general, muchos tipos de LIB al final de su vida útil no tienen suficiente valor material para ser atractivos para los comerciantes de chatarra y los recicladores. Si bien se pueden generar algunos ingresos por la recuperación de materiales, a menudo no cubren los costos totales de las operaciones de logística inversa y reciclaje (Angliviél et al. 2021; Manhart et al. 2022).

Por lo tanto, la recaudación depende en gran medida de sistemas y normas obligatorios que delega la obligación de recogida segura, transporte y tratamiento responsable (que abarca la reutilización/reutilización y el reciclaje) a actores claramente identificables. Este comúnmente se hace a través de legislación y aplicación de la ley basada en el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (EPR), donde los productores o importadores de baterías y los equipos que contienen baterías tienen la tarea de configurar y operar la recolección sistemas y garantizar que los volúmenes recolectados se traten de acuerdo con criterios definidos tales como tasas de reciclaje, desempeño ambiental y seguridad.

3.6 Principales Normas Internacionales

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) creó la Regla Universal de Residuos existe para promover el reciclaje y la eliminación seguros de residuos peligrosos. Es efectiva en los 50 estados sin excepción. Además de las leyes federales aplicables, hay algunos estados que tienen sus propias regulaciones de reciclaje de baterías, que deben cumplirse más allá de las regulaciones federales.

A continuación, se da una visión general de las principales normas internacionales y buenas prácticas comunes. Se pueden aplicar requisitos, según la legislación o las normas nacionales y procedimientos requeridos por otras partes, como compañías de seguros y empresas de transporte.

Se prohíbe el transporte aéreo de baterías de desecho a menos que lo apruebe el estado de origen y el estado de destino (RRC 2019).

Para el transporte, las baterías al final de su vida útil deben embalsarse en un sistema que sea aislantes, estancos, estabilizadores y/o a prueba de golpes. El embalaje seleccionado debe cumplir con los requisitos de seguridad ADR, que deben ser confirmados por un organismo de certificación acreditado (Reneos, 2022).

Las baterías de iones de litio más pequeñas suelen empaquetarse en barriles aprobados por la ONU, incrustado en arena o vermiculita. La arena/vermiculita separa las pilas, previene movimientos e impactos de golpes y absorbe el calor de células sobrecalentadas. Las válvulas facilitan la liberación de la sobrepresión.

Las baterías dañadas que pesen más de 30 kg deben embalarse por separado.

Los contenedores de transporte, así como los medios de transporte, deben estar etiquetados con la clase apropiada de mercancías peligrosas (código ADR No. 9) y código ONU (UN3480-Baterías de Litio para Reciclaje).

El transporte a través de fronteras internacionales debe, en muchos casos, seguir las pautas previas de consentimiento informado del Convenio de Basilea donde las autoridades competentes autoridades (normalmente la autoridad responsable del medio ambiente) del país exportador notifica a las autoridades competentes el tránsito y la recepción, antes del movimiento.

Envíos de baterías usadas para reutilización sólo podrán quedar exentas de esta norma cuando vaya acompañada de una prueba de funcionalidad por parte de un tercero.

Sin embargo, el número cada vez mayor de LIB utilizados, y especialmente el despliegue de vehículos eléctricos dio lugar a regulaciones específicas para LIB a partir de 2015 (Bird et al.2022). Desde entonces, la buena gestión de LIB adquirió cada vez más importancia y juega un papel importante en varias legislaciones chinas sobre baterías.

Algunos ejemplos son (Bird et al. 2022):

- Política sobre Técnicas de Prevención de la Contaminación por Residuos de Baterías (2016).
- El Plan de Implementación del Sistema de Responsabilidad Ampliada del Productor (2016).

- Especificaciones para las medidas de seguridad, procedimientos, almacenamiento y manejo de baterías de vehículos (2017).
- Estandarizaciones para celdas, módulos y paquetes de baterías para facilitar el reciclaje (2017).

Las regulaciones pertinentes incluyen objetivos de reciclaje para los principales productos de desecho, incluidos LIB, del 40% para 2020 y del 50% para 2025 (Neumann et al. 2022).

