

Guía técnica para la segunda vida y gestión integral de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos.



Como empresa federal, la GIZ asiste al Gobierno de la República Federal de Alemania en su labor para alcanzar sus objetivos en el ámbito de la cooperación internacional para el desarrollo sostenible.

Publicado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Domicilios de la Sociedad
Bonn y Eschborn, Alemania

Dirección de Agencia Bogotá
Calle 125 No.19-24, piso 7, Bogotá – Colombia
T +57 1 4325350

E info@giz.de
I <https://www.giz.de/en/worldwide/132404.html>

Proyecto

Proyecto para el Uso Sostenible y Aprovechamiento eficiente de los recursos en Colombia (ProUSAR)

Autores

Miguel Osejo Knudson, Consultor ProUsar, GIZ
Helmer Acevedo Gamboa, Consultor ProUsar, GIZ
Inga Rodríguez Mur, Consultora ProUsar, GIZ

Equipo técnico

Diego Escobar Ocampo, Coordinador del Grupo de Sustancias Químicas, RESPEL y UTO, MinAmbiente
Ángel Eduardo Camacho Lozano, Contratista Grupo de Sustancias Químicas, RESPEL y UTO, MinAmbiente
Luz Stella Guevara Ulloa, Profesional especializado Grupo de Sustancias Químicas, RESPEL y UTO, MinAmbiente

Responsables

Peter Foerster, Coordinador ProUSAR, GIZ
Belin Fung Vinasco, Asesora técnica ProUSAR, GIZ

Diseño y diagramación

María José Charry

Cita

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Osejo Knudson, M., Acevedo Gamboa, H. & Rodríguez Mur, I. (2025). Guía técnica para la segunda vida y gestión integral de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos.

Por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ)

Las ideas vertidas en el texto son responsabilidad exclusiva de los autores y no comprometen la línea institucional de la GIZ. Se autoriza la reproducción total del presente documento, sin fines comerciales, citando adecuadamente la fuente.

Versión digital

Bogotá, Colombia (2025)

Tabla de contenido

Lista de figuras	4
Lista de Tablas	4
Lista de abreviaturas.....	5
Glosario	6
Introducción	9
1. Marco de política pública, normativo y regulatorio para la gestión de baterías de iones de litio	10
2. Mapa de actores que intervienen en la gestión de las baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica.....	13
3. Diagnóstico de las baterías de iones de litio en el marco de la movilidad eléctrica	19
3.1 Características generales	19
3.2 Ensayos de desempeño	21
3.3 Ensayos de diagnóstico.....	22
A. Diagnóstico inicial	24
B. Preacondicionamiento.....	25
C. Diagnóstico.....	25
D. Reacondicionamiento	27
4. Reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica.....	28
4.1 Aspectos generales del reacondicionamiento y la remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos.....	29
4.2 Proceso de reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos	31
5. Recuperación y aprovechamiento de las partes y materiales constituyentes de las baterías usadas y descartadas de vehículos eléctricos no aptas para la reutilización.....	35
5.1 Aspectos generales del aprovechamiento de las baterías de iones de litio para la recuperación de materiales.....	36
5.2 Proceso de aprovechamiento para las baterías de iones de litio.....	38
Etapa de descarga	38
Etapa de despiece y trituración.....	39
Etapa de separación	39
Etapa metalúrgica	39
6. Manejo seguro de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos	40
Bibliografía	43

Lista de figuras

Figura 1 ▶ Fotografía Pack de baterías de bus eléctrico 8

Figura 2 ▶ alvasolution.com. (s. f.). Batería de ion-litio, de polímero de litio, de ferrofosfato. Fuente: Portal Carblue. <https://www.carblue.es/blog/post/tipos-de-baterias-coches-electricos-ion-litio-polimero-de-litio-ferrofosfato/> 13

Figura 3 ▶ Mapa de actores que intervienen en la gestión de las baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica. Fuente: Elaboración propia, 2025..... 18

Figura 4 ▶ Tipos de celdas y configuraciones más comunes de las baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de Baterías y Amperios (s.f.) y acc Automotive Cells Co (2022) 19

Figura 5 ▶ Esquema interno de las baterías de iones de litio. Fuente: Adaptado de Liu, C. et al. (2016) 20

Figura 6 ▶ Procedimiento para realizar diagnóstico y acondicionamiento de una batería de iones. Fuente: Elaboración propia, 2025 23

Figura 7 ▶ Procedimiento para realizar diagnóstico inicial para una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018. 24

Figura 8 ▶ Circuito eléctrico de una batería. Fuente: adaptado de Georgia State University (2017) 24

Figura 9 ▶ Circuito eléctrico de una batería. Fuente: adaptado de Georgia State University (2017) 25

Figura 10 ▼ Ciclo estándar de descarga de acuerdo con el tipo de batería. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018 25

Figura 11 ▼ Ciclo estándar de carga de acuerdo con el tipo de batería. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018 25

Figura 12 ▼ Procedimiento para determinar la capacidad de una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018. 26

Figura 13 ▼ Procedimiento para determinar la capacidad de retención y recuperación de una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018. 26

Figura 14 ▼ Procedimiento para determinar capacidad de retención y recuperación de una batería en un periodo largo de tiempo. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018 27

Figura 15 ▼ Evaluación reacondicionamiento de la batería. Fuente: Elaboración propia, 2025 28

Figura 16 ▼ Algunos impactos ambientales del ciclo de vida de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de Fan, T. et al (2023) 29

Figura 17 ▼ Flujograma de decisiones que nos ha llevado hasta la etapa de remanufactura. Fuente: Adaptado de Congreso de Colombia (2013) 30

Figura 18 ▼ Partes de una batería de iones de litio con potencial de aprovechamiento. Fuente: Adaptado de Coches.net (2022) 36

Figura 19 ▼ Masa negra proveniente de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: CICenergiGUNE (2021). 37

Figura 20 ▼ Componentes internos de una batería de iones de litio. Fuente: Jacoby (2019). 39

Figura 21 ▼ Esquema general de una planta de aprovechamiento de baterías de iones de litio. Fuente: ELDANRECYCLING (s.f.)..... 39

Figura 22 ▼ Etiquetas de los vehículos que transportan residuos de baterías de iones de litio. Fuente: U.S. Department of Transportation (2025) 41

Lista de Tablas

Tabla 1 ▼ Marco de política pública 11

Tabla 2 ▼ Marco normativo y regulatorio 12

Tabla 3 ▼ Roles y responsabilidades de los actores. Fuente: Adaptado de Congreso de Colombia (2013) y MinAmbiente (2018) 14

Tabla 4 ▼ Tipos de químicas de baterías de iones de litio más usadas para AEE y vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de BID (2024). Fuente: Adaptado de BID (2024) 20

Tabla 5 ▼ Principales ensayos de desempeño y estándares aplicables. Fuente: Elaboración propia, 2025 21

Tabla 6 ▼ Ensayos recomendados para vehículos eléctricos e híbridos con baterías de iones de litio. Fuente: ISO 12405-4:2018 y IEC 62660-1:201 22

Tabla 7 ▼ Estándares para medir resistencia interna, capacidad y voltaje de las baterías. Fuente: Elaboración propia, 2025..... 24

Tabla 8 ▼ Especificaciones mínimas de tolerancia en la medición de parámetros para ejecutar los ensayos de diagnóstico. Fuente: ISO 12405-4:2018..... 26

Tabla 9 ▼ Requerimientos mínimos para cada tipo de ensayo de diagnóstico para celdas y baterías de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018..... 27

Tabla 10 ▼ Etapas de reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos. Fuente: Elaboración propia (2025). 31

Tabla 11 ▼ Partes y materiales que componen una batería de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025)..... 36

Tabla 12 ▼ Composición química de baterías de iones de litio. Fuente adaptado de Woeste et al. (2024) 37

Tabla 13 ▼ Sustancias peligrosas presentes en las baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025)..... 38

Tabla 14 ▼ Subpartidas arancelarias para la comercialización de la masa negra*. Fuente: DIAN (2005) 40

Tabla 15 ▼ Categorización de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025) 41

Tabla 16 ▼ Consideraciones para el transporte de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2024)..... 41

Lista de abreviaturas

- AEE.** Aparatos Eléctricos y Electrónicos
- Ah.** Amperio-hora
- ANLA.** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
- BESS.** Battery Energy Storage System (en español, sistema de almacenamiento de energía de la batería)
- BEV.** Battery Electric Vehicle (en español, vehículo eléctrico de batería)
- BMS.** Battery Management System (en español, sistema de gestión de la batería)
- CAP.** Capacity (en español, capacidad)
- CoSO⁴.** Sulfato de cobalto
- CV.** Ciclo de Vida
- EODV.** End of Discharge Voltage (en español, voltaje al final de la descarga)
- FCV.** Fuel Cell Vehicle (en español, Vehículo de pila de combustible)
- HEV.** Hybrid Electric Vehicle (en español, vehículo eléctrico híbrido)
- H²PO⁴.** Ácido sulfúrico
- H³PO⁴.** Ácido fosfórico
- I.** Corriente

- MinAmbiente.** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- MinComercio.** Ministerio de Comercio, Industria y Turismo
- LFP.** Litio, Hierro y Fosfato
- Li²CO³.** Carbonato de litio
- LMO.** Óxido de manganeso de litio
- MnSO⁴.** Sulfato de manganeso
- NCA.** Níquel, Cobalto y Aluminio
- NiSO⁴.** Sulfato de níquel
- NMC.** Níquel, Manganeso y Cobalto
- NTC.** Normas Técnicas Colombianas
- PE.** Polietileno
- PHEV:** Plug-in Electric Vehicle (en español, vehículos eléctricos híbridos enchufables)
- PP.** Polipropileno
- PTFE.** Politetrafluoroetileno
- R.** Resistencia
- RAEE.** Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
- RESPEL.** Residuos peligrosos
- REP.** Responsabilidad Extendida del Productor
- SDA.** Secretaría Distrital de Ambiente
- SOC.** State Of Charge (en español, estado de carga)
- SOH.** State Of Health (en español, estado de salud)
- SRyG.** Sistemas de Recolección y Gestión
- SST.** Salud y Seguridad en el Trabajo
- TIC.** Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
- V.** Voltaje nominal
- Wh.** Vatio-hora

Glosario

AEE de consumo masivo: Son aquellos AEE utilizados en hogares, en establecimientos comerciales, institucionales o de otro tipo que, por su naturaleza, cantidad y distribución en el mercado, son de flujo similar al de los hogares (MinAmbiente, 2022a).

AEE de uso industrial o profesional: Son aquellos AEE que, por exclusión, no son definidos como AEE de consumo masivo (MinAmbiente, 2022a).

AEE de uso propio: Son aquellos AEE importados o fabricados por el usuario o consumidor para su uso exclusivo y sin fines de comercialización (MinAmbiente, 2022a).

Almacenamiento de RAEE: Es el depósito temporal de los RAEE en un espacio físico definido y por un tiempo determinado con carácter previo a su aprovechamiento, tratamiento o disposición final (MinAmbiente, 2022a).

Ánodo: Se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de oxidación (SDA, 2024).

Aparatos eléctricos y electrónicos (AEE): Son todos los aparatos que, para funcionar, necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, así como los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes (Congreso de Colombia, 2013).

Aprovechamiento de RAEE: Comprende las operaciones mediante las cuales las sustancias, mezclas o componentes del RAEE son transformados de nuevo en productos o materiales a través de procesos de reciclaje o recuperación de recursos en el contexto de la economía en general (MinAmbiente, 2022a).

Batería primaria: Una batería primaria es aquella que no puede ser recargada (MIT Electric Vehicle Team, 2008)

Batería secundaria: Una batería secundaria es aquella que es recargable (MIT Electric Vehicle Team, 2008).

Baterías de iones de litio: Baterías recargables en las que los iones de litio se desplazan del electrodo negativo (ánodo) al positivo (cátodo) durante la descarga y viceversa durante la carga (Pesaran et al., 2023).

Capacidad de la batería: La capacidad de una batería se define como la corriente que una batería puede transferir en un tiempo determinado. Sus unidades están dadas en amperio – hora (Ah). La capacidad de una batería alternativamente se puede expresar en términos de Wh, la cual se calcula como la capacidad de la batería en Ah por el voltaje de la batería (Voltios) (Ruiz, V., 2018).

Cátodo: Se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de reducción (SDA, 2024).

Comercializador de AEE: Persona natural o jurídica encargada, con fines comerciales, de la distribución mayorista o minorista de aparatos eléctricos y electrónicos (Congreso de Colombia, 2013).

Desensamble: Se refiere al proceso de separar los principales componentes o partes de componentes que conforman los RAEE (desensamble parcial) o el desensamble de los mismos en todos sus componentes y materiales (desensamble completo) (MAVDT, 2009).

Disposición final de los RAEE: Es el proceso de aislar y confinar los RAEE, en particular los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación y los daños o riesgos asociados a la salud humana y al ambiente (Congreso de Colombia, 2013).

Economía circular: Sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de los materiales, el agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales a través la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible (MinAmbiente y MinComercio, 2019).

Electrolito: Es una solución acuosa o no acuosa de sales, bases y ácidos que permite el flujo de electrones (SDA, 2024).

Estado de carga: Expresión de la capacidad actual de la batería como porcentaje de la capacidad máxima (MIT Electric Vehicle Team, 2008).

Gestión integral: Conjunto articulado e interrelacionado de acciones políticas, normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de evaluación, seguimiento y monitoreo desde la prevención de la generación hasta la disposición final de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (MinAmbiente, 2017).

Gestor de RAEE: Persona natural o jurídica que presta en forma total o parcial los servicios de recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y/o disposición final de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), dentro del marco de la gestión integral y cumpliendo con los requerimientos de la normatividad vigente (Congreso de Colombia, 2013).

Masa negra: Polvo negro obtenido tras el pretratamiento mecánico de baterías de iones de litio usadas. Contiene los materiales activos del ánodo y el cátodo de las baterías. Dependiendo de la química de la batería, contiene grafito, litio y metales como cobalto, níquel o manganeso en diferentes composiciones (BID, 2024).

Pack de baterías de iones de litio (battery pack en inglés): es el conjunto de celdas o módulos conectados entre sí o que pueden formar una unidad integrada y cerrada dentro de una carcasa exterior, no destinada a ser desmontada ni abierta por el usuario final (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023). Generalmente, el pack de baterías contiene, además, el sistema de gestión de baterías (BMS) y un sistema de enfriamiento o calefacción, según dónde y cómo se utilizará el pack.

Preparación para la reutilización: Comprende las operaciones de reparación, reacondicionamiento o remanufactura, mediante las cuales los AEE o sus componentes que se hayan descartado o convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa (MinAmbiente, 2022a).

Primera vida: Batería, paquete de baterías o módulo del fabricante del equipo original implementado en su primer uso en un dispositivo, automóvil o sistema de almacenamiento estacionario (también conocidas en inglés como “1st-life,” “1st use,” or “first use”) (Pesaran et al., 2023).

Productor de AEE: Cualquier persona natural o jurídica que, con independencia de la técnica de venta utilizada, incluídas la venta a distancia o la electrónica: 1. Fabrique aparatos eléctricos y electrónicos; 2. Importe o introduzca aparatos eléctricos y electrónicos; 3. Arme o ensamble equipos sobre la base de componentes de múltiples productores; 4. Introduzca al territorio nacional aparatos eléctricos y electrónicos; 5. Remanufacture aparatos eléctricos y electrónicos con su propia marca o remanufacture marcas de terceros no vinculados con él, en cuyo caso estampa su marca, siempre que se realice con ánimo de lucro o ejercicio de actividad comercial (Congreso de Colombia, 2013).

Profundidad de descarga: Porcentaje de capacidad de la batería que se ha descargado expresado como porcentaje de la capacidad máxima. Una descarga de al menos el 80 % se denomina descarga profunda (MIT Electric Vehicle Team, 2008).

Reacondicionamiento: Procedimiento técnico de renovación, en el cual se restablecen las condiciones funcionales y estéticas de un AEE para usar en un nuevo ciclo de vida. Puede implicar además reparación, en caso de que el equipo tenga algún daño (Congreso de Colombia, 2013).

Reciclaje: Son los procesos mediante los cuales se aprovechan y transforman los residuos recuperados y se devuelven a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos (MinAmbiente, 2017).

Recuperación: Es la acción que permite retirar de los residuos aquellos materiales que pueden someterse a un nuevo proceso de aprovechamiento, para convertirlos en materia prima útil en la fabricación de nuevos productos (MinAmbiente, 2015).

Remanufactura: Comprende cualquier acción necesaria para construir productos con calidad de nuevos, utilizando componentes tomados de AEE previamente usados, así como nuevos componentes, si es el caso. El producto resultante cumple con la funcionalidad y especificaciones de confiabilidad originales del fabricante (MinAmbiente, 2017).

Reparación: Implica una acción, incluyendo el reemplazo de componentes defectuosos, para corregir una falla específica de un aparato eléctrico y electrónico usado o un RAEE de tal forma que el equipo quede totalmente funcional para usar en su propósito original (MinAmbiente, 2017).

Residuo Peligroso: Es aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considerará residuo peligroso los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos (MinAmbiente, 2015).

Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE): Son los aparatos eléctricos o electrónicos en el momento en que se desechan o descartan. Este término comprende todos aquellos componentes, consumibles y subconjuntos que forman parte del producto cuando se descarta, salvo que individualmente sean considerados peligrosos, caso en el cual recibirán el tratamiento previsto para tales residuos (Congreso de Colombia, 2013).

Responsabilidad extendida del productor (REP): Es el deber que tiene el productor de AEE, a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto (Congreso de Colombia, 2013).

Reutilización: La reutilización de un equipo eléctrico o electrónico se refiere a cualquier utilización de un aparato o sus partes, después del primer usuario, en la misma función para la que el aparato o parte fue diseñado. (MinAmbiente, 2017).

Reutilización directa: reutilización de un equipo totalmente funcional que no es un residuo, para el mismo fin para el que fue concebido, sin necesidad de reparación o reacondicionamiento (UNEP, 2023).

Segunda vida de baterías: Uso de una batería de vehículo eléctrico al final de su primera vida útil o una batería de almacenamiento estacionaria para uso de almacenamiento de energía en una aplicación diferente (Pesaran et al., 2023).

Sistema de gestión de baterías (Battery Management System - BMS en inglés): Es un dispositivo electrónico que controla o gestiona las funciones eléctricas y térmicas de una batería para garantizar su seguridad, rendimiento y vida útil, gestiona y almacena los datos correspondientes a los parámetros para determinar el estado de salud y se comunica con el vehículo, el medio de transporte ligero o el aparato en que se encuentra incorporada la batería, o con una infraestructura de recarga pública o privada. Adaptado de (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2023).

Sistema de Recolección y Gestión de RAEE: Instrumento de control y manejo ambiental que contiene los requisitos y condiciones para garantizar la recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos -RAEE por parte de los productores (MinAmbiente, 2018).

Usuario o consumidor: Toda persona natural o jurídica que contrate la adquisición, utilización o disfrute de un bien o la prestación de un servicio determinado (Congreso de Colombia, 2013).

Vehículo de movilidad individual: Consiste en vehículos tipo bicicleta, patineta o similares para uso individual que funcionan mediante autopropulsión, energía eléctrica u otras tecnologías cero emisiones o mediante una combinación de estas (SDM, 2021).