3.7 Tasas de Recuperación de Materiales

Las tasas de recuperación solicitadas abordan los compuestos de níquel, cobalto y manganeso, así como una tasa de recuperación compuesta de tierras raras y otros metales en más del 95 % cada uno. Una tasa mínima de recuperación de iones de litio se solicita el 85% (Ver Tabla 2).

Tabla 2

Tasas Obligatorias de Recuperación de Materiales para el Reciclaje de Baterías de Vehículos Eléctricos en China

Materia Prima	Tasa de Recuperación de Materiales
• Tasa de recuperación compuesta de níquel, cobalto y manganeso	$\geq 98\%$
• Tasa de recuperación de iones de litio	$\geq 85\%$
• Tasa de recuperación compuesta de tierras raras y otros metales	$\geq 97\%$

2.2.9 *Papel de los Sistemas de Responsabilidad Ampliada del Productor*

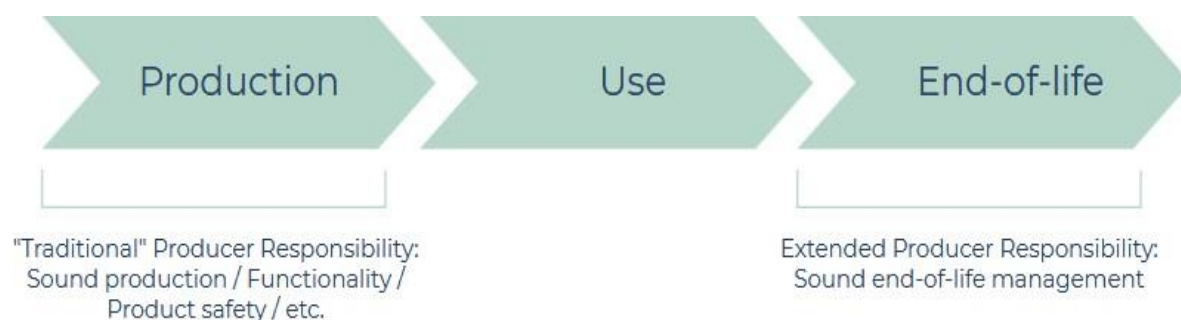
La Responsabilidad Ampliada del Productor (REP) extiende la responsabilidad del productor a la fase del consumidor del ciclo de vida de un producto (Figura 14).

La responsabilidad puede ser económica y/o física y puede recaer total o parcialmente en el productor (OCDE 2022). “La responsabilidad física se refiere a garantizar el tratamiento de productos de desecho, incluida la recolección, el transporte, la clasificación, la reutilización, el reciclaje y la eliminación (Lai, 2021).

La responsabilidad financiera se refiere a la financiación de las actividades antes mencionadas y permite a los productores internalizar los costos del tratamiento de residuos e incorporarlos en sus precios”. (Neumann et al.2022).

Figura 14

Responsabilidad Ampliada del Productor (REP)



Tomado de: <https://duytanrecycling.com/>

La EPR en el contexto del reciclaje de baterías implica:

- Establecer mecanismos de recogida: los productores deben establecer sistemas de recogida para recuperar las baterías usadas de diversas fuentes, incluidos los consumidores, los minoristas y los talleres de reparación. Estos centros de recogida son centros fundamentales para recoger las baterías al final de su vida útil y garantizar que no terminen en vertederos.

- **Facilitación del reciclado eficiente:** en el marco de la EPR, se alienta a los productores a colaborar con las instalaciones de reciclado para procesar las baterías usadas de forma adecuada. Esto implica el desmontaje, la clasificación y el reciclado de los componentes de las baterías, como metales, electrolitos y plásticos. Este proceso ayuda a recuperar recursos valiosos, que pueden utilizarse posteriormente para fabricar baterías nuevas.
- **Promoción de prácticas sostenibles:** se incentiva a los productores a invertir en tecnologías respetuosas con el medio ambiente y en métodos de producción y reciclaje de baterías. Esto puede incluir el uso de materiales ecológicos y procesos energéticamente eficientes, lo que reduce el impacto ambiental general de la producción y eliminación de baterías.

3.8 Descripción General del Reciclaje

Si bien los vehículos eléctricos comparten muchas características con los vehículos a gasolina, la presencia de una gran batería de iones de litio es una gran diferencia. Muchos componentes de los vehículos eléctricos se pueden reciclar de manera similar a un vehículo a gasolina, pero el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos es otra historia.

El reciclaje ULIB regional y prácticas de reutilización, debe ser revisado y también más aspectos (marco regulatorio, mercado desarrollos). La proyección regional incluyó los siguientes criterios:

Marcos regulatorios existentes abordar la gestión EoL de LIB.

Esquemas EPR existentes para baterías y reciclaje de ULIB existente o planificado

Infraestructura.

Necesidades de gestión EoL proyectadas para LIB, concretamente objetivos de movilidad eléctrica y electrificación rural/fuera de la red

La Figura 15 presenta una matriz general de países latinoamericanos en cuanto a los criterios de selección enumerados anteriormente. En general, Sudamérica es donde más se avanza en términos de marco regulatorio y desarrollo de capacidades para EoL.

Figura 15

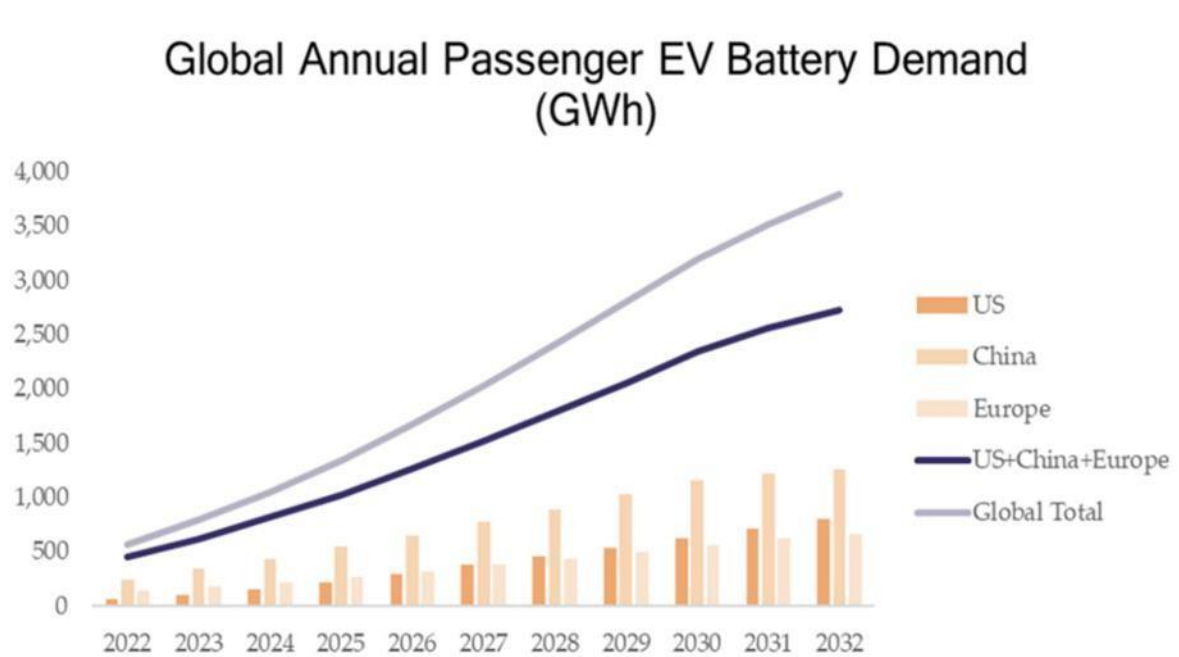
Preparación del Modelo 3D

Country	Population	Virgin lithium value chain	Lithium battery regulation	Mandatory EPR Scheme for batteries	Recycling infrastructure	Projected End-of-Life management needs for ULIB		
	World Bank (2021)			(excl. E-mobility batteries)	(Processing until stage of black mass production)	E-mobility targets		Off-grid decentralized renewable energy (2021)
	Million inhabitants	yes/no	- / + / ++*	no / in development / yes	- / + / ++ / +++**	Year	Target	Systems installed ***
Argentina	45.8	yes	-	in development	+	2030	4,500 E-buses in Buenos Aires	193
Bolivia	11.8	yes	+	yes	-	2030	20% of vehicle fleet is electric	n/d
Brasil	213.9	yes	+	no	++	2030	1,000 E-buses (conservative scenario)	269
Chile	19.2	yes	+	in development	++	2035	100% urban public transport is zero-emission	6,000
Colombia	52.3	no	++	yes	+++	2030	600,000 E-vehicles on Colombian roads	n/d
Costa Rica	5.1	no	+	in development	++	2030	8% of light vehicle fleet electric	2,000
Ecuador	17.9	no	++	no	-	2025	10,000 E-vehicles	n/d
El Salvador	6.5	no	-	no	-	n/d	n/d	38
Guatemala	17.1	no	-	no	-	2032	30% increase in E-vehicle sales	3,600