Vehículo eléctrico: Vehículo impulsado exclusivamente con uno o más motores eléctricos, que obtienen corriente de un sistema de almacenamiento de energía recargable, como baterías, u otros dispositivos portátiles de almacenamiento de energía eléctrica, incluyendo celdas de combustible de hidrógeno o que obtienen la corriente a través de catenarias. Estos vehículos no cuentan con motores de combustión interna o sistemas de generación eléctrica a bordo como medio para suministrar energía eléctrica (Congreso de Colombia, 2019).

Vehículo híbrido: Fuente móvil terrestre que, para su propulsión, utiliza de forma alternada o simultáneamente, un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos. (Minambiente, 2022b).

Vida útil: Tiempo de funcionamiento de materiales y productos determinado por la asignación de valor por parte de sus usuarios. Cuando los materiales son reusados o reciclados, su vida útil se extiende (MinAmbiente y MinComercio, 2019).



Figura 1 ► Fotografía Pack de baterías de bus eléctrico

Introducción

La movilidad eléctrica se ha convertido en una de las prioridades en el mundo y Colombia no es la excepción. El país viene apostando a la transición energética y dentro de las estrategias contempladas se encuentra la movilidad ambientalmente sostenible cuyo enfoque busca minimizar el impacto negativo en el ambiente, mientras se satisfacen las necesidades de movilidad.

Dentro de las prácticas de movilidad sostenible impulsadas en el país se encuentra la transición hacia fuentes de energía limpias y renovables en el transporte, lo que incluye la adopción de vehículos eléctricos, híbridos y de hidrógeno. Para ello se han formulado y se vienen implementando regulaciones y políticas gubernamentales que favorecen la movilidad sostenible, tales como incentivos fiscales para vehículos eléctricos e híbridos y restricciones a la circulación de vehículos altamente contaminantes que usan combustibles fósiles.

En el país se han registrado en el período 2014-2024, 14.392 vehículos eléctricos y 97.501 vehículos híbridos (Fenalco y Andi, 2024). Adicionalmente, se han registrado 12.044 ciclomotores eléctricos, con corte a 31 de julio de 2023 (MinTransporte, s.f.).

También se destaca a partir de las cifras aportadas por el RUNT, que entre enero y julio de 2024 se registraron 3.178 vehículos eléctricos nuevos, presentando un incremento del 73,6% respecto al mismo periodo de 2023. Por su parte, los registros de vehículos híbridos alcanzaron las 20.640 unidades entre enero y julio de 2024, con un incremento del 41,6% respecto al año anterior (Fenalco y Andi, 2024).

Se espera en los próximos años que el incremento de la flota de movilidad eléctrica siga siendo notable gracias a las regulaciones y políticas existentes y a las que se tienen proyectadas para formulación. Dentro de las regulaciones existentes se destacan las leyes 1964 y 1972 de 2019. La ley 1964 de 2019 contempla la iniciativa pública de uso de vehículos eléctricos, la cual define que a 2025 el Gobierno Nacional, los municipios de categoría 1 y especial (exceptuando Tumaco y Buenaventura) y los prestadores del servicio público de transporte, deberán cumplir con una cuota mínima de 30% de vehículos eléctricos en los vehículos que sean comprados o contratados para su uso. Adicionalmente ambas leyes definen metas para la incorporación de vehículos eléctricos en los Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM) de las diferentes ciudades del país.

Este aumento de la flota de movilidad eléctrica en el país conlleva directamente al aumento en la generación de residuos de baterías y la necesidad de una gestión adecuada de las mismas, promoviendo economías circulares en la cadena de valor de la batería, acorde con la normatividad actual. Actualmente la mayoría de los vehículos eléctricos utilizan baterías de iones de litio, las cuales varían según la composición química del cátodo. Es de resaltar que el precio del material del cátodo tiene implicaciones considerables en los costos de

producción de las baterías. Las químicas más comúnmente utilizadas en vehículos eléctricos son las baterías de litio-ferrofosfato (LFP) y las de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC). De estas, las baterías LFP son la química más común debido a su menor costo y mayor estabilidad térmica.

La gestión adecuada de las baterías de iones de litio provenientes de los vehículos eléctricos depende en gran medida de la química mencionada anteriormente.

En Colombia existe un marco normativo que cubre la gestión de residuos de baterías de vehículos eléctricos basado en la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y corresponde principalmente a la Resolución 0851 de 2022. Esta resolución reglamenta los Sistemas de Recolección y Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (SRyG RAEE) y comprende todos los tipos de pilas y acumuladores, incluyendo las baterías de iones de litio utilizadas en la movilidad eléctrica.

Adicionalmente, el país cuenta con la Resolución 076 de 2019 que adopta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) necesario para el trámite de licencia ambiental de proyectos para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, y/o aprovechamiento (recuperación/reciclado) de RAEE. El país cuenta actualmente con 99 gestores licenciados para la gestión de RAEE (IDEAM, 2024), de los cuales solo tres (3) realizan actividades de aprovechamiento de residuos de baterías de iones de litio provenientes de la movilidad eléctrica.

A nivel internacional se destacan los marcos normativos de la Unión Europea, China, Estados Unidos y Canadá. Estos marcos se orientan a la sostenibilidad, seguridad y etiquetado para la comercialización y puesta en servicio de baterías, y definen requisitos para la gestión final de la vida útil. A manera de ejemplo, la regulación 2023/1542 del Parlamento y el Consejo de la Unión Europea establece, entre otros, requerimientos relacionados con la disminución de la huella de carbono en la fabricación de baterías, niveles mínimos de contenido reciclado, requisitos de seguridad para los sistemas de almacenamiento de energía con baterías estacionarias y trazabilidad en la cadena de suministro. En materia de gestión de baterías usadas, dicha regulación propone un aumento progresivo de los objetivos en la eficiencia del reciclaje, específicamente para baterías de litio (65 % en 2025, 70 % en 2030). Adicionalmente, incorpora objetivos específicos de recuperación de materiales para finales del año 2025 con 90 % para el cobalto, el cobre, el plomo y el níquel, y 35 % para el litio. Para 2030, los niveles de recuperación deberán alcanzar el 95 % para el cobalto, el cobre, el plomo y el níquel, y el 70 % para el litio. En relación con la segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos, la regulación establece requisitos relativos a las operaciones de reutilización y refabricación, etiquetado de baterías con información necesaria para la identificación de las baterías y sus características principales (vida útil, capacidad de carga, presencia de sustancias peligrosas,

riesgos de seguridad, entre otros) a través de un código QR. Además, las baterías para vehículos eléctricos deben contener un BMS (en español, sistema de gestión de la batería) que almacene la información y los datos necesarios para determinar el estado de salud y la vida útil esperada de las baterías. Este BMS debe ser accesible para los propietarios de baterías y los operadores independientes que actúen en su nombre para facilitar el mantenimiento, la reutilización o remanufactura de la batería. A partir de 2026 se debe contar con un sistema de intercambio electrónico de información sobre batería denominado “pasaporte de baterías” que consiste en un registro electrónico para cada batería de vehículos eléctricos que se comercialice o se ponga en servicio.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se evidencia la necesidad de promover en el país la reutilización directa, la preparación para la reutilización y el reciclaje de las baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica. Esto con el fin de generar repercusiones medioambientales, sociales y económicas positivas a mediano y largo plazo, incluyendo la reducción de la demanda de litio, cobalto, níquel, manganeso y demás materias primas que deben obtenerse a través de la minería. La extensión de la vida útil y una segunda vida de las baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica, se perfilan como actividades esenciales en la economía circular en nuestro país y en el mundo, las cuales se deben desarrollar cumpliendo con estándares técnicos que garanticen la seguridad, la eficiencia y funcionalidad de las baterías y dando cumplimiento a la normativa ambiental para prevenir las afectaciones a la salud y el ambiente.

Como parte de la contribución que el Ministerio Federal de Cooperación Económica (BMZ) de Alemania, a través de la agencia implementadora Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ), en el marco del Proyecto para el Uso Sostenible y Aprovechamiento Eficiente de Recursos en Colombia (ProUSAR), se apoya a Colombia en la elaboración de instrumentos nuevos o perfeccionados que impulsen la transición hacia una economía circular. En consecuencia, con la presente guía, se busca dar orientaciones técnicas que fortalezcan la cadena de gestión integral de las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos en el país. Específicamente en el diagnóstico de las baterías tendiente a un uso adecuado y extensión de la vida útil; la reparación, el reacondicionamiento y la remanufactura enmarcados en una segunda vida de las baterías o sus componentes y el reciclaje tendiente a la recuperación y aprovechamiento de las partes y materiales constituyentes. En concordancia con la línea de acción 21 del CONPES 4075 de 2022, donde se destaca la necesidad de establecer, promover y colocar en marcha, lineamientos de política de buenas prácticas en proyectos de economía circular en los sectores minero-energético y de transporte.

1. Marco de política pública, normativo y regulatorio para la gestión de baterías de iones de litio

Este capítulo describe el marco de política pública, normativo y regulatorio que existe en el país para la gestión integral de baterías de iones de litio provenientes del sector de movilidad. En la Tabla 1 se presentan las políticas relacionadas.

Tabla 1 ▼ Marco de política pública

Política	Contenido
CONPES 3874 de 2016. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.	Esta política se enfoca en la gestión de los residuos no peligrosos y busca aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático, y plantea la base inicial para avanzar hacia la economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos.
Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) de 2017.	Esta política define objetivos, estrategias y líneas de acción específicas, que, en concordancia con los principios de la gestión integral de los residuos, la responsabilidad extendida del productor, la producción y el consumo sostenible y la participación activa, entre otros, se deberán ejecutar para prevenir y minimizar la generación de los RAEE y realizar su gestión diferenciada y adecuada. Dentro de las líneas de acción se destaca la 2.3. Diseño e implementación de sistemas de recolección y gestión de los RAEE bajo el principio de la responsabilidad extendida del productor y la participación activa de todos los actores involucrados, mediante procesos de logística inversa o mecanismos equivalentes, con el fin de facilitar al consumidor la devolución de los RAEE.
Política Nacional de Cambio Climático de 2017	El objetivo de la política es incorporar la gestión del cambio climático en las decisiones públicas y privadas para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos del cambio climático y permita aprovechar las oportunidades que este genera. Dentro de sus líneas estratégicas contempla el desarrollo urbano bajo en carbono y resiliente al clima y dentro de las acciones de dicha línea los incentivos a vehículos eléctricos y de bajas emisiones.
CONPES 3943 de 2018. Política de crecimiento verde.	Esta política tiene como propósito impulsar a 2030 el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, al tiempo que se asegura el uso sostenible del capital natural y la inclusión social, de manera compatible con el clima. Cuenta con un Plan de acción que incluye dentro de las líneas de acción la movilidad eléctrica (Línea de acción 27) y la economía circular (Líneas de acción 28, 29 y 30).
CONPES 3934 de 2018. Política para el mejoramiento de la calidad del aire.	Esta política propone acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire a través de la renovación y modernización del parque automotor, la reducción del contenido de azufre en los combustibles, la implementación de mejores técnicas y prácticas en la industria, la optimización de la gestión de la información, el desarrollo de la investigación, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire. Esta política contempla en sus líneas de acción la renovación y modernización del parque automotor fomentando la incorporación de tecnologías de cero y bajas emisiones, en especial vehículos eléctricos, dedicados a gas natural e híbridos.

Política

Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica – ENME del 2019.

CONPES 4075 de 2022. Política de transición energética.

Plan nacional de negocios verdes 2022-2030.

Política ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos y Plan de Acción 2022-2030

Contenido

Esta estrategia reconoce la tendencia mundial en movilidad eléctrica, y busca acelerar su penetración en Colombia para que permita, de manera proactiva, reducir emisiones en el sector transporte y usar de una forma eficiente y racional la energía, en beneficio de una mejor calidad de vida de los colombianos. La estrategia cuenta con un Plan de acción 2018-2022, en donde se destacan las acciones propuestas en el literal C. de los instrumentos técnicos y tecnológicos del Plan, que corresponde a la disposición de vehículos eléctricos o sus componentes (1. Definición segundo/tercer uso de las baterías, 2. Definición de los lineamientos para la disposición final del vehículo eléctrico y sus componentes)

Esta política de transición energética plantea lineamientos y estrategias para incrementar la seguridad energética; incentivar el conocimiento y la innovación en transición energética; generar mayor competitividad y desarrollo económico desde el sector energético, y desarrollar un sistema energético con bajas emisiones de GEI en el marco de la realidad colombiana. Dentro de las líneas de acción se encuentra la Línea de acción 21. Establecer lineamientos de política de buenas prácticas de proyectos de economía circular en los sectores minero energético y transporte y promover su puesta en marcha.

El Plan define dentro de las categorías de negocios verdes, los ecoproductos industriales, dentro de los cuales se encuentra el aprovechamiento de residuos eléctricos, electrónicos, de construcciones y demoliciones, plásticos, cauchos, textiles, empaques y envases provenientes de fuentes diferentes a biomasa para producir materias primas, y productos.

El objetivo general de la Política es continuar fortaleciendo la gestión integral de los residuos peligrosos, reconociendo las necesidades de los diferentes grupos de interés, así como la problemática ambiental asociada a su generación y manejo, con el fin de proteger el ambiente y la salud humana, contribuyendo así al desarrollo sostenible del país. En su Plan de acción 2022-2030 se destaca la estrategia 8. Optimización de instrumentos administrativos y fortalecimiento del control y seguimiento ambiental nacional en dónde se contempla la mejora de: los procesos internos de evaluación y seguimiento de los planes de devolución de residuos posconsumo y de los procesos de estudio, aprobación y seguimiento de las autorizaciones de movimientos transfronterizos de RESPEL en el marco del Convenio de Basilea y las Decisiones de la OCDE; y el desarrollo términos de referencia para la elaboración de EIA para el licenciamiento de proyectos asociados a las diferentes etapas de gestión de los RESPEL.

En la Tabla 2 se presenta la normativa asociada a la gestión integral de baterías de iones de litio usadas en vehículos eléctricos.

Tabla 2 ▼ Marco normativo y regulatorio

Norma	Contenido
Leyes	
Ley 253 de 1996.	“Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989”.
Ley 1672 de 2013.	“Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de RAEE, y se dictan otras disposiciones”.
Ley 1964 de 2019.	“Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones”
Ley 1972 de 2019	“Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones”
Decretos	
Decreto 1609 de 2002.	“Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera” (Compilado en Capítulo 7 Decreto 1079 de 2015)
Decreto 4741 de 2005.	“Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral” (Compilado en el Decreto 1076 de 2015).
Decreto 284 de 2018.	“Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RAEE, y se dictan otras disposiciones”.
Resoluciones	
Resolución 1362 de 2007.	“Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hacen referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005”.

Norma	Contenido
Resoluciones	
Resolución 41286 de 2016.	“Por la cual se adopta el plan de acción indicativo 2017-2022, para el desarrollo del programa uso racional y eficiente de la energía PROURE, que define objetivos y metas indicativas de eficiencia energética, acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de metas y se adoptan otras disposiciones al respecto”. En el sector transporte se destaca el uso de electricidad en las categorías: flota sector oficial, taxis en las principales ciudades del país, motos y automóviles y transporte público de pasajeros de las principales ciudades.
Resolución 160 de 2017.	“Por la cual se reglamenta el registro y la circulación de los vehículos automotores tipo ciclomotor, tricimoto y cuadriciclo y se dictan otras disposiciones”. Esta Resolución define en su artículo 13 que, en el caso de los vehículos eléctricos, las baterías deberán disponerse según lo estipulado por las normas que para tal efecto emita el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Resolución 076 de 2019.	“Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), para el trámite de licencia ambiental de proyectos para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, y/o aprovechamiento (recuperación/reciclado) de RAEE”.
Resolución 480 de 2020.	“Por la cual se implementa el Registro de Productores y Comercializadores de Aparatos Eléctricos y Electrónicos-RPCAEE y se establecen sus requisitos”.
Resolución 851 de 2022.	“Por la cual se desarrollan los artículos 2.2.7A.1.3, 2.2.7A.2.1, el numeral 3.1 del artículo 2.2.7A.2.2, el numeral 3 del artículo 2.2.7A.2.4, el artículo 2.2.7A.4.2 y el artículo 2.2.7A.4.4 del Título 7A del Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible sobre la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones”.
Resolución 479 de 2023.	“Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 480 de 2020, se actualiza su Anexo 1, y se dictan otras disposiciones”
Resolución 63 de 2024.	IDEAM adopta los métodos de muestreo y ensayo para determinar las características de peligrosidad en los residuos, se establecen otras disposiciones, y se deroga la Resolución número 0062 del 2007 del 30 de marzo de 2007.

2. Mapa de actores que intervienen en la gestión de las baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica.

En este capítulo se describen los principales actores que intervienen en la gestión de las baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica, junto con sus roles y responsabilidades (Tabla 3)

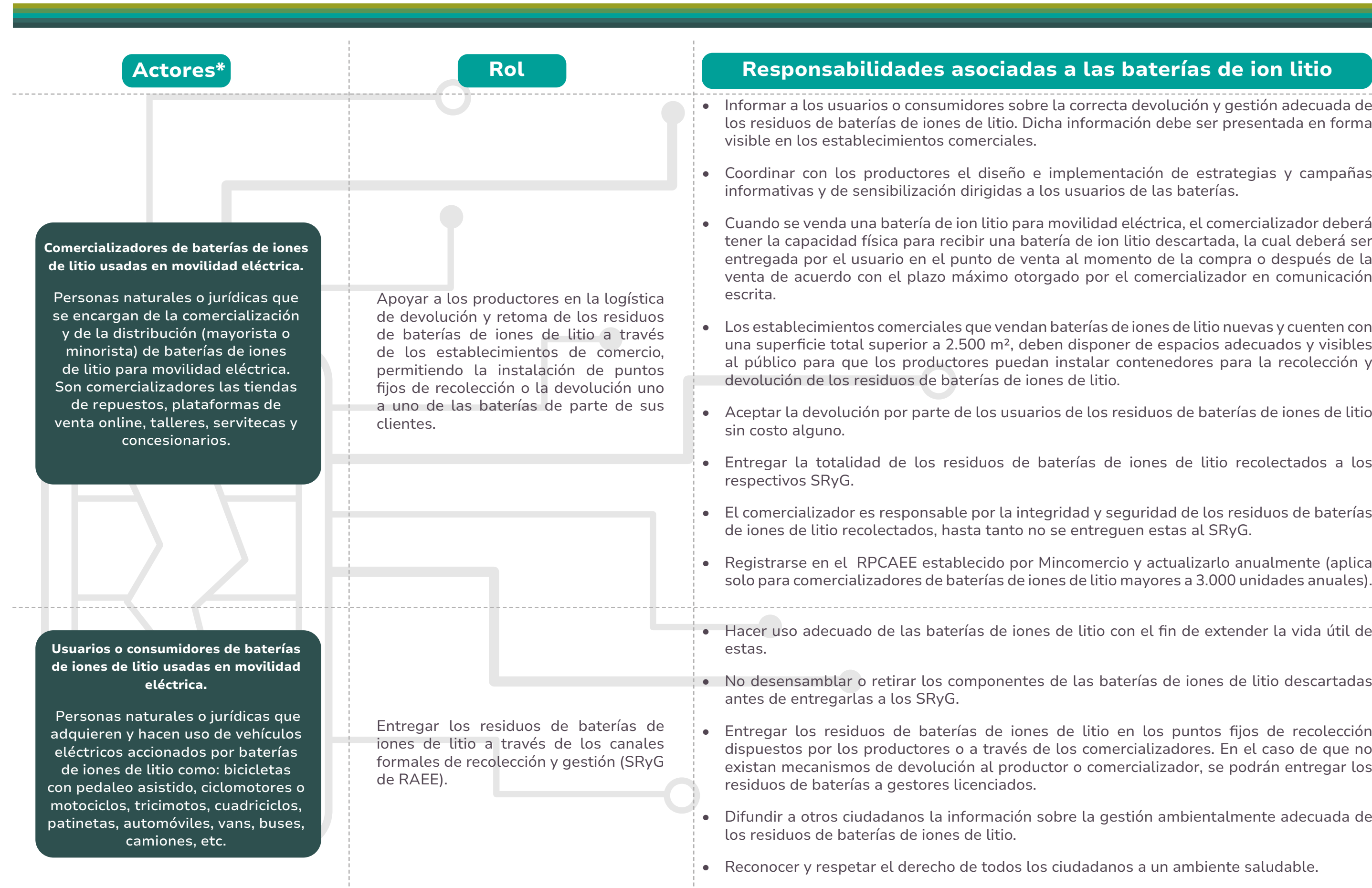


Figura 2 ▶ alvasolution.com. (s. f.). **Batería de ion-litio, de polímero de litio, de ferrofosfato.** Fuente: Portal Carblue. <https://www.carblue.es/blog/post/tipos-de-baterias-coches-electricos-ion-litio-polimero-de-litio-ferrofosfato/>

Tabla 3 ▼ Roles y responsabilidades de los actores. Fuente: Adaptado de Congreso de Colombia (2013) y MinAmbiente (2018)

Actores*	Rol	Responsabilidades asociadas a las baterías de ion litio
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente	Implementar junto con los demás actores responsables la política pública para la gestión integral de los RAEE y velar porque su plan de acción se lleve a cabo.	<ul style="list-style-type: none">• Promover, difundir e implementar la Política nacional para la gestión integral de los RAEE.• Hacer seguimiento al cumplimiento de las disposiciones establecidas en la Ley 1672 de 2013.• Definir como se realizará el registro de gestores de RAEE licenciados en el país.
Autoridades Ambientales	Realizar actividades de divulgación, promoción, y educación que orienten a los usuarios de baterías de iones de litio, sobre el adecuado manejo de estas y los SRyG de RAEE implementados en el área de jurisdicción.	<ul style="list-style-type: none">• Promover, difundir e implementar la Política nacional para la gestión integral de RAEE.• Apoyar de manera coordinada con los demás actores, las actividades de divulgación, promoción y educación que orienten a los usuarios de las baterías de iones de litio.• Promover la extensión de la vida útil de las baterías de iones de litio, el reciclaje y los SRyG.• Divulgar a través de las páginas web oficiales, el listado actualizado de los gestores de residuos de baterías de iones de litio licenciados en el área de jurisdicción.
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA	Autoridad responsable de la evaluación, aprobación y el seguimiento ambiental a los SRyG de RAEE.	<ul style="list-style-type: none">• Implementar herramienta informática que permita capturar, procesar información, monitorear la operación y evaluar los resultados de los SRyG de RAEE.• Divulgar a través de la página web oficial información sobre los productores con SRyG de RAEE aprobados, las marcas de los productos comercializados y cubiertos por el sistema, categorías y subcategorías de los RAEE que recibe cada sistema, puntos fijos de recolección, centros de acopio y mecanismos equivalentes, indicadores de gestión por resultados de los sistemas, los gestores de RAEE encargados de las operaciones de manejo y cualquier otra información que considere pertinente MinAmbiente o la ANLA.
Entidades territoriales (departamentos, municipios y distritos)	Incorporar en los planes de desarrollo territorial acciones encaminadas a facilitar y apoyar la gestión diferenciada de los RAEE.	<ul style="list-style-type: none">• Apoyar las estrategias y la consecución de los objetivos de la Política nacional para la gestión integral de RAEE.• Apoyar de manera coordinada con los demás actores, las actividades de divulgación, promoción y educación que orienten a los usuarios de las baterías de iones de litio.• Promover la extensión de la vida útil de las baterías de iones de litio, el reciclaje y los SRyG.• Facilitar la implementación de los puntos fijos de recolección y centros de acopio de los residuos de baterías de iones de litio a cargo de los productores

Actores*	Rol	Responsabilidades asociadas a las baterías de ion litio
<p>Ministerio de Comercio, Industria y Turismo - MinComercio</p>	<p>Implementar el Registro de Productores y Comercializadores de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RPCAEE, con el fin de promover el control de la adopción de los SRyG de RAEE.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Administrar el RPCAEE el cual se encuentra ubicado en la página de la Ventanilla Única de Comercio Exterior (VUCE) www.vuce.gov.co, en el Módulo “Registro de Productores y Comercializadores de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RPCAEE”. • Entregar la información registrada en el RPCAEE a MinAmbiente y a la ANLA para los fines pertinentes a su competencia.
<p>Productores de baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica.</p> <p>Personas naturales o jurídicas que se encargan de introducir al país o de poner en el mercado colombiano las baterías de iones de litio para movilidad eléctrica. La definición de productores incluye a fabricantes, importadores, ensambladores y remanufacturadores.</p>	<p>Productor de baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica para uso propio. Debe garantizar la gestión ambiental de las baterías descartadas.</p> <p>Productor de baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica de consumo masivo (mayor a 3.000 baterías al año). Debe implementar un SRyG de RAEE (individual o colectivo) que debe ser aprobado por la ANLA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir el impacto ambiental de sus productos mediante estrategias de reducción y sustitución de presencia de sustancias peligrosas en las baterías de iones de litio. • Colocar en las etiquetas, empaques o anexos de los productos, la Información relacionada con las condiciones de devolución y gestión de los residuos de baterías de iones de litio, al igual que la prohibición de disponer estas junto con los residuos sólidos domésticos. Lo anterior está sujeto a condiciones y requisitos que para tal efecto establezca MinComercio. • Informar sobre las características de peligrosidad de las baterías de iones de litio a usuarios o consumidores, gestores o autoridades interesadas. • Diseñar estrategias para lograr la eficiencia en la devolución, recolección, reutilización, reciclaje y disposición de los residuos de baterías de iones de litio. • Desarrollar campañas informativas y de sensibilización sobre la retoma y gestión adecuada los residuos de baterías de iones de litio. • Implementar puntos fijos de recolección para garantizar la devolución de los residuos de baterías de iones de litio por parte del usuario final, sin costo alguno. • Priorizar las alternativas de reutilización, preparación para la reutilización, y aprovechamiento, de los residuos de baterías de iones de litio. • Promover la incorporación de componentes o materiales obtenidos de los residuos de baterías de iones de litio, en los ciclos productivos del país. • Gestionar los residuos de baterías de iones de litio, solo con empresas gestoras que cuenten con licencia ambiental. • Los productores de baterías de iones de litio del sector movilidad eléctrica para uso propio y sin fines comerciales, deben garantizar la gestión ambiental de los residuos de baterías de iones de litio a través de los SRyG o a través de gestores licenciados, cuando no existan los mecanismos para devolverlas al productor o comercializador. • Contar con el RPCAEE establecido por MinComercio y actualizarlo anualmente (aplica solo para productores de baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica de consumo masivo).



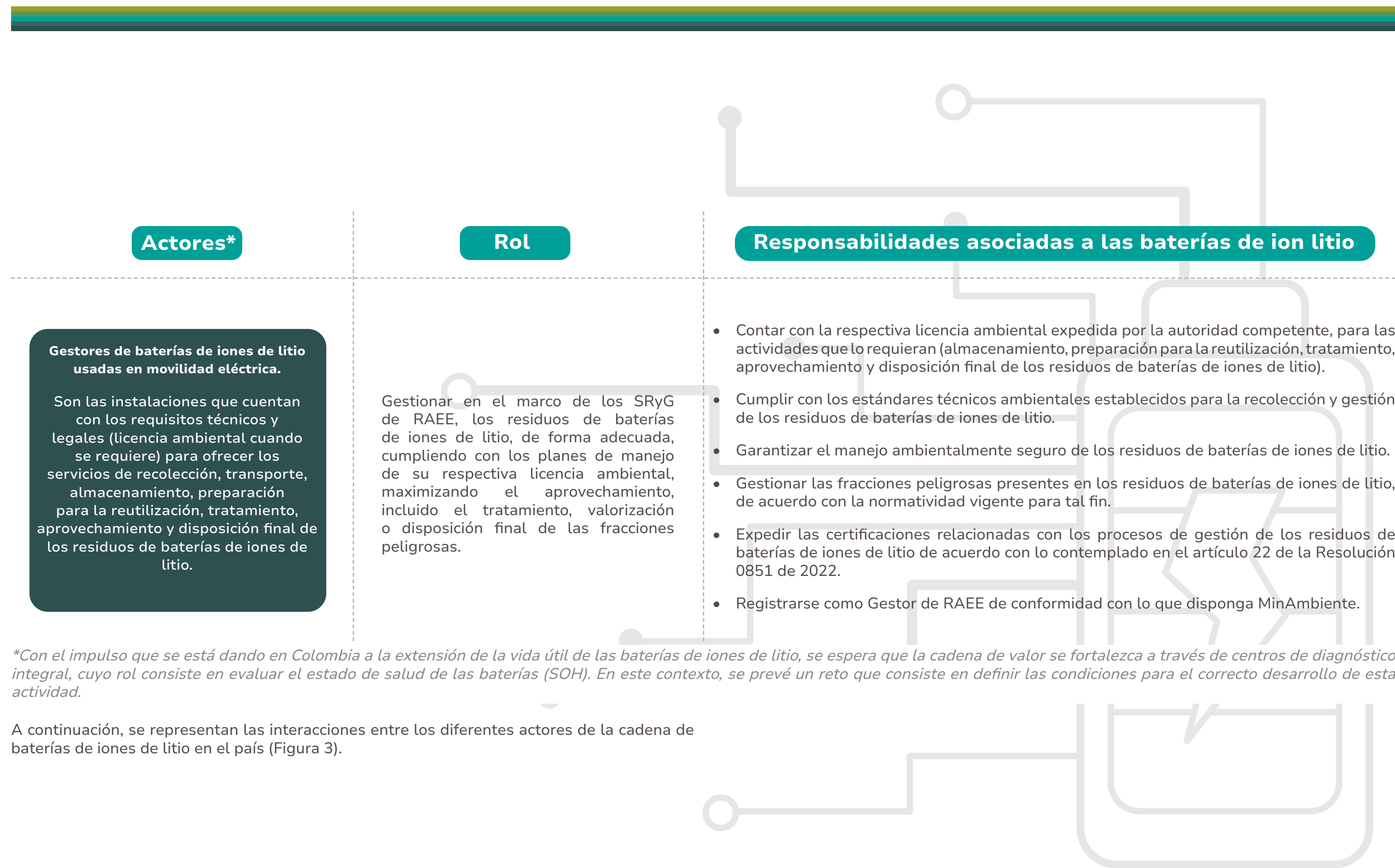
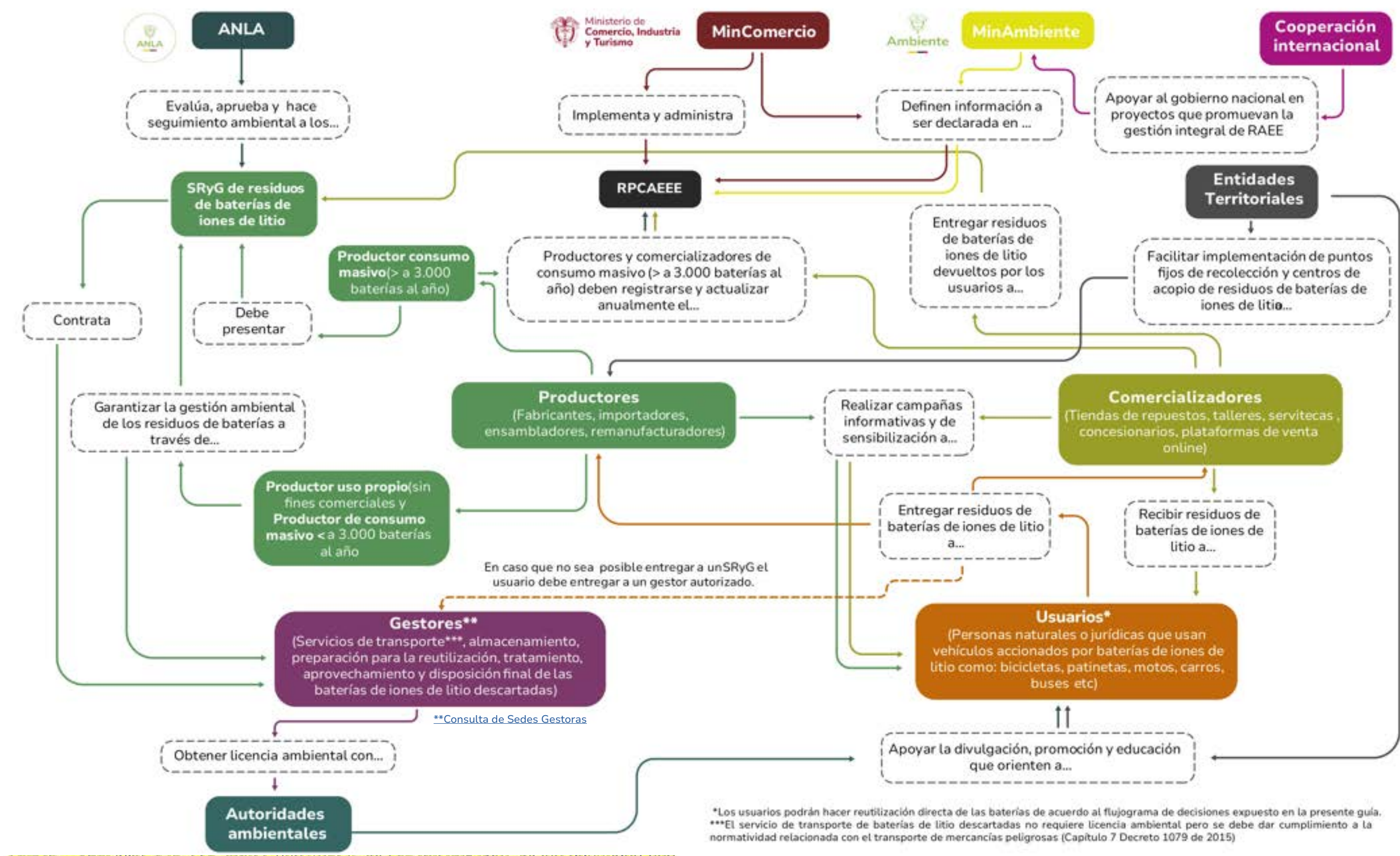


Figura 3 ► Mapa de actores que intervienen en la gestión de las baterías de iones de litio usadas en movilidad eléctrica. Fuente: Elaboración propia, 2025



3. Diagnóstico de las baterías de iones de litio en el marco de la movilidad eléctrica

En este capítulo se detallan las características generales de las baterías de iones de litio de los vehículos eléctricos*, así como los ensayos que permiten determinar su estado, los cuales corresponden a ensayos de desempeño y ensayos de diagnóstico. Estos ensayos pueden aplicarse en cualquier momento de la vida de la batería. Un adecuado diagnóstico permite el uso apropiado y seguro de la batería en el vehículo eléctrico, permitiendo el alcance máximo de la vida útil. Igualmente, posterior al descarte de la batería del vehículo, permite extender la vida útil de la misma utilizándola en otro tipo de aplicaciones.

**En el marco de la movilidad eléctrica se cuenta con vehículos eléctricos y vehículos híbridos. Estos últimos incluyen híbridos convencionales y enchufables. En la presente guía, para facilidad de lectura, se utilizará el término vehículos eléctricos indistintivamente para abordar todos estos tipos de vehículos.*

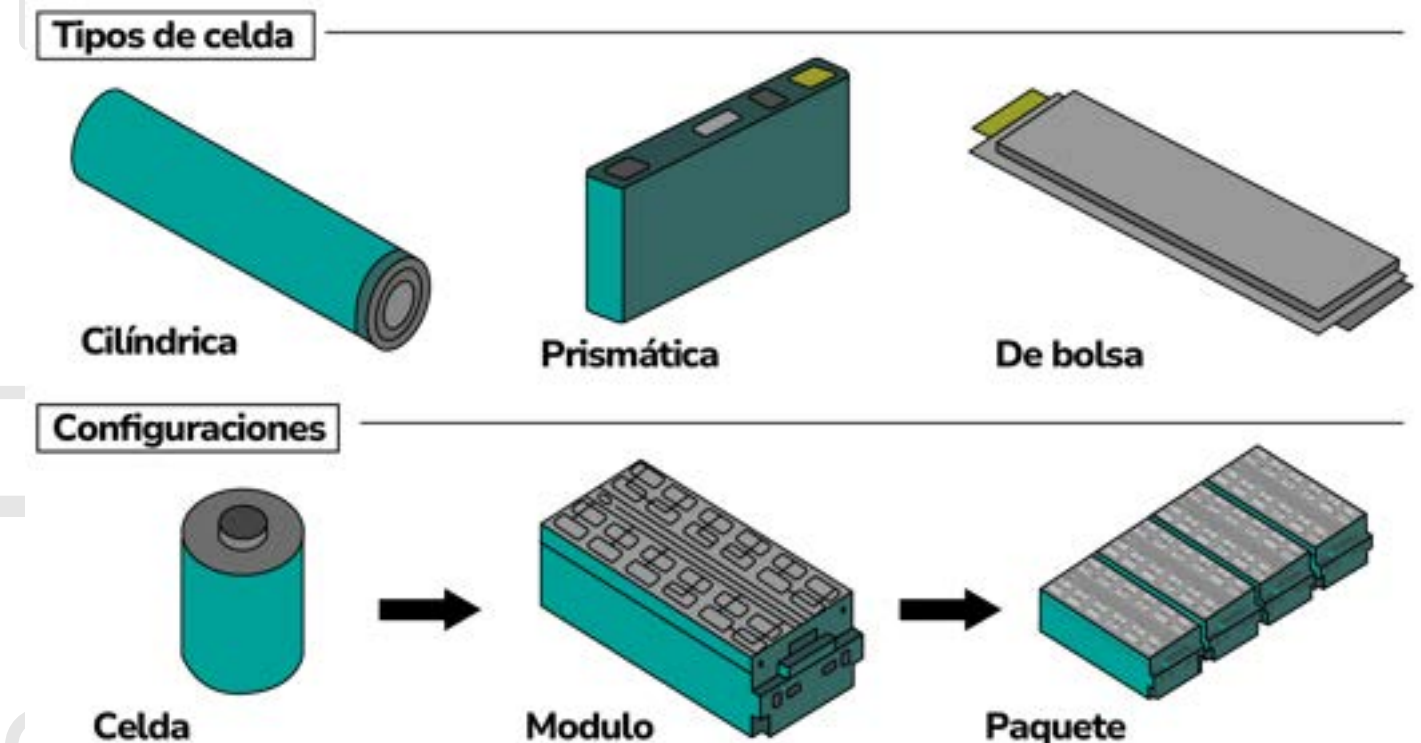
3.1 Características generales

La mayoría de los vehículos eléctricos actuales utilizan baterías de iones de litio. Las baterías de iones de litio tienen diferentes configuraciones que son empleadas dependiendo de las necesidades del fabricante y la aplicación. Por ejemplo, las baterías que contienen celdas de bolsa o pouch por su término en inglés, se utilizan para aligerar el peso final de las baterías o cuando el espacio destinado para la batería es reducido.