Tomado de: <https://publications.iadb.org/en/recycling-and-reuse-lithium-batteries-latin-america-and-caribbean-analytical-review-global-and>

3.9 Impactos Ambientales de las Baterías de Iones de Litio

Los vehículos eléctricos requieren baterías de iones de litio que tienen problemas con las emisiones de gases de efecto invernadero durante la extracción y el procesamiento de las materias primas necesarias y la eliminación de las baterías al final de su ciclo de vida. A medida que se venden más y más vehículos eléctricos, aumentan los problemas inherentes a la extracción y la eliminación. La Figura 16 muestra el enorme aumento esperado en la demanda mundial de baterías para vehículos eléctricos.

Figura 16*Demanda de Baterías*

Tomado de: <https://cleantechnica.com/2023/05/08/battery-raw-material-demand-can-the-mining-industry-keep-up/>

La producción de baterías de iones de litio que alimentan vehículos eléctricos genera más emisiones de dióxido de carbono que la producción de automóviles a gasolina, y su eliminación al final de su ciclo de vida es una preocupación ambiental cada vez mayor a medida que más y más vehículos eléctricos pueblan las carreteras del mundo. Alrededor del 40 por ciento del impacto climático de la producción de baterías de iones de litio proviene de la minería y el procesamiento de los minerales necesarios. La minería y el refinado de materiales de batería, y la fabricación de celdas, módulos y paquetes de baterías requieren cantidades significativas de energía que generan emisiones de gases de efecto invernadero. China, que domina la cadena de suministro de baterías para vehículos eléctricos del mundo, obtiene casi el 60 por ciento de su electricidad del carbón, un combustible con una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Según el Wall Street Journal, la minería y la producción de baterías de iones de litio son peores para el clima que la producción de baterías para vehículos con combustibles

fósiles. La producción de la batería de iones de litio promedio utiliza tres veces más demanda de energía acumulada (CED) en comparación con una batería genérica.

Capítulo IV

Implementación Procesos de Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en Ecuador

4.1 Descripción

En la actualidad, no se reciclan muchas baterías de vehículos eléctricos. No porque no se pueda, sino porque la mayoría de las baterías de vehículos eléctricos no han llegado al final de su ciclo de vida.

La vida útil promedio de una batería de iones de litio para vehículos eléctricos es de entre 10 y 20 años. Si tenemos en cuenta que la mayoría de los principales fabricantes de vehículos eléctricos llevan fabricándolos durante la última década, la mayoría de ellos siguen funcionando a pleno rendimiento (Harper, 2021).

Se espera que en 2030 haya 26,4 millones de vehículos eléctricos en circulación. El ICCT estima que nuestra capacidad actual de reciclaje puede manejar baterías de vehículos eléctricos al final de su vida útil hasta 2036... solo seis años después de ese hito. Si se tienen en cuenta las instalaciones que se han anunciado pero que aún no se han construido, la fecha se retrasa hasta 2044.

Debido a que los vehículos eléctricos son tan nuevos, el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos se encuentra actualmente en sus primeras etapas. Según el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT), a fines de 2022, la infraestructura de reciclaje era capaz de reciclar al menos 105.150 toneladas de materiales de baterías al año. Pero los materiales que llegan a las plantas de reciclaje no provienen de baterías de vehículos eléctricos al final de su vida útil, sino principalmente de materiales de desecho resultantes del proceso de creación de baterías de vehículos eléctricos (Costa, 2021).