Las celdas son la forma más pequeña y compacta que puede adoptar una batería; se clasifican en cilíndricas, prismáticas y de bolsa (Figura 4), y por lo general, tienen un voltaje de entre uno y seis voltios. Un módulo consta de varias celdas, generalmente conectadas en serie o en paralelo. Luego, un pack de baterías se ensambla conectando los módulos entre sí, nuevamente en serie o en paralelo (MIT Electric Vehicle Team, 2008).

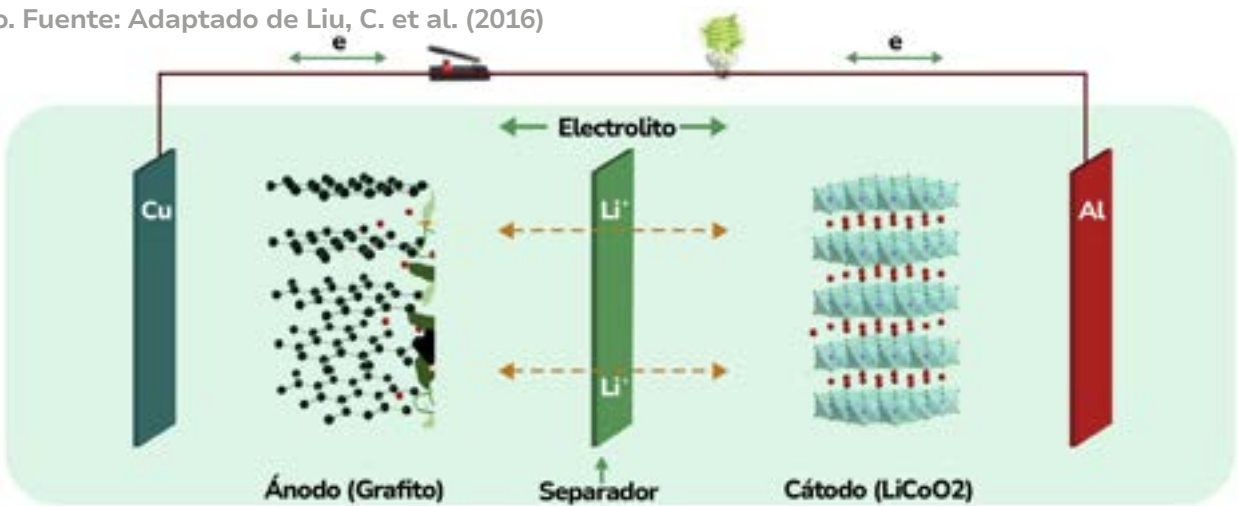
La producción de celdas de batería es principalmente un proceso químico, mientras que la producción de módulos y packs es un proceso de ensamblaje mecánico.

Figura 4 ► Tipos de celdas y configuraciones más comunes de las baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de Baterías y Amperios (s.f.) y acc Automotive Cells Co (2022)



Sin importar su configuración, todas las celdas de iones de litio funcionan bajo el principio de una celda galvánica constituida por: cátodo, ánodo, membrana aislante y electrolito disuelto en un solvente (Figura 5).

Figura 5 ► Esquema interno de las baterías de iones de litio. Fuente: Adaptado de Liu, C. et al. (2016)



Los tipos de baterías de iones de litio varían según la composición química del cátodo. En la Tabla 4 se presentan las químicas más comúnmente utilizadas en Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) y vehículos eléctricos, siendo las baterías de litio-ferrofosfato (LFP) y las de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC) las comúnmente usadas en baterías de vehículos eléctricos. De estas, las baterías LFP son la química más común debido a su menor costo y mayor estabilidad térmica.

Tabla 4 ▼ Tipos de químicas de baterías de iones de litio más usadas para AEE y vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de BID (2024). Fuente: Adaptado de BID (2024)

Tipo de batería	Densidad de energía (Wh/kg)	Voltaje (V)	Aplicaciones más comunes	Estabilidad química	Potencial de reciclaje
LCO Litio-cobalto	150-200	3.8	Teléfonos móviles, computadoras portátiles, cámaras, vehículos eléctricos (en desuso)	Baja	Alta
LMO Óxido de litio-manganeso	100-150	3.6	Aplicaciones estacionarias, vehículos eléctricos (muy poco comunes)	Alta	Bajo
LFP Litio-ferrofosfato	90-180	3.3	Aplicaciones estacionarias, buses eléctricos, vehículos eléctricos	Alta	Bajo
NMC Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto	150-260	3.7	Herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas, vehículos eléctricos	Media	Bajo
NCA Óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto	200-260	4.0	Dispositivos médicos, baterías industriales, vehículos eléctricos	Baja	Medio
LTO Litio óxido de titanio	30-110	2.4	Dispositivos médicos, baterías industriales, vehículos eléctricos, teléfonos móviles, computadoras portátiles, cámaras	Alta	Bajo

La gestión adecuada de las baterías de iones de litio provenientes de los vehículos eléctricos depende en gran medida de la química mencionada anteriormente.

3.2 Ensayos de desempeño

Los ensayos de desempeño buscan diagnosticar las baterías de iones de litio bajo condiciones reales de operación. Estos ensayos son válidos para cualquier tipo de aplicación dentro de la movilidad eléctrica. En la Tabla 5 se detallan los principales ensayos, así como los estándares de referencia.

Tabla 5 ▼ Principales ensayos de desempeño y estándares aplicables. Fuente: Elaboración propia, 2025

Estándar	Título	Resumen y alcance
ISO/TS19466:2017	Ciclomotores de propulsión eléctrica y motocicletas. Método de prueba para evaluar el desempeño de sistemas de frenado regenerativo.	Procedimientos de prueba para medir el rendimiento de los sistemas de frenado regenerativo utilizados en motocicletas y ciclomotores eléctricos propulsados por motores de tracción con baterías eléctricas.
ISO 13064-1:2012	Ciclomotores y motocicletas eléctricas de batería. Rendimiento-Parte 1: Consumo energético de referencia y autonomía.	Procedimientos de prueba para medir el consumo de energía y la autonomía de referencia de motocicletas y ciclomotores eléctricos con únicamente una batería de tracción como fuente de energía para la propulsión del vehículo.
ISO 13064-2:2012	Ciclomotores y motocicletas eléctricas de batería. Rendimiento-Parte 2: Características de funcionamiento en carretera.	Procedimientos para medir el rendimiento en carretera de motocicletas y ciclomotores eléctricos (características de funcionamiento en carretera como velocidad, aceleración y capacidad para subir pendientes) con únicamente una batería de tracción como fuente de energía para la propulsión del vehículo.
ISO 12405:2018	Vehículos de carretera de propulsión eléctrica. Especificación de pruebas para sistemas y pack de baterías de tracción de iones de litio. Parte 4: Pruebas de rendimiento.	Procedimientos de prueba para las características básicas de rendimiento, confiabilidad y funcionalidad eléctrica de los paquetes y sistemas de baterías para aplicaciones de alta potencia o alta energía. A menos que se indique lo contrario, la prueba se aplica a ambas aplicaciones. Las aplicaciones típicas de los sistemas y paquetes de baterías de alta potencia son los vehículos eléctricos híbridos (HEV) y algunos tipos de vehículos de pila de combustible (FCV). Las aplicaciones típicas de los paquetes y sistemas de baterías de alta energía son los vehículos eléctricos de batería (BEV), los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y algún tipo de vehículos de pila de combustible (FCV). Las pruebas a nivel de celda se especifican en la serie IEC 62660.

3.3 Ensayos de diagnóstico

El procedimiento para diagnosticar y realizar un acondicionamiento de una batería de iones de litio requiere personal capacitado, equipos y métodos estándar. En la Tabla 6 se resumen los ensayos y condiciones propuestos para las baterías instaladas en vehículos eléctricos e híbridos.

Tabla 6 ▼ Ensayos recomendados para vehículos eléctricos e híbridos con baterías de iones de litio. Fuente: ISO 12405-4:2018 y IEC 62660-1:201

Parámetro	Estándar		
	ISO 12405-4:2018		IEC 62660-1:2010
	HEVs y FCVs	BEVs y PHEVs	BEVs y HEVs
Alcance	Pack, Sistema	Pack, Sistema	Celda
Nivel			
Energía	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 40, 25, 0, -18I descarga: 1C, 10C y max C-rate	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 40, 25, 0, -10, -18I descarga: C/3, 1C, 2C y max C-rate	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 25I descarga: C/3 (BEV), 1C (HEV)
Resistencia Interna	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 40, 25, 0, -10, -18SOC (%): 80, 65, 50, 35, 20I descarga: 1C	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 40, 25, 0, -10, -18, -25SOC (%): 90, 70, 50, 35, 20I descarga: C/3	<ul style="list-style-type: none">T(°C): 40, 25, 0, -20,SOC (%): 80, 50, 20I descarga: C/3, 1C, 2C, 5C y max. C-rate (BEV) C/3, 1C, 5C, 10C y max. C-rate (HEV)
Almacenamiento	<ul style="list-style-type: none">(sistema) AlmacenamientoT(°C): 45SOC (%): 50I descarga: 1CTiempo de prueba (días): 30	<ul style="list-style-type: none">(sistema) AlmacenamientoT(°C): 45SOC (%): 50I descarga: C/3Tiempo de prueba (días): 30	No aplica
Poder de arranque	<ul style="list-style-type: none">(sistema)T(°C): 50, 25, -18, -30SOC (%): el menor posible o 20 %	No aplica	No aplica
Eficiencia energética	<ul style="list-style-type: none">(sistema)T(°C): 40, 25, 0SOC (%): 65, 50, 35I descarga: max descarga o 20C	<ul style="list-style-type: none">(sistema)T(°C): 25, 0, TminI descarga: 1C, 2C, Cmax (carga rápida)	<ul style="list-style-type: none">(HEVs and BEVs)T(°C): 45, 0, -20SOC (%): 100, 70I descarga: C/3 (BEV), 1C (HEV)

Píldora informativa. Entendiendo los conceptos.

Estado de salud de las baterías (SOH, por sus siglas en inglés): Es una medida que indica la capacidad de una batería para almacenar y suministrar energía en comparación con su capacidad original. Se expresa en porcentaje, donde 100% indica que la batería está nueva y 0% que ha llegado al final de su vida útil como dispositivo de almacenamiento de energía. Las baterías de vehículos eléctricos terminan su vida útil en movilidad cuando este parámetro está entre el 80 y 70 % (Etxandi-Santolaya et al., 2024).

¿Por qué es importante? Porque es un indicativo del tiempo de vida útil de la batería, como dispositivo de almacenamiento de energía.

Estado de carga de las baterías (SOC, por sus siglas en inglés): Cuantifica la capacidad restante disponible en la batería en un momento dado y en relación con un determinado estado de envejecimiento. Suele expresarse en porcentaje 100% indica llena y 0% vacía.

¿Por qué es importante? Nos indica la energía restante almacenada en un momento dado.

C-rate: Es la medida de la corriente a la que se carga y descarga una batería en relación con su capacidad máxima. Una tasa de 1C significa que la corriente de carga o descarga permitirá que esta se lleve a cabo en 1 hora y así sucesivamente.

C5Ah: Es una unidad de medida que indica la capacidad de una batería en amperios/hora (Ah) cuando se descarga completamente en 5 horas. Por ejemplo, una batería con una capacidad de C5 de 590 Ah se puede descargar completamente en 5 horas con una corriente de descarga de 118 A.

¿Por qué son importantes el C-rate y el C5Ah? Son los parámetros que define el fabricante de baterías para cargar y descargar la mismas. Exceder estos valores aumenta drásticamente el flujo de electrones que circulan por los circuitos, lo que puede representar un riesgo para los materiales (sobrecalentamiento, rupturas). Asimismo, si los valores son muy bajos, se genera una desestabilización en el voltaje produciendo picos elevados de corrientes.

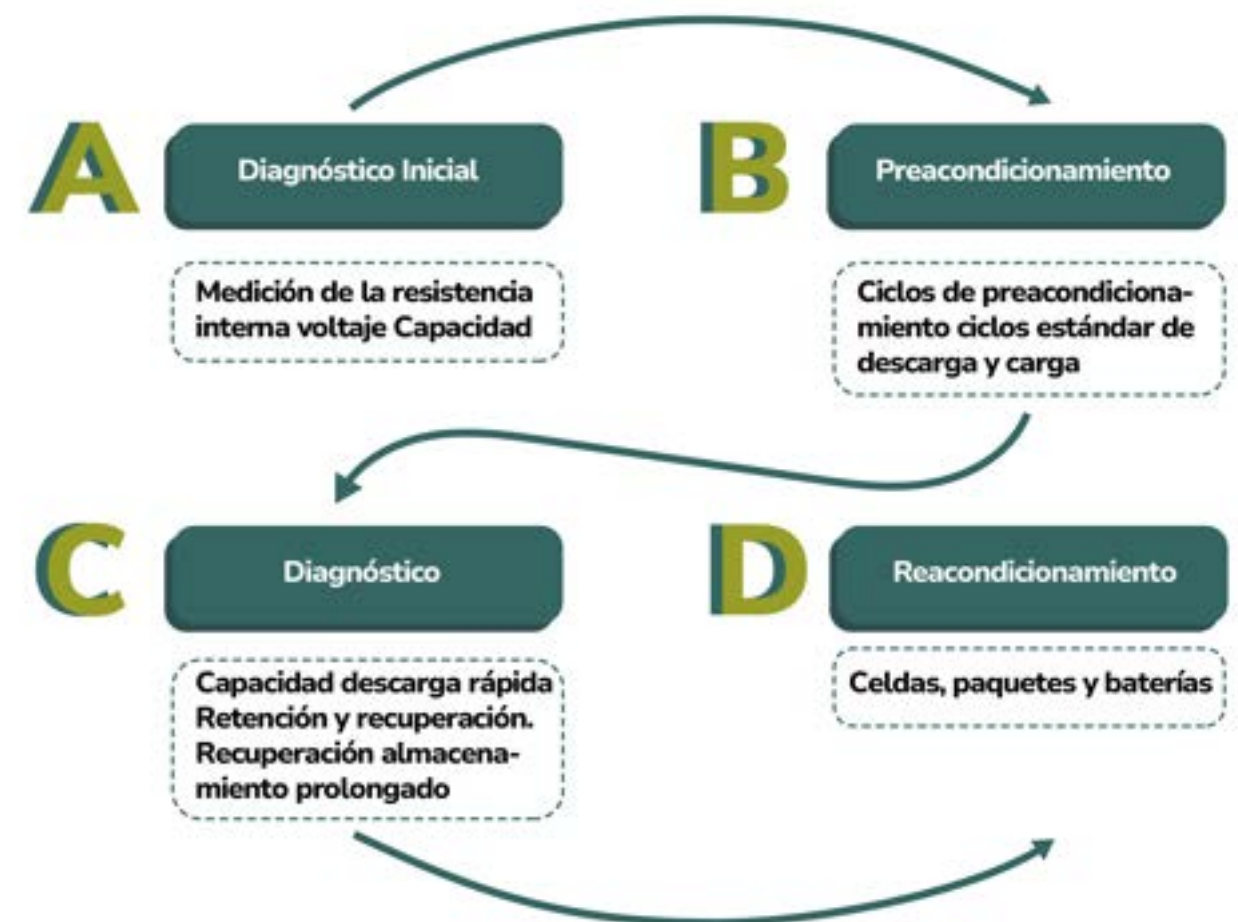
Profundidad de descarga de las baterías: Indica la cantidad de energía que se extrae de una batería antes de recargarla.

¿Por qué es importante? Una batería que se somete frecuentemente a ciclos de descarga profundos puede presentar deterioro en su rendimiento por la degradación de sus componentes, electrolito, solvente o material del cátodo. Conocer la profundidad de descarga ayuda a establecer las condiciones para una potencial segunda vida.

Ciclos de carga y descarga de las baterías: Se le llama ciclo de carga y descarga al proceso de tomar una batería cargada someterla a un proceso de descarga, por uso natural o acelerado, y volverla a cargar hasta llegar a su estado de carga

En la Figura 6 se muestra el procedimiento general para realizar el diagnóstico y acondicionamiento de una batería de iones de litio de baja capacidad.