4.2 Reciclaje de las Baterías de los Vehículos Eléctricos

Todo comienza con los desmanteladores de vehículos que retiran los paquetes de baterías y los venden a recicladores especializados en baterías de iones de litio. Allí, las baterías

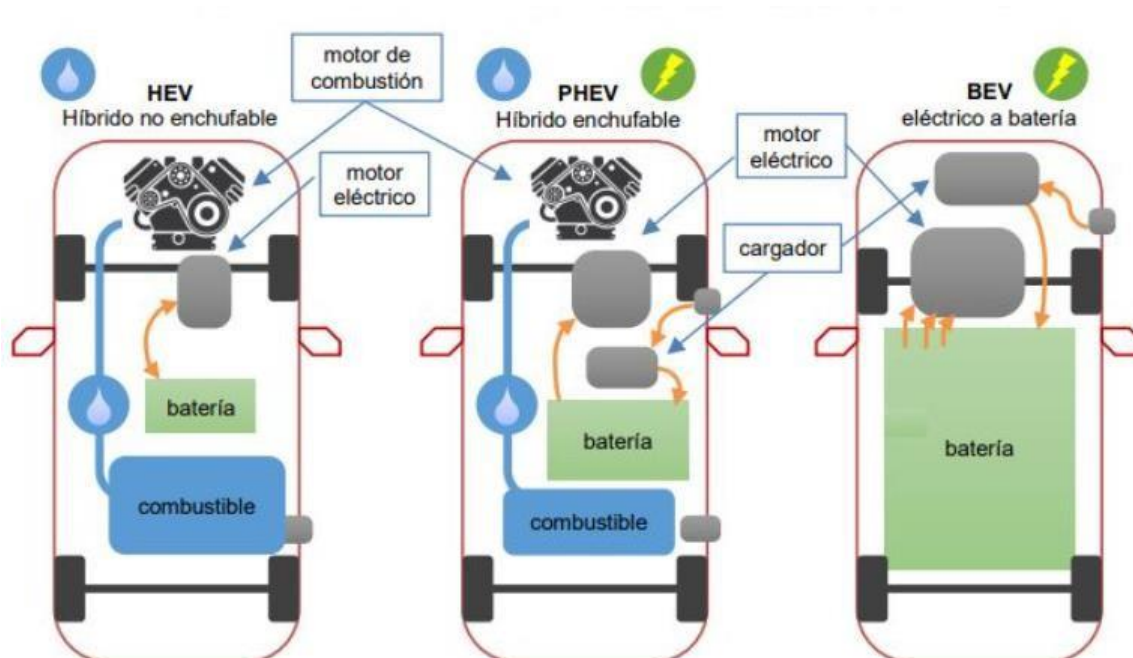
se desmontan cuidadosamente en sus partes individuales. Se eliminan los circuitos, los cables y los plásticos, y las propias celdas de la batería se trituran para separar los diversos minerales que las componen.

Estos materiales se vuelven a empaquetar y se venden a los fabricantes de baterías para crear nuevas baterías. Muchos de estos componentes son, de hecho, infinitamente reciclables, lo que significa que se pueden usar y reutilizar una y otra vez. En teoría, esto significa que las baterías se volverán más baratas con el tiempo a medida que los materiales para fabricarlas estén más disponibles. Y dadas las cifras de nuestro último resumen del mercado de vehículos eléctricos (en concreto, cómo se espera que el mercado crezca un 108 % interanual), debería haber una gran cantidad de material reciclado para alimentar ese ciclo.

En la Figura 17 se puede apreciar el tamaño de las baterías de los distintos tipos de vehículos eléctricos (híbridos y totalmente eléctricos).

Figura 17

Tamaño de las Baterías



Tomado de: <https://miningpress.com/nota/355414/cepal-avance-ev-y-gestion-de-baterias-fuera-de-uso>

4.3 Viabilidad para Implementación de Procesos de Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en Ecuador

La viabilidad de efectuar procesos de reciclaje y reúso de baterías de litio en Ecuador está en función de varios factores, que incluyen los recursos disponibles, el marco regulatorio, y las necesidades locales.