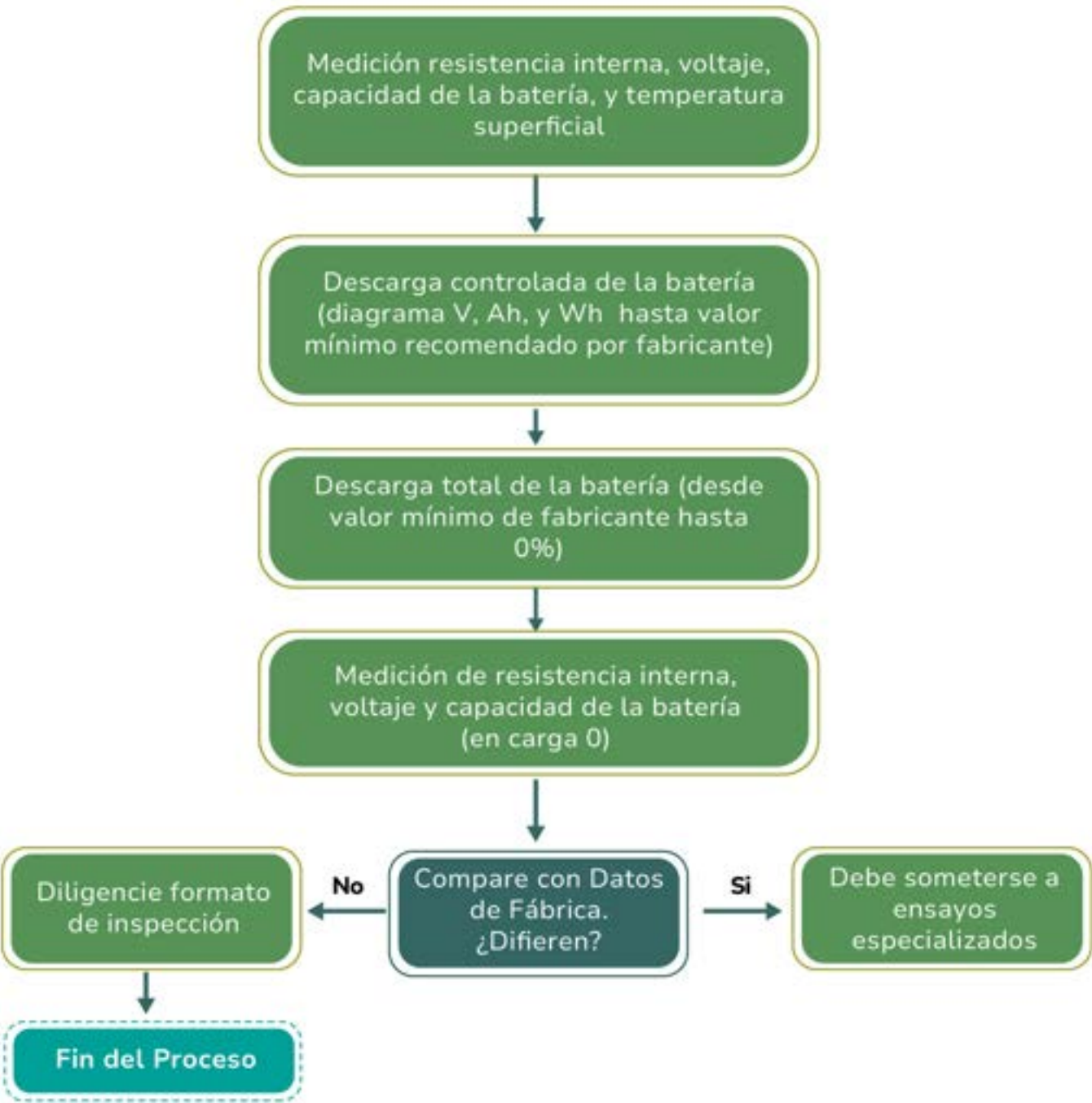
Figura 6 ► Procedimiento para realizar diagnóstico y acondicionamiento de una batería de iones. Fuente: Elaboración propia, 2025



A. Diagnóstico inicial

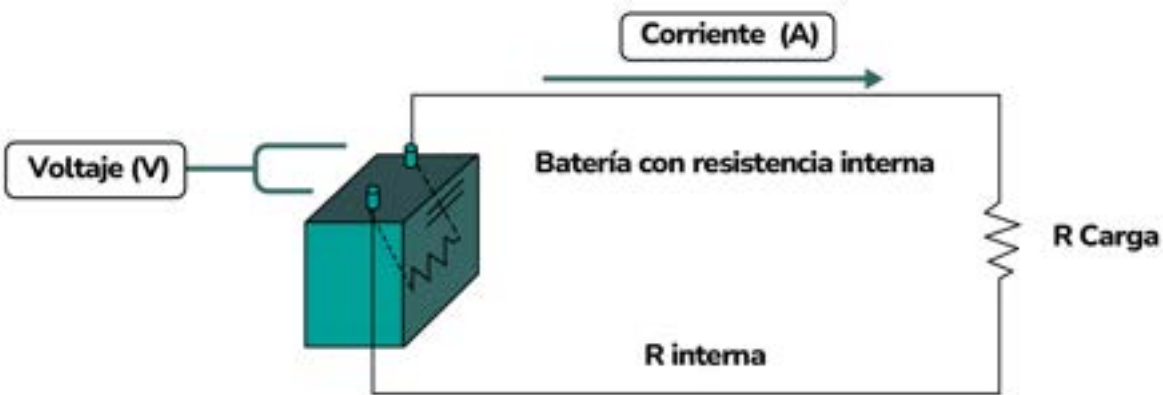
La evaluación de la batería consiste en establecer los parámetros de resistencia interna, capacidad y voltaje. El procedimiento que se debe realizar se detalla en la Figura 7.

Figura 7 ▶ Procedimiento para realizar diagnóstico inicial para una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018.



La batería se puede entender como una fuente de corriente con una resistencia interna con la cual se alimenta una carga externa. En la Figura 8 se muestra el circuito eléctrico que representa el funcionamiento de una batería.

Figura 8 ▶ Circuito eléctrico de una batería. Fuente: adaptado de Georgia State University (2017)



Para determinar la resistencia interna de una batería, se usa la ecuación que se describe a continuación.

Donde:

Ri = Resistencia interna en Ohmios

V = Voltaje de la fuente en Voltios

I = Corriente de circulación en Amperios.

$$R_i = \frac{V}{I}$$

La resistencia interna se debe medir aplicando el método de Corriente Alterna - CA, el cual es un método diseñado específicamente para medir la resistencia interna de una batería. Este método consiste en que el equipo aplica una pequeña corriente alterna (medible) en forma constante a la batería mientras se mide el voltaje generado por la batería. Con la corriente aplicada y el voltaje generado, el equipo calcula automáticamente la resistencia interna de acuerdo con la ecuación descrita anteriormente.

Los estándares internacionales para medir la resistencia interna, capacidad y voltaje de baterías de iones de litio se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7 ▼ Estándares para medir resistencia interna, capacidad y voltaje de las baterías. Fuente: Elaboración propia, 2025

Organización	Estándar
International Electrotechnical Commission (IEC)	IEC 61960-3 e IEC 62620
International Organization for Standardization (ISO)	ISO 12405-4

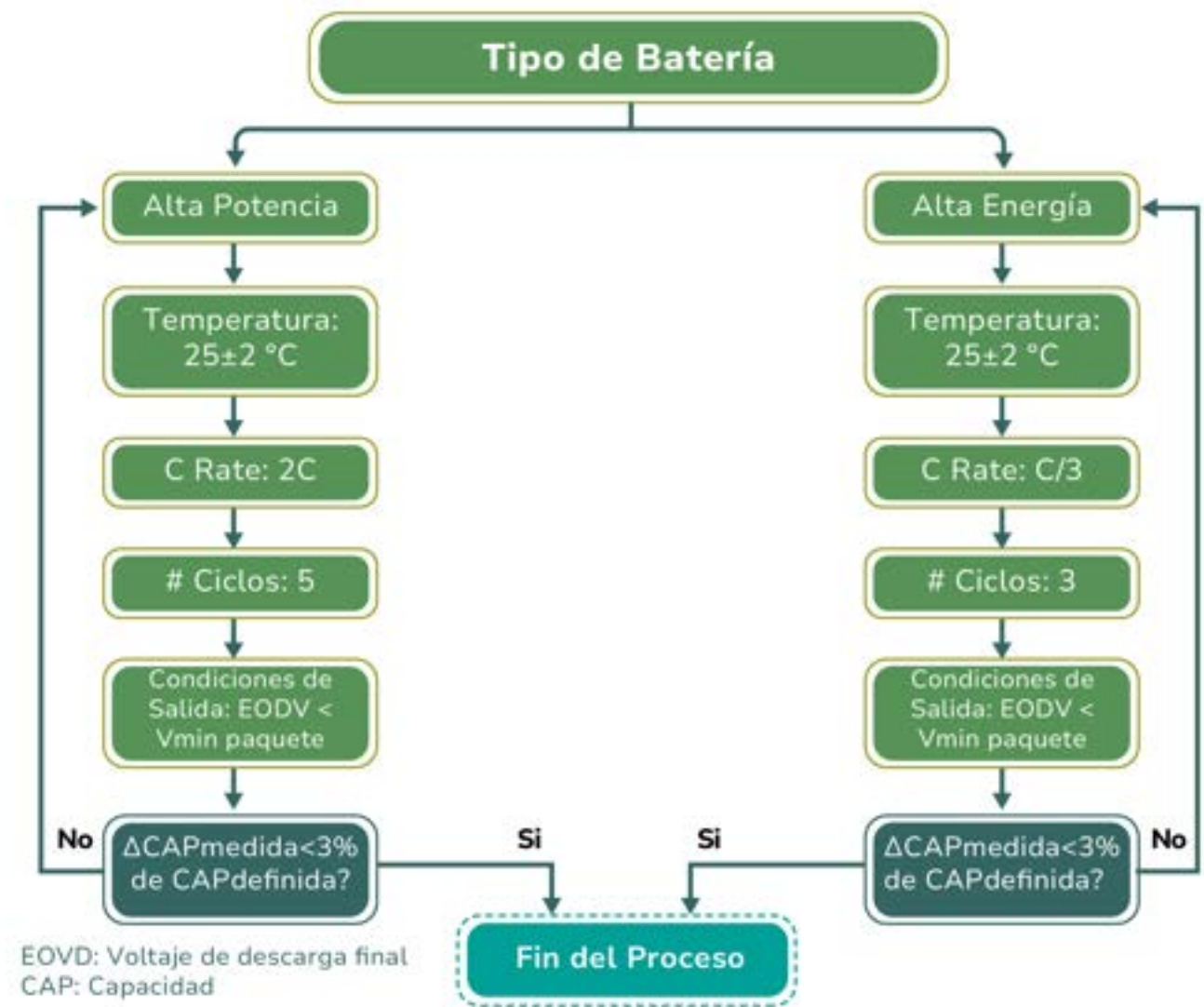
En caso de que la resistencia interna de la batería difiera en un porcentaje mayor al 5% de acuerdo con los valores del fabricante, la batería debe someterse a un procedimiento de balanceo para restablecerse. Si logra restablecerse, se debe determinar la capacidad y voltaje final siguiendo los procedimientos que se describen en la sección C. Diagnóstico.

B. Preacondicionamiento

El preacondicionamiento es una práctica recomendada por ISO 12405-4:2018 e IEC 62660-1:2010 y está dividida en dos fases. La primera es un conjunto de ciclos de preacondicionamiento y la segunda es un conjunto de ciclos estándar de descarga y de carga. Cada una de estas fases se aplica de acuerdo con el tipo de batería. Los estándares internacionales clasifican las baterías como baterías de alta potencia y baterías de alta energía. Dependiendo de esta clasificación, deberá aplicarse el método específico para preacondicionamiento y para descarga y carga, como se describe a continuación.

- **Ciclos de preacondicionamiento:** Los ciclos de preacondicionamiento sirven para garantizar una estabilización adecuada del paquete de baterías para el rendimiento del sistema. La Figura 9 detalla el procedimiento a aplicar en ciclos de preacondicionamiento a baterías de iones de litio de acuerdo con la clasificación determinada anteriormente.

Figura 9 ► Circuito eléctrico de una batería. Fuente: adaptado de Georgia State University (2017)



- **Ciclos de descarga y carga:** El alcance del ciclo estándar es garantizar la misma condición inicial para cada prueba de un paquete o sistema de baterías. Se debe realizar un ciclo estándar antes de cada prueba. El ciclo se compone de una descarga estándar, un período de descanso y una carga estándar. Las Figura 10 y Figura 11 muestran los procedimientos.

Una vez ejecutados estos procedimientos de preacondicionamiento y de descarga y carga, se procede a ejecutar los procedimientos de diagnóstico propiamente. Estos procedimientos se detallan en la siguiente sección.

Figura 10 ▼ Ciclo estándar de descarga de acuerdo con el tipo de batería. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018

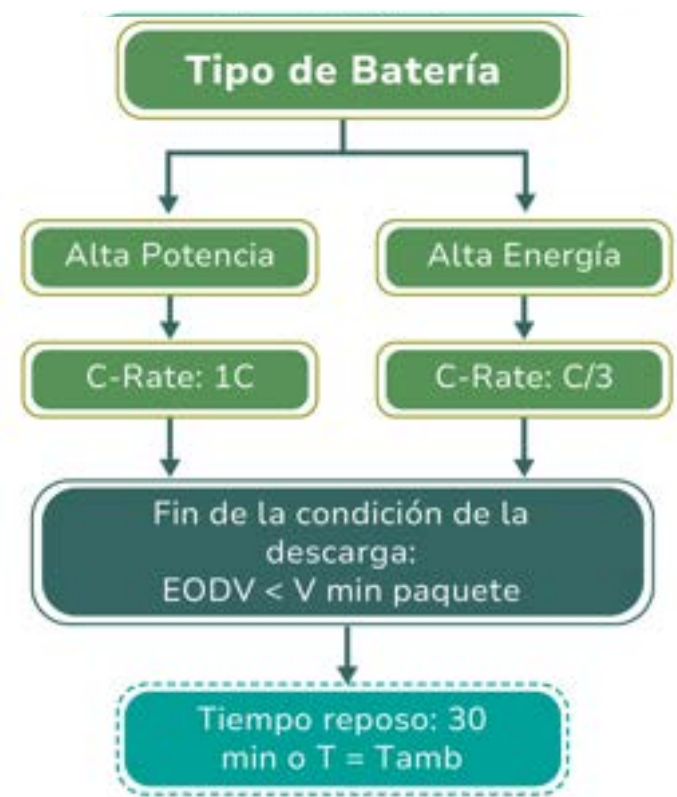


Figura 11 ▼ Ciclo estándar de carga de acuerdo con el tipo de batería. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018



C. Diagnóstico

Los ensayos para diagnosticar el estado de una batería de iones de litio buscan determinar la condición real eléctrica de la misma. Por el uso al que se someten las baterías, éstas van degradándose por condiciones de carga y descarga, temperatura y manejo.

Los ensayos deben realizarse con corrientes de carga y descarga de acuerdo con las capacidades definidas. La corriente de carga/descarga se basa en la capacidad definida (C5Ah). Estas corrientes son expresadas como múltiplo de I_t A donde I_t A = C5 Ah/1h.

Los equipos que se usen para ejecutar estos ensayos deben contar con las especificaciones que se indican en la Tabla 8.

Tabla 8 ▼ Especificaciones mínimas de tolerancia en la medición de parámetros para ejecutar los ensayos de diagnóstico. Fuente: ISO 12405-4:2018

Parámetro	Tolerancia
Voltaje	± 1% V
Corriente	± 0.05 A
Capacidad	± 1%
Temperatura	± 0.1oC
Tiempo	± 1s

- **Determinación de la capacidad de la batería** Una vez la batería fue sometida a un proceso de descarga controlada como paso fundamental en el acondicionamiento de las baterías, se procede a determinar la capacidad nominal de la batería siguiendo el siguiente procedimiento (Figura 12).

Figura 12 ▼ Procedimiento para determinar la capacidad de una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018.



Paso 1. La celda o batería se preacondicionará y se cargará de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección B. Preacondicionamiento.

Paso 2. La celda o batería se cargará de acuerdo con las siguientes recomendaciones. A menos que se indique lo contrario, las celdas o baterías se cargarán en un ambiente a temperatura de 20 °C ± 5 °C y a una corriente constante de 0,2 It A, utilizando el método declarado por el fabricante. Es recomendable realizar este procedimiento a temperaturas de 10 °C ± 5 °C y 30 °C ± 5 °C, para el caso de Colombia.

Paso 3. La celda o batería se almacenará, a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C, por no menos de 1 hora y no más de 4 horas.

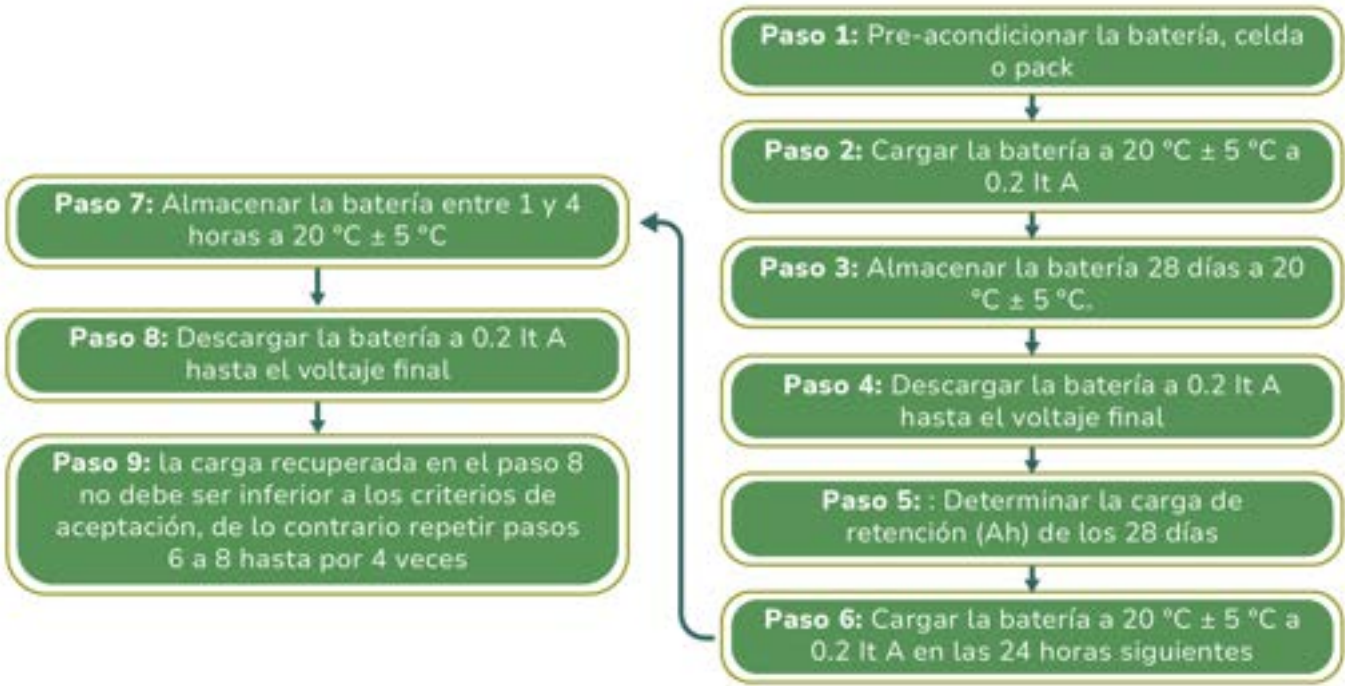
Paso 4. La celda o batería se descargará, a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C, a una corriente constante de 0,2 It A, hasta que su tensión sea igual a la tensión final especificada por el fabricante.

Paso 5. La capacidad (Ah) entregada durante el paso 4 no será inferior al 100 % de la capacidad nominal declarada por el fabricante.

Paso 6. Los pasos 2 a 5 se pueden repetir hasta cuatro veces más, según sea necesario para satisfacer este requisito.

- **Capacidad de retención y recuperación de la batería** Los ensayos para establecer la capacidad de descarga son herramientas fundamentales para determinar el estado de una batería de iones de litio. El ensayo de descarga permite establecer la capacidad que conserva una celda o batería después de haber sido usada y, en segundo lugar, la capacidad de recuperación a corto tiempo. El procedimiento se resume a continuación (Figura 13).

Figura 13 ▼ Procedimiento para determinar la capacidad de retención y recuperación de una batería de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018.



Paso 1 y 2 . La celda o batería se preacondicionará y se cargará de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección B. Preacondicionamiento.

Paso 3. La celda o batería se almacenará a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C durante 28 días.

Paso 4. La celda o batería se descargará a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C y a una corriente constante de 0,2 It A, hasta que su tensión sea igual a la tensión final especificada por el fabricante.

Paso 5. La capacidad retenida (Ah) de 28 días entregada durante el paso 3, no será inferior a lo especificado para esta característica en la Tabla 9.

Paso 6. La celda o batería se cargará a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C y a una corriente constante de 0,2 It A, dentro de las 24 h siguientes a la descarga del paso 3.

Paso 7. La celda o batería se almacenará a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C, por no menos de 1 hora y no más de 4 horas.

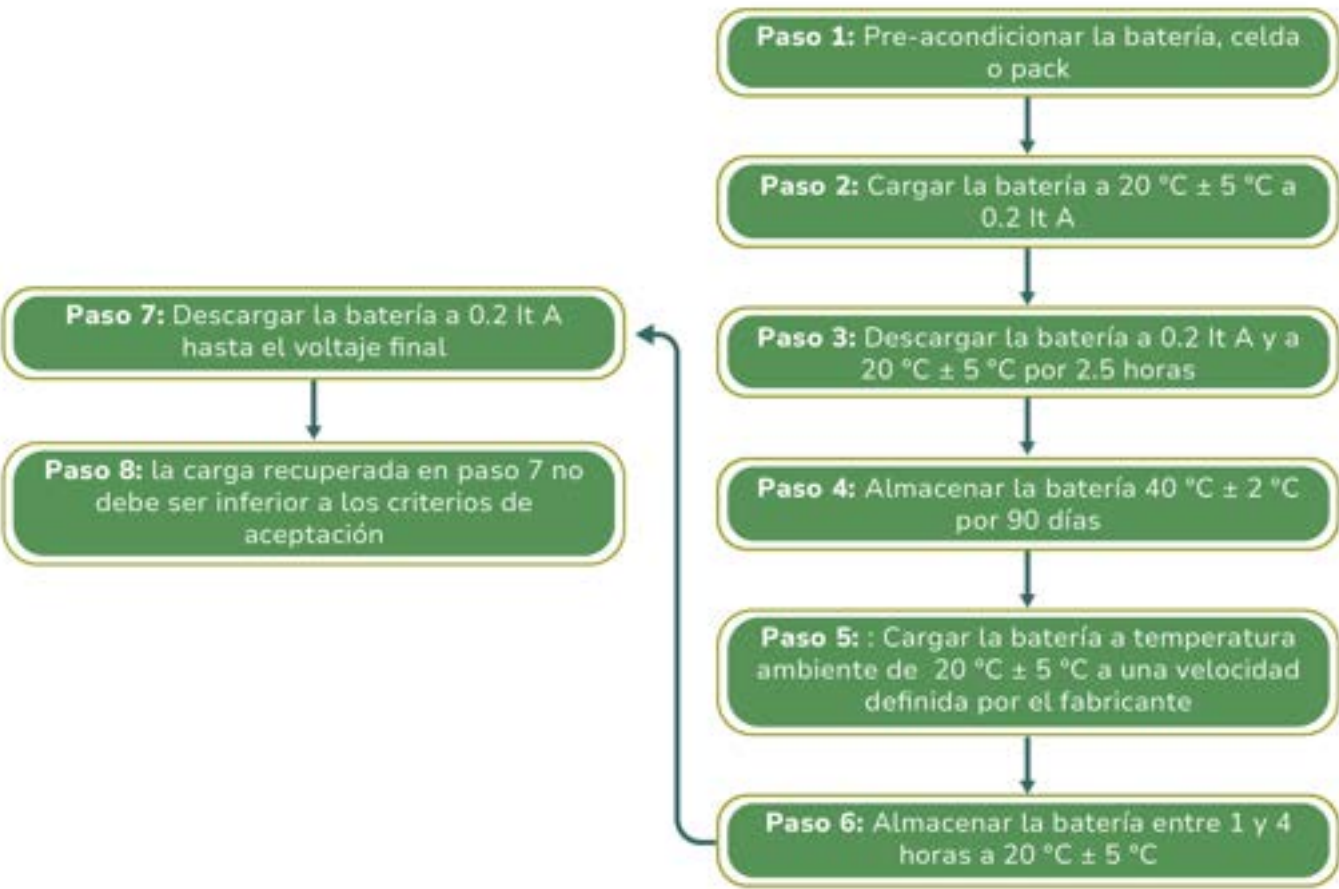
Paso 8. La celda o batería se descargará a una temperatura ambiente de 20 °C ± 5 °C y a una

corriente constante de 0,2 It A, hasta que su tensión sea igual a la tensión final especificada por el fabricante.

Paso 9. La capacidad de recuperación (Ah) entregada durante el paso 7, no será inferior a la especificado para esta característica en la Tabla 9.

- **Capacidad de retención y recuperación después de un largo almacenamiento de la batería** Este ensayo permite establecer el estado de la batería en el tiempo. Cuando las baterías dejan de ser usadas por algún motivo y vuelven a operación, pueden presentar cambios en sus capacidades nominales. Periodos de 15 o 30 días de no uso de las baterías son frecuentes debido, por ejemplo, a periodos de vacaciones o periodos durante los cuales se presentan épocas de lluvia prolongadas y se evita el uso de los vehículos. Ante estas condiciones, este tipo de ensayos permite entender los impactos que tienen estas suspensiones en las capacidades de descarga, carga y almacenamiento de las baterías de iones de litio. El procedimiento se detalla a continuación (Figura 14).

Figura 14 ▼ Procedimiento para determinar capacidad de retención y recuperación de una batería en un periodo largo de tiempo. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018



La norma ISO 1245-4:2018 establece un conjunto de requerimientos mínimos que deben cumplirse derivados de la ejecución de los ensayos descritos en esta sección. La Tabla 9 muestra dichos requerimientos mínimos.

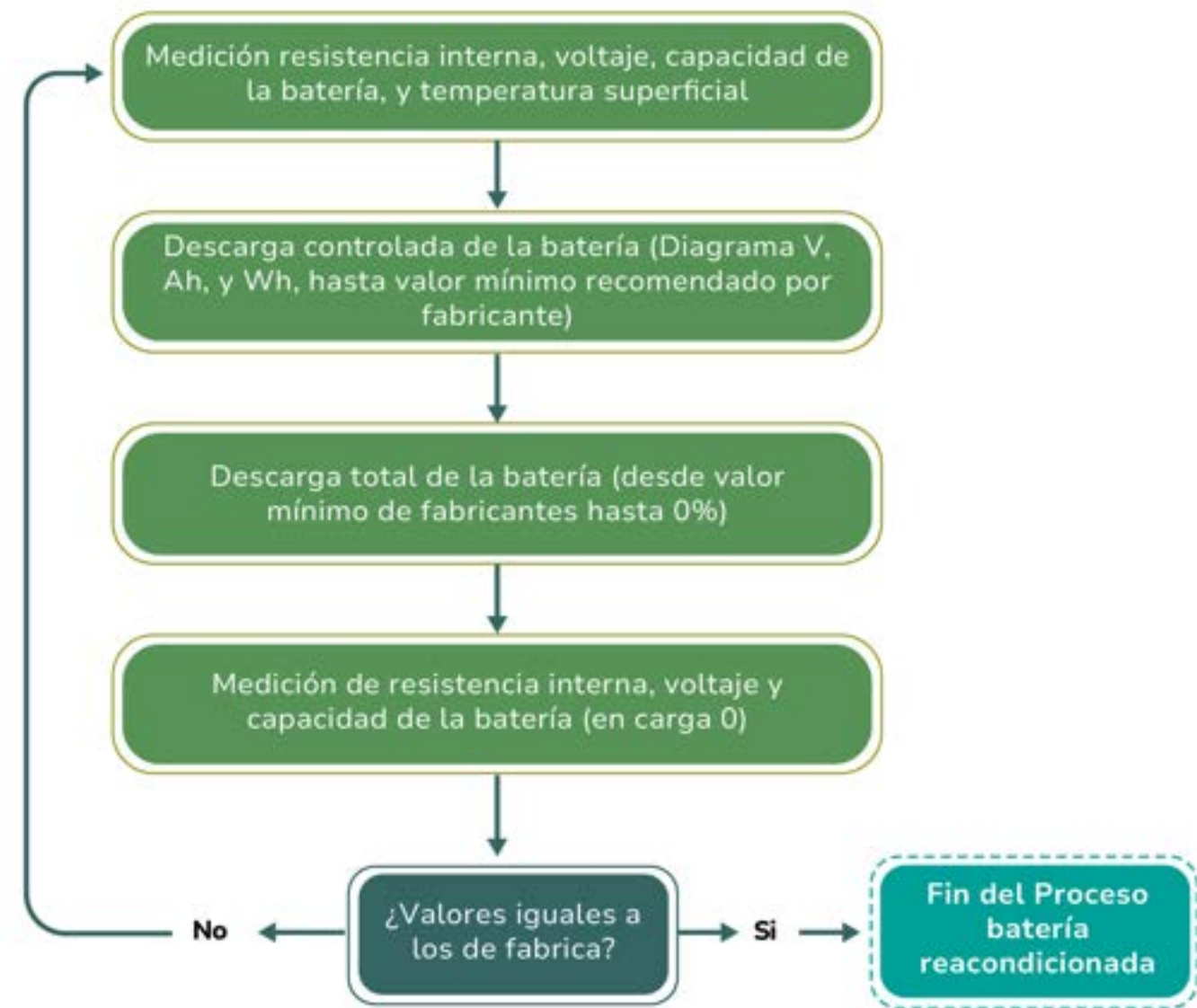
Tabla 9 ▼ Requerimientos mínimos para cada tipo de ensayo de diagnóstico para celdas y baterías de iones de litio. Fuente: Adaptado de ISO 12405-4:2018.

Parámetro	Criterio de aceptación (Celdas)	Criterio de Aceptación (Baterías)
Capacidad a 20 °C ± 5 °C	100 % C5 Ah°C	100 % C5 Ah
Capacidad a -20 °C ± 2 °C	30 % C5 Ah	30 % C5 Ah
Alta capacidad de descarga a 20 °C ± 5 °C	70 % C5 Ah	60 % C5 Ah
Carga (Capacidad) Retención	70 % C5 Ah	60 % C5 Ah
Carga (Capacidad) Recuperación	85 % C5 Ah	85 % C5 Ah
Capacidad de recuperación después de almacenamiento	50 % C5 Ah	50 % C5 Ah
Resistencia en ciclos	400 Ciclos	300 Ciclos
Resistencia en ciclos acelerado	60 % C5 Ah	60 % C5 Ah
Descarga electrostática	No aplica	Operacional

D. Reacondicionamiento

Una vez la batería se haya evaluado en su estado (resistencia interna, capacidad de carga y voltaje), se haya descargado controladamente y se haya realizado una carga controladamente de acondicionamiento, se procede a realizar una evaluación de su reacondicionamiento. Esta evaluación se detalla a continuación (Figura 15).

Figura 15 ▾ Evaluación reacondicionamiento de la batería. Fuente: Elaboración propia, 2025



La aplicación de diagnósticos adecuados y estandarizados a las baterías de iones de litio garantiza que se alcance la vida útil para la cual fueron diseñadas, redundando en los beneficios a los usuarios finales y a disminuir los residuos generados por la movilidad sostenible. Ejercer un correcto diagnóstico del estado de las baterías de iones de litio requiere de un ecosistema compuesto por educación al usuario del vehículo, buenas prácticas de mantenimiento, personal capacitado, soporte técnico de fábrica e infraestructura de cadena postventa, entre otros. En la medida que el país continúe avanzando en la movilidad sostenible, el gobierno colombiano requerirá desarrollar regulaciones para ejercer ciertas labores dentro del proceso de diagnóstico de baterías de iones de litio. Por ahora, los importadores, comercializadores y distribuidores de vehículos con tracción eléctrica deberán promover las mejores prácticas para garantizar, a través de procesos estandarizados, un correcto mantenimiento de las baterías, llevando registro de las tareas ejecutadas y describiendo las recomendaciones necesarias para un correcto funcionamiento y operación de estas.

4. Reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica

En este capítulo se tratan los aspectos generales del reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica. Se presentan argumentos que buscan incentivar la incorporación de las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos descartadas en una segunda vida, por ejemplo, en usos estacionarios, y buscan promover el desarrollo de estrategias y alternativas que fortalezcan los modelos circulares. Finalmente, se describen los procesos de diagnóstico, reacondicionamiento y remanufactura de las baterías de iones de litio y sus potenciales aplicaciones en una segunda vida.

4.1 Aspectos generales del reacondicionamiento y la remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos

Colombia viene promoviendo y articulando las actividades tendientes a incrementar la vida útil de los RAEE mediante las actividades de reacondicionamiento y remanufactura a través de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), en donde estas actividades constituyen objetivos específicos y líneas prioritizadas.

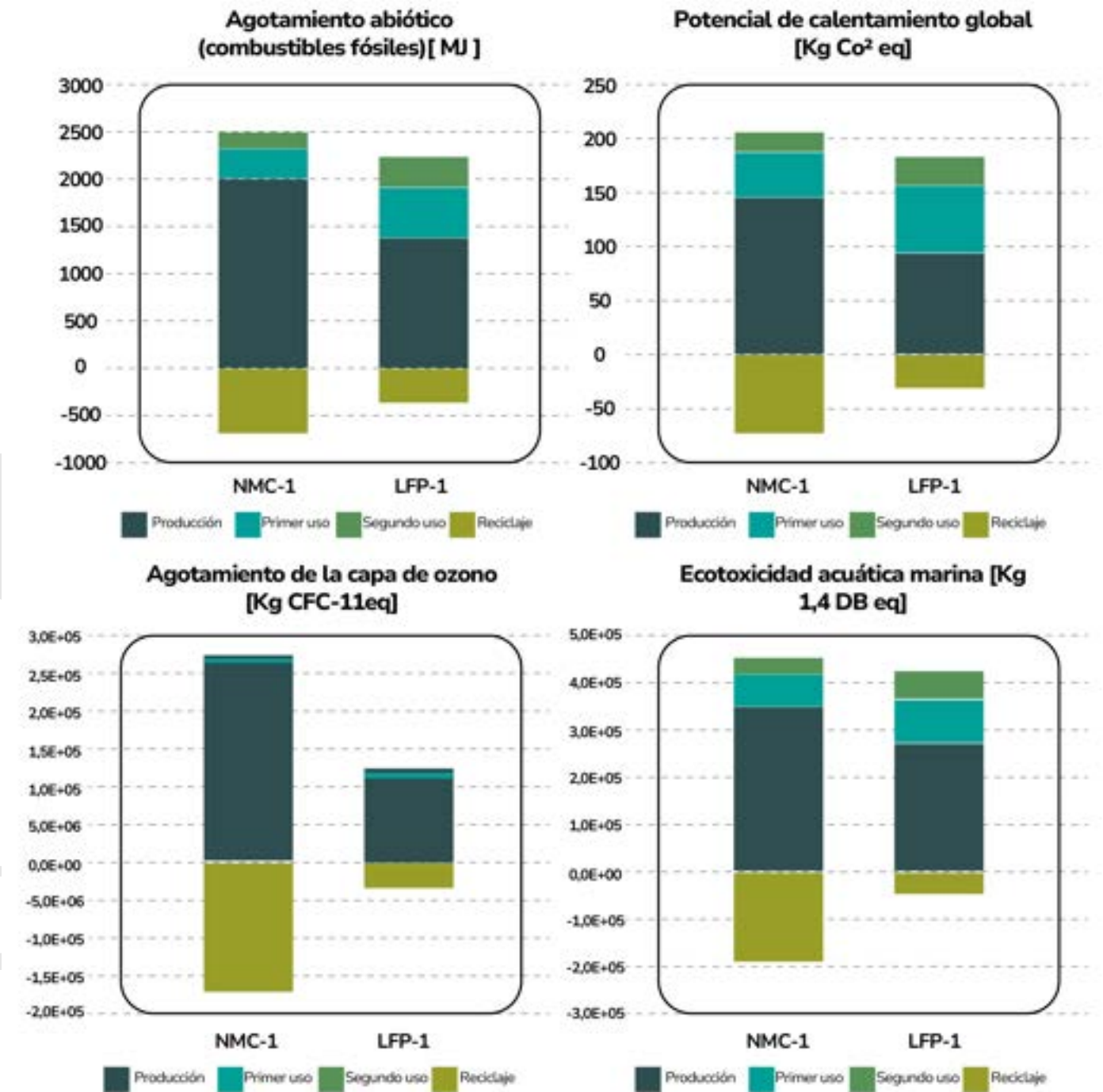
Las actividades de reacondicionamiento y remanufactura implican, en la práctica, la renovación de las condiciones funcionales y estéticas de un aparato eléctrico y electrónico para usar en un nuevo ciclo de vida y cualquier acción necesaria para construir productos con calidad de nuevos, utilizando componentes tomados de AEE previamente usados, así como nuevos componentes, si es el caso. El reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos supone grandes beneficios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

Desde el punto de vista técnico, el reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos contribuye al desarrollo de capacidades productivas que fortalecen los modelos de negocios basados en principios circulares, dado que la remanufactura de baterías de iones de litio requiere técnicas de diagnóstico y procesos detallados de diseño industrial, ingeniería eléctrica y electrónica, programación y el desarrollo de cadenas de abastecimiento para la fabricación e incorporación de partes que den al nuevo producto características similares a los productos nuevos.

Desde el punto de vista económico, se promueve el crecimiento de mercados de alto valor agregado y altamente competitivos. Las baterías como sistemas de almacenamiento de energía estacionaria, por ejemplo, tienen un amplio rango de aplicaciones que van desde pequeños bancos de uso doméstico hasta grandes sistemas de respaldo de varios gigavatios (BESS) que podrían abastecer a una comunidad.

Desde el punto de vista ambiental, el reacondicionamiento o remanufactura de baterías de iones de litio son procesos indispensables para minimizar los impactos ambientales que dejan las etapas de explotación minera para la extracción de materias primas, el refinamiento de las materias primas, la producción de componentes, la fabricación y el ensamble de las baterías en su primera vida. Análisis de ciclo de vida realizado a baterías de iones de litio de vehículos eléctricos evidencian que las etapas de reacondicionamiento y remanufactura (segundo uso), recuperación y aprovechamiento (reciclaje) son las que generan menos impactos ambientales desde el punto de vista de indicadores objetivo como: agotamiento abiótico, potencial de calentamiento global y destrucción de la capa de ozono, por mencionar algunos (Figura 16).

Figura 16 ▾ Algunos impactos ambientales del ciclo de vida de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos. Fuente: Adaptado de Fan, T. et al (2023)



Desde el punto de vista social, los beneficios se ven reflejados en la preservación de los servicios ambientales, la accesibilidad a fuentes de energía alternativas y más limpias, por ejemplo, en áreas rurales o no interconectadas, y los impactos que estos beneficios suponen en el mediano y largo plazo.

Para tener en cuenta. Flujograma de decisiones que nos ha llevado hasta la etapa de remanufactura.