4.3.1 Contexto Actual

- Crecimiento del mercado de vehículos eléctricos (VE): En Ecuador, el uso de VE está en aumento por los incentivos gubernamentales y la exploración de soluciones sostenibles. Este aumento genera una demanda a futuro de reciclaje de baterías de litio agotadas.
- Impacto ambiental: Las baterías de litio poseen metales como níquel, cobalto y manganeso, cuya disposición inadecuada puede causar contaminación. Efectuar procesos de reciclaje aminoraría estos riesgos y encausaría la economía circular.

4.3.2 Potencial Económico

Lo relacionado con el aspecto económico está en función de:

- Disponibilidad de baterías usadas:
Al aumentar la adopción de vehículos eléctricos en Ecuador y el uso de dispositivos electrónicos, el volumen de baterías de litio desechadas se incrementará considerablemente en los próximos años.
El reciclaje de baterías de litio consigue recuperar materiales valiosos como litio, cobalto, níquel y manganeso, reduciendo la dependencia de la minería.
- Impacto económico positivo:
Con la implementación de plantas de reciclaje se puede crear empleos verdes y provocar un ecosistema de economía circular.
Dentro de los factores económicos más importantes están:

- *Inversión inicial:* La instalación de plantas de reciclaje demanda una inversión muy significativa en tecnología, capacitación y logística.
- *Potencial de ingresos:* La recuperación de metales valiosos fermenta la generación de ingresos y la reducción de la dependencia de importaciones.
- *Costos logísticos:* La recopilación de baterías en desuso y su transportación a las instalaciones representa un desafío en términos de eficiencia.

4.3.3 Infraestructura Tecnológica

Lo relacionado con el aspecto tecnológico está en función de:

- Desafíos tecnológicos:

Las tecnologías con mayor avance para el reciclaje, como la pirometalurgia e hidrometalurgia, demandan inversiones muy significativas en equipos y capacitación técnica (Costa, 2021).

Los costos iniciales pueden ser altos, pero las tendencias globales muestran una reducción de costos con la implementación a gran escala.

- Posibilidades locales:

Ecuador no posee instalaciones industriales específicas para el reciclaje de baterías de litio, lo que plantea la necesidad de establecer plantas locales o asociarse con países vecinos.

Asociaciones público-privadas podrían facilitar la construcción de instalaciones especializadas.

Iniciativas como acuerdos de cooperación con países que ya poseen experiencia (China, Alemania, etc.) pueden acelerar el desarrollo tecnológico.

4.3.4 Factores Ambientales

Lo relacionado con el aspecto ecológico está en función de:

- Beneficios ecológicos:

El reciclaje reduce el impacto ambiental asociado con la minería de litio y disminuye la cantidad de desechos peligrosos en los vertederos.

Ecuador, con su biodiversidad única, se beneficiaría de la mitigación del impacto ambiental causado por el desecho incorrecto de baterías.

- Riesgos ambientales:

Los procesos de reciclaje mal gestionados pueden liberar productos químicos tóxicos, por lo que se requiere un manejo estricto y cumplimiento regulatorio.

4.3.5 Marco Regulatorio

Lo relacionado con el aspecto normativo está en función de:

- Estado actual:

En Ecuador, las regulaciones para el manejo de residuos peligrosos aún están en desarrollo. La Ley Orgánica de Economía Circular podría integrar normativas específicas para el reciclaje de baterías.

- Necesidades regulatorias:

Normas claras sobre recolección, transporte, y reciclaje son fundamentales para garantizar la seguridad y eficiencia de estos procesos.

Incentivos fiscales y subsidios podrían fomentar la participación de empresas privadas.

Obligar a fabricantes e importadores a implementar sistemas de recolección.

4.3.6 Reutilización de Baterías

Lo relacionado con el aspecto de ejecución está en función de:

- Segunda vida de las baterías:

Las baterías con menor capacidad pueden reutilizarse (Pražanová, 2022) en aplicaciones estacionarias, como sistemas de almacenamiento de energía para paneles solares.

Esta práctica extiende la vida útil de las baterías, reduce costos y minimiza el impacto ambiental.

La implementación de procesos de reciclaje y reúso de baterías de litio en Ecuador es viable, pero requiere:

- Inversiones en tecnología e infraestructura.
- Desarrollo de un marco regulatorio sólido.
- Colaboración entre el gobierno, la industria privada y la academia.
- Campañas de concienciación para fomentar la recolección responsable de baterías usadas.

Un enfoque integral no solo reducirá la huella ambiental, sino que también fortalecerá la economía verde del país, posicionándolo como líder en sostenibilidad en la región.

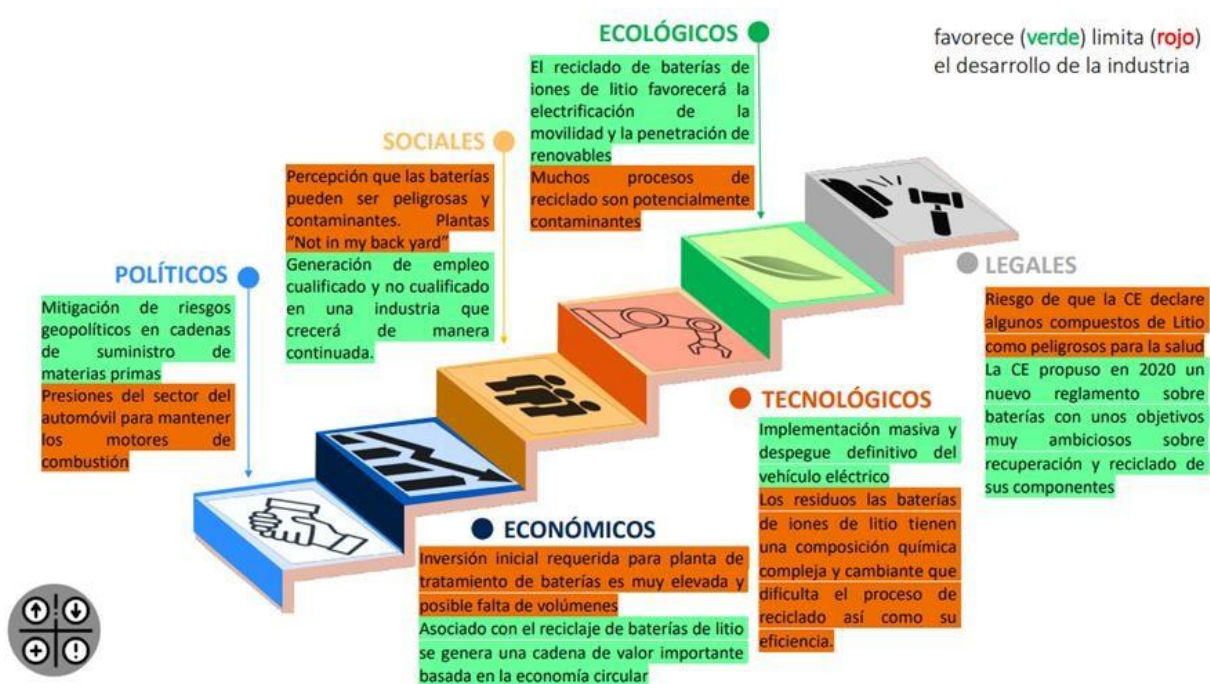
4.3.7 Desafíos

- Falta de concienciación: La población y las empresas necesitan mayor educación sobre los beneficios del reciclaje de baterías.
- Volumen limitado: Actualmente, el número de baterías agotadas puede no justificar la instalación de una planta, salvo que se incluya colaboración regional.
- Barreras tecnológicas: Importar maquinaria especializada puede ser costoso y complicado.

El proceso de reciclado de baterías tiene muchos desafíos (Bae, 2021), desde la sostenibilidad o los costes hasta la peligrosidad de su manipulación y la escasez de materiales. Para superar este reto, es urgente la mejora y el diseño de nuevos procesos industriales que garanticen el desarrollo económico mermando el impacto sobre el medio ambiente. Por lo que se ha tomado como referencia un análisis PESTEL del reciclado de baterías de vehículos eléctricos (Figura 18).