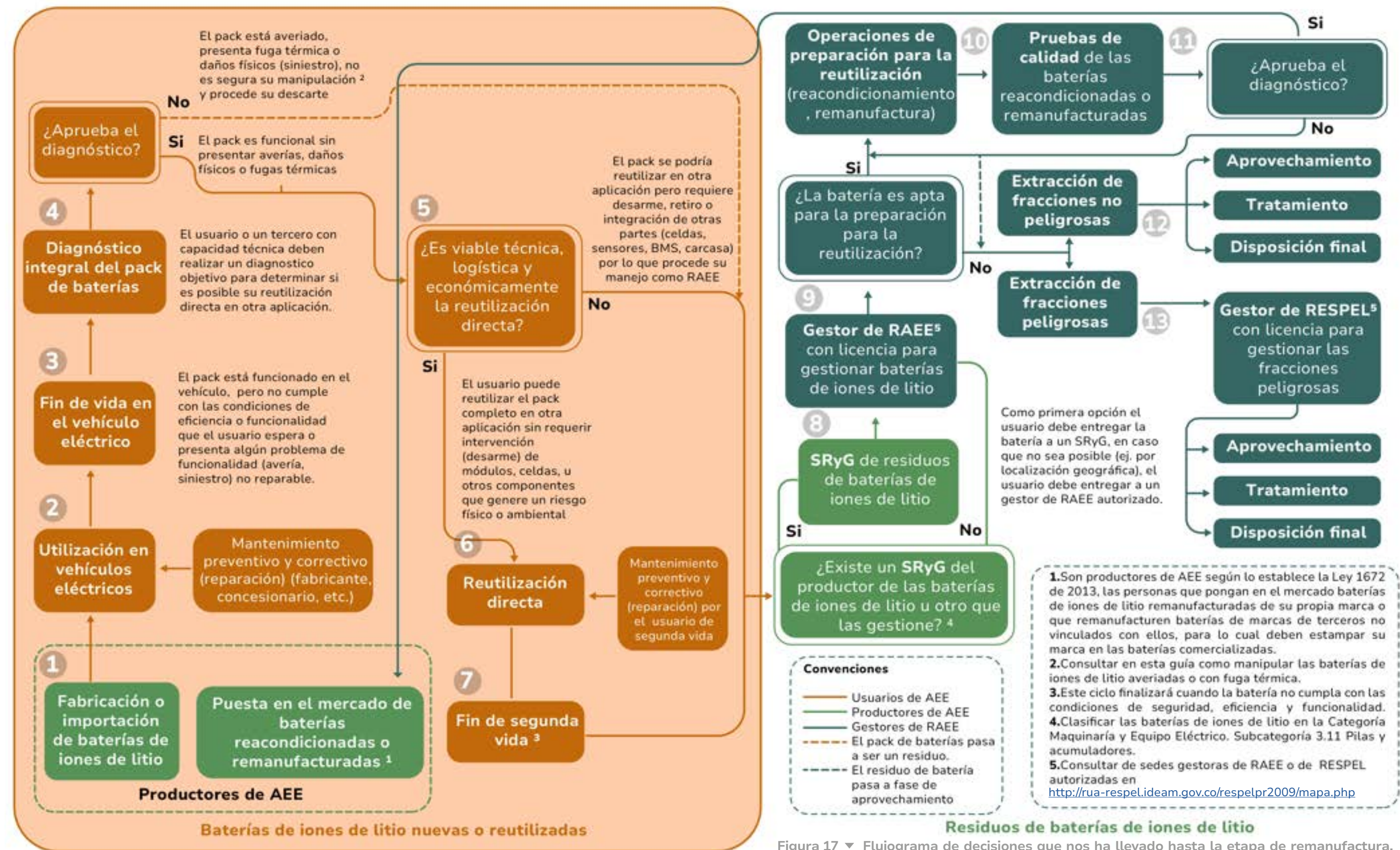


Figura 17 ▾ Flujograma de decisiones que nos ha llevado hasta la etapa de remanufactura. Fuente: Adaptado de Congreso de Colombia (2013)

4.2 Proceso de reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos

Los procesos de reacondicionamiento y remanufactura de RAEE comprenden los procedimientos técnicos enfocados en renovar, restablecer e introducir los RAEE a un nuevo ciclo en forma de AEE de segunda vida con calidad de nuevos. Para las baterías de iones de litio que se descartan de los vehículos eléctricos y que, por tanto, deben tratarse como RAEE, estos procesos comprenden una inspección preliminar que tiene como objetivo determinar la integridad física y mecánica de las baterías y obtener información básica de la misma, que será de utilidad en la toma de decisiones más adelante.

Con la información básica de la batería, se deberá pasar por un proceso de desensamble en donde los componentes serán separados y clasificados para ser recuperados y reutilizados o serán enviados a tratamiento para la recuperación de materiales reciclables o para el manejo de fracciones peligrosas, o como última opción a disposición final sino hay ninguna forma de aprovechamiento seguro. Posteriormente, se realiza la etapa de diagnóstico básico, en donde se determina el voltaje de los módulos o celdas y se compara con el valor nominal según la química y los datos del fabricante. Este paso constituye un punto crítico de decisión. Si las baterías tienen un voltaje menor al valor nominal según la química, los módulos o celdas pueden presentar procesos de degradación en su electrolito, solvente o material del cátodo (Schomburg et al., 2024) y pueden fallar de forma temprana o generar condiciones de riesgo para los usuarios. En este caso lo más recomendable es disponer de las baterías para procesos de recuperación y aprovechamiento.

Los módulos o celdas que pasen la prueba de diagnóstico básico se deben llevar a un diagnóstico exhaustivo que permita determinar la vida útil de las baterías en términos de su estado de salud, estado de carga, profundidad de descarga y que permita estimar el número de ciclos de carga y descarga remanentes.

Una vez que se conoce la vida útil de las baterías, se pasa a las etapas de diseño, reacondicionamiento o remanufactura, ensamble, pruebas de calidad y comercialización de un AEE de segunda vida.

A continuación, se describen cada una de las etapas del reacondicionamiento y remanufactura de las baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica (Tabla 10).

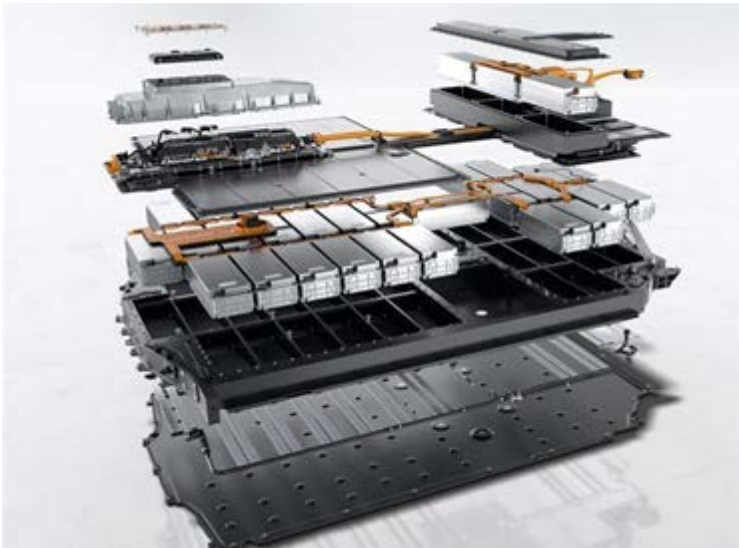
Tabla 10 ▼ Etapas de reacondicionamiento y remanufactura de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos. Fuente: Elaboración propia (2025).

Etapa	Descripción
Inspección inicial	<p>1. Al recibir las baterías verifique si tiene:</p> <ul style="list-style-type: none">• Golpes o abolladuras.• Derrame de refrigerante o electrolito. Algunos fabricantes usan refrigerantes como el polietilenglicol para controlar la temperatura interna de las baterías; por desperfectos físicos este puede generar derrames. A diferencia del refrigerante, un derrame de electrolito se puede reconocer porque el solvente utilizado tiene un olor característico a solvente con notas dulces.• Emisión de humos, vapores u olores.• Puntos calientes. Los puntos calientes pueden ser un indicador de fallas, como por ejemplo un cortocircuito.• Hinchamiento de la batería. Una batería inflada es un claro indicador de que los procesos de degradación de los compuestos químicos de las baterías están en un estado avanzado.
	<p>2. Información de la etiqueta.</p> <ul style="list-style-type: none">• Química de las baterías (NMC, LFP, LCO, LMO, etc.)• Voltaje nominal (V).• Capacidad nominal (Ah).• Tipo de celda (cilíndrica, prismática, de bolsa, etc.)• Energía nominal (kW)• C-rate

Model Number: X48-600
Part Number: 100165-00
Serial Number: 2000989
Date of MFG: 200817
Nominal Voltage: 51.2 VDC
Capacity: 600 Ah
Service Weight: 2425 lbs / 1100 kg
Input: Ext Charge 57.6 VDC Max 350 A
Output: 51.2 VDC, 350 A Max Cont.
Chemistry: LiFePO₄

Una batería en buenas condiciones físicas y mecánicas es más probable que sea susceptible de reacondicionamiento y remanufactura que una batería físicamente averiada.

Etapa	Descripción
Recepción y almacenamiento	Ver 6. Manejo seguro de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos
Desensamble	<p>El desensamble de baterías de iones de litio es un proceso manual que se debe hacer con el uso adecuado de elementos de protección personal, considerando específicamente que pueden contener sustancias peligrosas y que existe riesgo eléctrico (Ver 6. Manejo seguro de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos). En el proceso de desensamble podrán encontrarse las siguientes partes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cofre exterior: es el elemento que contiene en su interior todas las partes de las baterías, comúnmente fabricado de hierro o aluminio. • Circuito de refrigeración y refrigerante: algunos fabricantes utilizan circuitos de refrigeración líquida para el control de la temperatura de los módulos de baterías. Previo al desensamble deberá verificarse si el refrigerante es un residuo peligroso o no para darle un manejo ambientalmente adecuado. • Cables: cables que componen el circuito eléctrico de la batería. • Sistema de control de la batería o BMS (por sus siglas en inglés): es una tarjeta de circuito impreso que actúa como el computador de la batería; algunos fabricantes utilizan una sola computadora de mando central, mientras que otros pueden utilizar más de una. Conocer los protocolos de comunicación y lenguaje de programación del BMS es vital para el funcionamiento adecuado de la batería, para su seguridad y para los procesos de reacondicionamiento y remanufactura, dado que permite la comunicación entre la batería y los AEE que se alimentan con su energía y permiten que la energía sea entregada de una forma regulada, además de establecer parámetros de funcionalidad como carga automática, y parámetros de seguridad como límites de sobrecarga y de profundidad de descarga de la batería. • Actualmente, en Colombia, los BMS no se reutilizan debido a que tienen protecciones de software y protocolos de comunicación protegidos o restringidos para cada marca que impiden su reutilización en baterías de segunda vida. • Módulos de baterías de iones de litio: los módulos de baterías son arreglos de celdas conectados en serie o paralelo según los requerimientos del vehículo. En este componente se almacena la energía eléctrica en forma de energía potencial química. En este punto del proceso de desensamble debe prestarse especial atención a los aspectos de seguridad como riesgo eléctrico y de incendio y verificar en detalle las mismas condiciones de la inspección inicial. <p>Dado que los módulos de las baterías, según su fabricante, pueden tener diferentes químicas, es recomendable hacer un procedimiento de numeración o clasificación específica del módulo que permita identificar como mínimo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Química de la batería (NMC, LFP, LCO, etc.) • Voltaje (V) determinado al momento del desensamble • Capacidad (Ah) determinada al momento del desensamble • Fecha de recepción • Fecha de medición del voltaje (V) y capacidad (Ah) <p>Esta información puede ser necesaria para determinar la viabilidad de procesos de reacondicionamiento o remanufactura.</p>



Etapa	Descripción
Diagnostico básico	<p>En primera instancia, se puede determinar si los módulos segregados durante el desensamble son aptos para procesos de reacondicionamiento o remanufactura haciendo una medición del voltaje de los módulos, con un multímetro comercial, y comparándolos con el voltaje nominal y el voltaje esperado según su química (Tabla 4).</p> <p>Criterio de decisión: si los módulos o celdas tienen un voltaje por encima o por debajo de los rangos aceptables según su química, se recomienda separar y enviar a procesos de recuperación y reciclaje.</p>
Diagnostico especializado	<p>Previo a las operaciones de diseño e ingeniería propias del reacondicionamiento y la remanufactura, es necesario conocer a profundidad el estado de salud, estado de carga, profundidad de descarga, estimación del número de ciclos de carga y descarga de los módulos y celdas que serán usados en AEE de segunda vida, para garantizar características de calidad mínimas para el usuario.</p> <p>El diagnóstico especializado requiere de equipos y técnicas avanzadas que permitan obtener datos precisos y confiables.</p> <p>Algunos métodos empleados para el diagnóstico especializado son:</p> <ul style="list-style-type: none">• Conteo de Coulomb• Espectroscopía de impedancia electroquímica• Resistencia interna <p>En Colombia, existen alianzas de empresas privadas con entidades públicas que ofrecen estos servicios especializados.</p> <p>Para ampliar la información sobre los métodos de diagnóstico se sugiere revisar la referencia (Basia et al., 2021).</p>
Diseño	<p>El reacondicionamiento y la remanufactura de las baterías de iones de litio para una segunda vida, requieren una etapa de diseño en la que se tomen en cuenta aspectos como:</p> <ul style="list-style-type: none">• Tamaño• Peso• Tipo de conexión• Sistema de control (BMS)• Aspectos de seguridad• Forma de la batería• Incorporación de aspectos de seguridad como refrigeración o aislamientos• Forma de transporte• Empaque• Rótulos y etiquetas, etc.

Etapa

Descripción

Pruebas de calidad y seguridad	<p>Para facilitar la incorporación de las baterías en el mercado para un segundo ciclo de vida, es aconsejable, en la medida de lo posible, ajustar las pruebas de calidad a estándares establecidos y aplicados a la producción de baterías en los aspectos técnicos. Estas pruebas deberán probar como mínimo:</p> <ul style="list-style-type: none">• La funcionalidad• Certificación de su vida útil• Su impacto ambiental o de seguridad• O cualquier otro procedimiento que permita identificar que el producto es seguro para su funcionamiento.
Comercialización	<p>Una vez terminadas las actividades anteriores se cuenta con un producto listo para salir al mercado.</p>

Para facilitar los procesos de economía circular de las baterías de iones de litio usadas en la movilidad eléctrica, mediante operaciones de reacondicionamiento y remanufactura, es importante que el gestor que desarrollará estas actividades cuente con toda la información que el usuario, productor, fabricante o importador o comercializador tenga acerca de las baterías, por ejemplo:

- Fabricación de las baterías.
- Esquema de ingeniería.
- Especificaciones (química, voltaje nominal, corriente nominal).
- Información sobre la primera vida de las baterías.
- Construcción de las baterías y configuración.
- Razones para descartar las baterías y fecha de remoción del servicio.
- Información disponible sobre el BMS (protocolo de comunicación protección de temperatura, board layout)
- Historial de las baterías, fallas, anomalías, mantenimientos, si es posible.
- Condiciones de almacenamiento después del servicio, si está disponible.
- Tipo de celdas (1725, de bolsa, prismática, etc).

Lo anterior, con el fin de conocer las condiciones de las baterías descartadas que son el símil de las materias primas en esta etapa del ciclo de vida.

5. Recuperación y aprovechamiento de las partes y materiales constituyentes de las baterías usadas y descartadas de vehículos eléctricos no aptas para la reutilización.

En este capítulo el lector encontrará una descripción de los componentes y las alternativas de aprovechamiento de los residuos de baterías de vehículos eléctricos una vez son descartadas para cualquier tipo de uso como acumulador de energía. Además, encontrará una descripción de las alternativas de comercialización de la masa negra resultante de las diferentes químicas y los retos para su inclusión a nuevos mercados.

5.1 Aspectos generales del aprovechamiento de las baterías de iones de litio para la recuperación de materiales.

Al final del ciclo de vida de las baterías de iones de litio, estas pueden ser recicladas para la recuperación de la mayor cantidad de materiales que sea posible. En principio, cerca del 100% de los residuos de baterías de iones de litio son recuperables, en la práctica, la factibilidad del aprovechamiento dependerá de factores técnicos relacionados con la capacidad del proceso para separar los materiales y con la existencia de demanda para los materiales recuperados, en especial la masa negra o masa electroquímica que contiene los metales de mayor interés.

La Figura 18 muestra las partes de una batería con potencial de aprovechamiento y la Tabla 11 los materiales que la constituyen.

Figura 18 ▼ Partes de una batería de iones de litio con potencial de aprovechamiento. Fuente: Adaptado de Coches.net (2022)

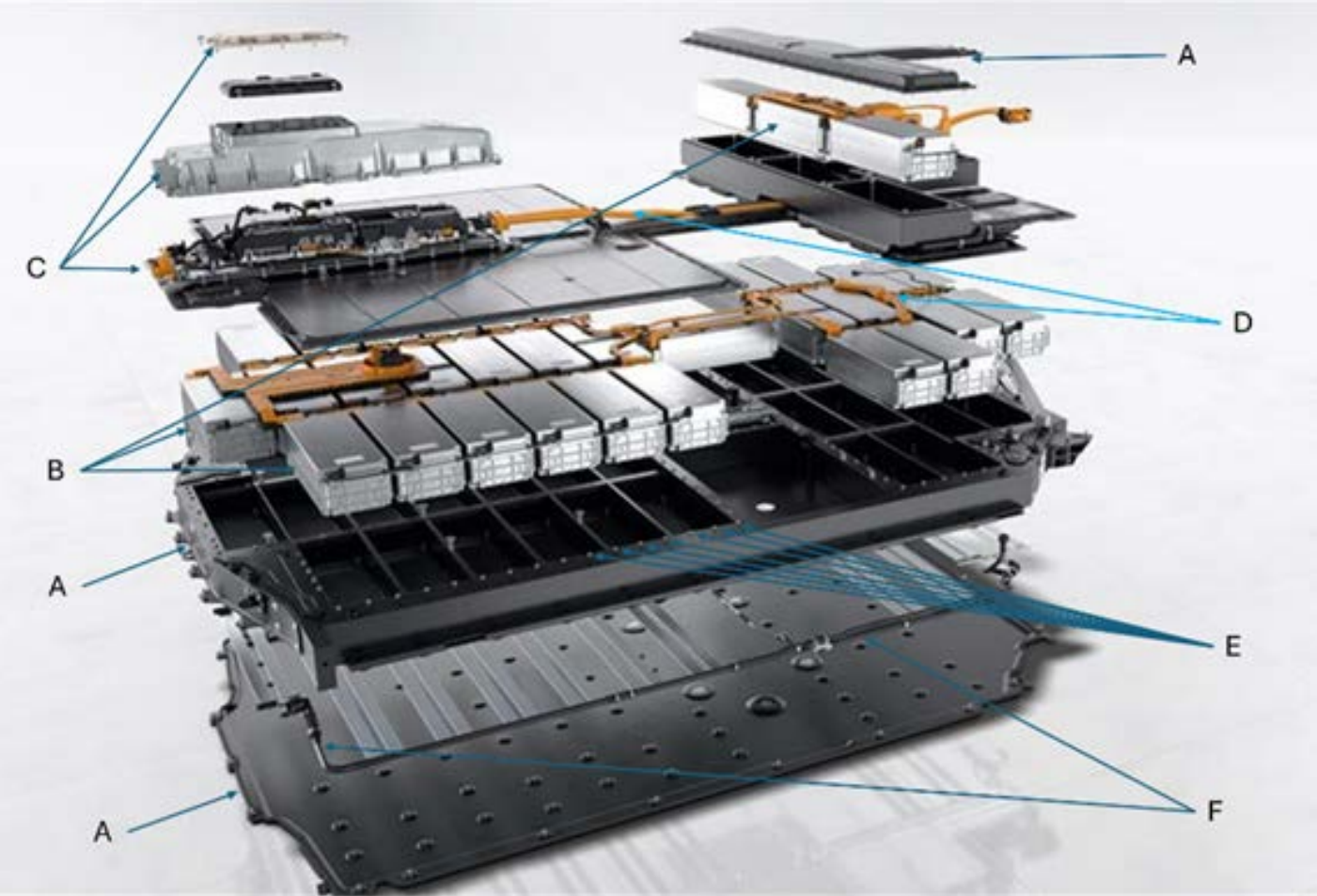


Tabla 11 ▼ Partes y materiales que componen una batería de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025).