Figura 18

Análisis PESTEL del Reciclado de Baterías de Vehículos Eléctricos



Tomado de: <https://www.sernauto.es/blog/reciclado-de-baterias-de-vehiculos-electricos-en-espana/>

Conclusiones

El reciclaje de baterías de litio en el Ecuador se halla en una etapa inicial, con normativas poco desarrolladas específicamente para estos componentes. A pesar de la existencia de leyes generales sobre gestión de residuos, como el Código Orgánico del Ambiente (COA), aún no se han implementado políticas específicas ni infraestructura adecuada para el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos. En comparación con países más avanzados en este ámbito, como la Unión Europea, han determinado directrices claras que contienen la responsabilidad extensa del productor (REP), lo cual fomenta el servicio como modelo para Ecuador.

El reciclaje de baterías de litio en relación con los beneficios ambientales posee una reducción de la minería de metales como cobalto, níquel y litio, que generan grandes impactos ecológicos. Sin embargo, también muestra desafíos como el manejo de residuos químicos peligrosos y la energía intensiva necesaria en los procesos de recuperación, como el reciclaje pirometalúrgico e hidrometalúrgico. La reutilización de baterías degradadas parcialmente para almacenamiento estacionario es una alternativa más sostenible, ya que prolonga la vida útil del producto y disminuye la necesidad de procesamiento químico.

La viabilidad de implementar un sistema de reciclaje en Ecuador es moderada. Si bien el país carece actualmente de la infraestructura necesaria, existen oportunidades para crear alianzas público-privadas e implementar procesos escalables. Además, el crecimiento en el uso de vehículos eléctricos podría justificar la inversión en el mediano plazo y una colaboración regional con países vecinos podría reducir costos y facilitar el desarrollo.

Recomendaciones

Establecer leyes específicas para la gestión de baterías de litio, tomando como referencias normativas internacionales como la Directiva 2006/66/CE de la Unión Europea.

Se debe considerar la creación de plantas regionales de reciclaje, aprovechando la proximidad con otros países latinoamericanos para compartir costos y tecnología e incentivar la instalación de plantas de tratamiento mediante exenciones fiscales o subsidios.

Fomentar alianzas con universidades y centros de investigación locales para desarrollar tecnologías de reciclaje y reúso adaptadas al contexto ecuatoriano y realizar campañas de concienciación para informar a la población sobre la importancia de la correcta disposición y reciclaje de baterías de litio.

Bibliografía

- Bae, H., & Kim, Y. (2021). Technologies of lithium recycling from waste lithium-ion batteries: a review. *Materials advances*, 2(10), 3234-3250.
- Cairns, E. J., & Albertus, P. (2010). Batteries for electric and hybrid-electric vehicles. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 1, 299-320.
- Costa, C. M., Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Castro, H., Del Campo, F. J., & Lanceros-Méndez, S. (2021). Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials*, 37, 433-465.
- Delgado Vásquez, V. E. (2024). *Diagnóstico del Estado de Baterías de un Vehículo Eléctrico Usando el EV Kit de Launch*.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., ... & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *nature*, 575(7781), 75-86.
- Huang, B., Pan, Z., Su, X., & An, L. (2018). Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of power sources*, 399, 274-286.
- Jácome Gagnay, N. A. (2024). *Protocolo de Diagnóstico del Sistema de Baterías de Vehículos Eléctricos Usando un Escáner Launch Pad VII*.
- Lai, X., Huang, Y., Deng, C., Gu, H., Han, X., Zheng, Y., & Ouyang, M. (2021). Sorting, regrouping, and echelon utilization of the large-scale retired lithium batteries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111162.
- Marano, V., Onori, S., Guezennec, Y., Rizzoni, G., & Madella, N. (2009, September). Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. In *2009 IEEE vehicle power and propulsion conference* (pp. 536-543). IEEE.
- Pražanová, A., Knap, V., & Stroe, D. I. (2022). Literature review, recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles, part I: recycling technology. *Energies*, 15(3), 1086.

- Sotnyk, I., Hulak, D., Yakushev, O., Yakusheva, O., Prokopenko, O. V., & Yevdokymov, A. (2020). Development of the US electric car market: Macroeconomic determinants and forecasts. *Polityka Energetyczna*, 23(3), 147-164.
- Vinicio, N. M. M., Alexandra, J. M. D., Mero, C. M. L., & Barrezueta, M. F. G. (2023). Estimación del consumo de combustible en un vehículo Ford Explorer aplicando la técnica Ecodriving en la ciudad de Guayaquil. *South Florida Journal of Development*, 4(1), 520-535.