Compo- nente	Descripción	Materiales
A	Cofre o caja. Es la cubierta exterior que contiene la batería	Hierro Aluminio Plástico
B	Módulos. Son los paquetes que contienen las celdas de la batería. Son la unidad funcional susceptible de remanufactura y fuente de la masa negra	Cubierta del módulo: Hierro Aluminio. Celda: Hierro Lámina de cobre Lámina de aluminio Masa negra (RESPEL*) Plástico (PE-PTFE) Mezcla de solvente y electrolito (RESPEL)
C	Computadora de las baterías (BMS)	Tarjeta de circuito impreso Caja plástica (PP)
D	Cables y bornes de conexión entre los módulos, computadora y conexión externa	Cables de cobre aislados Bornes de cobre aislados
E	Uniones	Tornillos de unión hierro
F	Sistema de refrigeración	Tubería en PVC Refrigerante

**La masa negra se considera de manera general como un residuo peligroso (Art 2.2.6.1.2.1. Decreto 1076 de 2015); no obstante, es responsabilidad del generador demostrar la peligrosidad o no del residuo para cada caso en particular.*

Píldora informativa. Masa negra o masa electroquímica

¿Qué es?

La masa negra o masa electroquímica es el residuo derivado de las baterías de iones de litio descartadas que se obtiene de los procesos de trituración y separación de materiales en el proceso de reciclaje. Este residuo resulta de la mezcla del grafito del ánodo y el compuesto del cátodo que contiene aluminio, cobalto, cobre, hierro, litio, manganeso y níquel, dependiendo del tipo de química de las celdas.

Figura 19 ▼ Masa negra proveniente de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: CICenergigUNE (2021).



Tabla 12 ▼ Composición química de baterías de iones de litio. Fuente adaptado de Woeste et al. (2024)

Química	Formula	Composición									Referencia
		Al	C	Co	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	O	
LMO	LiMn ² O ⁴	1.9	29.2	0.0	1.3	4.5	2.4	38.3	0.0	22.3	(Woeste et al., 2024)
LFP*	LiFePO ⁴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMC	LiNixMnyCozO ² (con x+y+z=1)	1.9	29.2	1.9	1.3	4.5	4.5	3.6	12.8	20.9	(Woeste et al., 2024)
				12.7			5.1	12.0	34.2		
NCA	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	11.2	29.3	20.0	1.3	4.6	2.4	0.0	20.2	11.0	(Woeste et al., 2024)

* La información disponible en la literatura sobre la caracterización de las baterías LFP es escasa, principalmente por la amplia disponibilidad de los materiales de este tipo de química. El reciclaje de los residuos de baterías de esta química es una oportunidad de alto impacto en el sector de aprovechamiento de residuos.

Características de peligrosidad.

En Colombia, un desecho peligroso se define como: “aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se consideran residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos” (MinAmbiente, 2005). Teniendo en cuenta esta definición, la masa negra o masa electroquímica de las baterías de iones de litio puede cumplir con algunas de las características de peligrosidad establecidas en el anexo III del convenio de Basilea ratificado por Colombia, las cuales corresponden a:

Clase de las naciones unidas	No. de código	Característica
1	H1	Explosivos*: Por sustancia explosiva o desecho se entiende toda sustancia o desecho sólido o líquido (o mezcla de sustancias o desechos) que por sí misma es capaz, mediante reacción química, de emitir un gas a una temperatura, presión y velocidad tales que puedan ocasionar daño a la zona circundante.
3	H3	Líquidos inflamables: Por líquidos inflamables se entiende aquellos líquidos, o mezclas de líquidos, o líquidos con sólidos en solución o suspensión que emiten vapores inflamables a temperaturas no mayores de 60.5°C.
4.1	H4.1	Sólidos inflamables: Se trata de los sólidos, o desechos sólidos, distintos a los clasificados como explosivos, que en las condiciones prevalecientes durante el transporte son fácilmente combustibles o pueden causar un incendio o contribuir al mismo, debido a la fricción.
4.2	H4.2	Sustancias o desechos susceptibles de combustión espontánea: Se trata de sustancias o desechos susceptibles de calentamiento espontáneo en las condiciones normales del transporte, o de calentamiento en contacto con el aire, y que pueden entonces encenderse.
4.3	H4.3	Sustancias o desechos que, en contacto con el agua, emiten gases inflamables: Sustancias o desechos que, por reacción con el agua, son susceptibles de inflamación espontánea o de emisión de gases inflamables en cantidades peligrosas.
6.1	H6.1	Tóxicos (venenos) agudos: Sustancias o desechos que pueden causar la muerte o lesiones graves o daños a la salud humana, si se ingieren o inhalan o entran en contacto con la piel.
9	H10	Liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua: Sustancias o desechos que, por reacción con el aire o el agua, pueden emitir gases tóxicos en cantidades peligrosas.
9	H11	Sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos): Sustancias o desechos que, de ser aspirados o ingeridos, o de penetrar en la piel, pueden entrañar efectos retardados o crónicos, incluso la carcinogénia.

*Se ha encontrado que la masa negra al dispersarse en el aire en concentraciones alrededor de 300 g/m3 puede llegar a generar explosiones, que no estarían relacionadas con la presencia del solvente en la masa negra (Huang et al., 2024).

5.2 Proceso de aprovechamiento para las baterías de iones de litio

El proceso de aprovechamiento de los residuos de baterías de iones de litio se encuentra bien descrito en la literatura (Etude et al., 2024; Mohanty et al., 2021; Roy et al., 2021; Wei et al., 2023) y en general comprende cuatro etapas descarga, trituración, separación y refinamiento.

Etapas de descarga

Las celdas de las baterías se descargan para eliminar la energía residual que puede causar chispa, cortocircuito y situaciones de conato de incendio o explosión, los métodos de descarga incluyen descarga por inmersión en salmueras, descarga por conexión a circuitos externos, y aunque no es un proceso de descarga en el sentido estricto, también se han descrito procesos de inmersión en nitrógeno líquido como etapa previa al proceso de trituración, esto con el objetivo de evitar exposiciones o conatos de incendio o incendios durante la etapa de trituración.

Píldora informativa. SIEMPRE ten en cuenta las Mejores Prácticas Ambientales (MPA).

Todo proceso de clasificación, reacondicionamiento, remanufactura, transformación y en general de aprovechamiento de residuos debe tener en consideración las Mejores Prácticas Ambientales (MPA).

¿Qué son?

Las MPA son un conjunto de acciones que buscan reducir al máximo y, en el mejor de los casos, evitar por completo los impactos ambientales negativos asociados a un proceso.

¿Cómo se aplican?

Las MPA se deben aplicar a lo largo de todas las etapas de la gestión de residuos, incluidas las etapas previas a los procesos de aprovechamiento, como el transporte. En el caso de los residuos de baterías de iones de litio, estas prácticas deben ser aplicadas con especial atención durante los procesos de descarga en salmuera y trituración por la liberación de sustancias peligrosas en estas etapas.

- **MPA en etapa de descarga en salmuera:** La salmuera es una solución concentrada (20% – 30%) hecha con cloruro de sodio, cloruro de potasio o una mezcla de estas. Las reacciones químicas que se producen durante el proceso de descarga pueden generar mezclas complejas de compuestos orgánicos u óxidos metálicos que deben ser tratados en sistemas especializados de tratamiento de aguas residuales industriales de tal forma que se logre la reincorporación de la mayor cantidad posible de solución al proceso y se disminuya la disposición final de lodos.
- **MPA en etapa de trituración:** Durante la trituración de los residuos de baterías de iones de litio se liberan a la atmósfera los solventes y electrolitos volátiles que

contienen las baterías. Previo a su liberación a la atmósfera, deben ser tratados, capturados o condensados para su aprovechamiento o disposición final.

Tabla 13 ▼ Sustancias peligrosas presentes en las baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025)

Componente de la batería de iones de litio	Sustancia química	CAS	Pictogramas de peligro del SGA*
Solvente	Carbonato de etilo	96-49-1	
	Carbonato de dimetilo	616-38-6	
	Carbonato de dietilo	105-58-8	
Sales de litio (electrolito)	Hexafluorofosfato de litio (LiPF ₆)	21324-40-3	
	Tetrafluoroborato de litio (LiBF ₄)	14283-07-9	

* Para mayor información consultar Sistema Globalmente Armonizado - SGA.

Ten en cuenta también las Mejores Técnicas Disponibles (MTD)

¿Qué son?

Las MTD son el conjunto de tecnologías que, junto con el diseño, construcción y uso, permiten que el proceso sea el de menor impacto ambiental posible, determinado por los valores de los parámetros de contaminación (emisiones, vertimientos, etc.) que resultan del su funcionamiento.

Por mejores se entienden las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del ambiente en su conjunto.

Por disponibles se entiende las técnicas o tecnologías desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables.

¿Cómo se aplican? *

Para determinar el carácter general de una técnica, se deben tener en cuenta aspectos como:

- Uso de técnicas que produzcan pocos residuos.
- Uso de sustancias menos peligrosas.
- Desarrollo de técnicas de recuperación y reciclado de las sustancias del proceso.
- Procesos, instalaciones o método de funcionamiento comparable a uno previamente aprobado.

- Avances técnicos y evolución de conocimientos científicos.
- Carácter, efecto y volumen de las emisiones.
- Fecha de entrada en funcionamiento.
- Plazo que requiere la instauración de una MTD.
- Consumo y naturaleza de las materias primas.
- Prevenir o reducir al mínimo el impacto global de las emisiones.
- Prevenir o reducir al mínimo cualquier riesgo de accidente o reducir sus consecuencias para el medio ambiente.

*Adaptado de (Consejo de la Unión Europea, 1996)

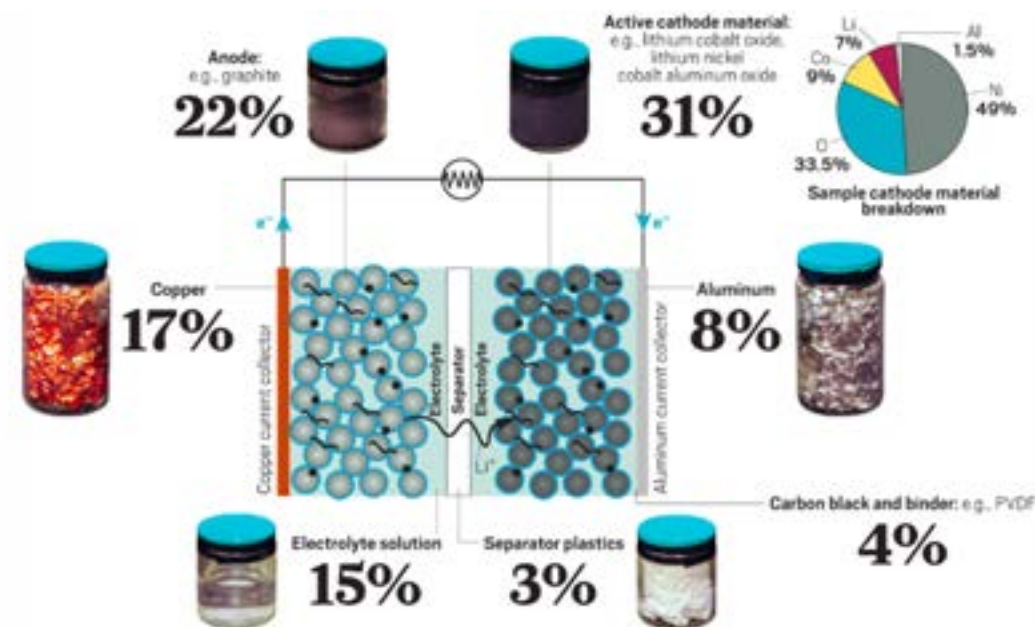
Etapa de despiece y trituración

En esta etapa, los residuos de baterías pueden ser una unidad vehicular o las celdas no aptas para el reacondicionamiento y la remanufactura. En el primer caso deben ser desensambladas para recuperar el cofre metálico que recubre la batería, los cables, los componentes electrónicos (BMS) y las celdas.

Actualmente, en Colombia los BMS no se reciclan, se clasifican para posterior exportación a plantas de aprovechamiento en Asia, Norteamérica o Europa.

Las celdas, para ser aprovechadas, deberán separarse según su química para ser procesadas por lotes. En la etapa de trituración se pasará por al menos un molino que, al final del proceso, entregará una mezcla heterogénea de chatarra ferrosa, láminas de aluminio, láminas de cobre, aislante plástico y masa negra que deberán ser llevados a los procesos de aprovechamiento (Figura 20).

Figura 20 ▼ Componentes internos de una batería de iones de litio. Fuente: Jacoby (2019)



Etapa de separación

La separación de los materiales resultantes de la trituración se realiza por métodos mecánicos y complementariamente por métodos químicos. Entre los métodos mecánicos, usualmente se encuentran, bandas de separación magnética, sistemas de separación por diferencia de tamaño, por ejemplo, tamices, y sistemas de separación por diferencia de densidad, como las mesas densimétricas (Figura 21). En conjunto, el acople de los métodos puede lograr una recuperación de materiales entre el 95 % y 99 % del peso de las celdas.

Una parte importante del proceso de trituración está relacionada con el manejo de los solventes o electrolitos, que son sustancias con características de peligrosidad, las cuales deben ser tenidas en cuenta para una adecuada y segura separación.

De los procesos de separación se obtendrán entre el 95% y el 99% de residuos para la comercialización y entre el 1% y el 5% de residuos para disposición final. De los residuos obtenidos es de especial interés la masa negra por su contenido de metales estratégicos como el litio, cobalto o níquel (dependiendo de la química). En este punto, la masa negra es una materia prima que alimentará procesos metalúrgicos para la recuperación de los metales.

Figura 21 ▼ Esquema general de una planta de aprovechamiento de baterías de iones de litio. Fuente: ELDANRECYCLING (s.f.)



Etapa metalúrgica

En esta etapa, los materiales separados son refinados para la obtención de materias primas como cobre, aluminio, níquel, cobalto y manganeso. En refinerías, ubicadas en Asia y Estados Unidos la masa negra es procesada por métodos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. En el primero los óxidos metálicos son recuperados por calcinación a temperaturas superiores a los 800-1000 °C, para obtener níquel, cobalto o manganeso metálico. Este proceso se caracteriza por un uso intensivo de energía y emisiones derivadas de los procesos de oxidación/reducción. En el proceso hidrometalúrgico, los metales son recuperados después de una serie de reacciones químicas que permiten la recuperación de los metales. Este proceso hace uso de reactivos como ácidos y aditivos para la lixiviación de los metales de interés y formación de compuestos intermedios. Finalmente, los metales son recuperados en purzas superiores al 98 %.

La calidad y, por lo tanto, la valorización de la masa negra estará relacionada directamente con el porcentaje de recuperación del(los) metal(es) y este a su vez dependerá de la adecuada clasificación de los residuos de baterías al ser procesadas, de aquí la importancia de una adecuada clasificación previa al proceso de aprovechamiento.

La masa negra deberá comercializarse dependiendo de su composición y del metal en específico que se pretende recuperar. Igualmente, debe ser clasificada bajo las subpartidas arancelarias que garanticen su correcta clasificación y manejo adecuado frente al movimiento transfronterizo de residuos peligrosos. A manera de referencia se presenta la Tabla 14 la cual muestra las subpartidas arancelarias que pueden ser utilizadas para la declaración de exportación de la masa negra.

Tabla 14 ▼ Subpartidas arancelarias para la comercialización de la masa negra*. Fuente: DIAN (2005)

Código	Designación de la mercancía
Capítulo 75. Níquel y sus manufacturas	
7503.00	Desperdicios y desechos, de níquel.
Capítulo 81. Los demás metales comunes; cermets; manufacturas de estas materias	
8105.30	Desperdicios y desechos (de cobalto)
8111.00.10	Manganeso en bruto; desperdicios y desechos; polvo
Capítulo 85. Máquinas, aparatos y material eléctrico, y sus partes; aparatos de grabación o reproducción de sonido, aparatos de grabación o reproducción de imagen y sonido en televisión, y las partes y accesorios de estos aparatos. Código 8549. Desperdicios y desechos, eléctricos y electrónicos	
8549.13	Clasificados por tipo de componente químico, que no contengan plomo, cadmio o mercurio (desperdicios o desechos)
8549.14	Sin clasificar, que no contengan plomo, cadmio o mercurio (desperdicios o desechos)
8549.19	Los demás (desperdicios o desechos)

*Teniendo en cuenta que la masa negra es considerada un residuo, se insta a no utilizar subpartidas arancelarias asociadas a productos tales como: 7501.10; 7501.20; 7504.00; 7508.90; 8105.20; 8105.90; 8111.00.90.

Respecto a las baterías de iones de litio al final de su vida, estas no figuran de manera explícita en los Anexos I o VIII del Convenio de Basilea; asimismo, no están clasificadas como residuos peligrosos en la normativa nacional de residuos peligrosos (Título 6 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente). Sin embargo, es probable que la mayoría de las baterías de iones de litio contengan uno o más componentes listados en el Anexo I del Convenio de Basilea (por ejemplo, el electrolito consiste en hexafluorofosfato Y32: compuestos inorgánicos de flúor excluido el fluoruro de calcio, o Y15: desechos de carácter explosivo no sujeto a otras legislaciones). Por lo anterior, dependiendo del tipo de batería y de los resultados de pruebas de caracterización de peligrosidad, algunos residuos de baterías de iones de litio pueden calificar como residuos peligrosos según la Convención de Basilea o la normativa nacional.

6. Manejo seguro de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos

En este capítulo se describen los aspectos de seguridad que deben considerarse para la gestión segura de los residuos de baterías de iones de litio provenientes de la movilidad eléctrica, las cuales también son aplicables a los residuos de baterías de iones de litio de otros RAEE.

Los residuos de baterías de iones de litio tienen componentes que en conjunto conforman el triángulo de fuego dado que tienen al menos un componente combustible, un componente que genera chispa o calor, y por descomposición química o presencia en el ambiente oxígeno para generar combustión.

Para minimizar los riesgos de explosión o incendio los residuos de pilas y baterías de litio se deben etiquetar al momento de recibirse garantizando que se cuente con al menos la siguiente información.

- Nombre del generador
- Identificación como residuo peligroso
- Cantidad (kg o unidades)
- Pictogramas del sistema globalmente armonizado (peligros físicos, peligros para la salud humana, peligros para el medio ambiente)

Si bien las pilas y baterías de iones de litio son estables en condiciones normales de almacenamiento y transporte, los residuos de estas pilas y baterías pueden presentar cambios fisicoquímicos que eleven la probabilidad de materializar el riesgo de explosión. En este sentido se pueden clasificar los residuos de pilas y baterías de iones de litio nuevas o usadas, defectuosas, severamente dañadas o baterías para reciclaje. La Tabla 15 muestra en detalle las características de esta clasificación.

Tabla 15 Categorización de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025)

Categoría	Color	Detalle	Ejemplo	Peligro
Nuevas o usadas	Verde	Baterías que se encuentran en buen estado sin desprendimiento de calor, olor, lixiviado o inflamadas.	Baterías descartadas por defectos de fábrica que no comprometen la estabilidad de la batería. Baterías que han llegado al fin de su ciclo de vida. Baterías levemente deformadas	Baja probabilidad de explosión, incendio o reacciones violentas.
Defectuosas	Amarillo	Baterías levemente inflamadas, pueden generar algún tipo de calor sin ser excesivo, no generan olor o lixiviados.	Baterías que presentan daños mecánicos o físicos. Baterías descartadas por defectos de fábrica que comprometen la estabilidad de la batería.	Baja probabilidad de explosión, incendio o reacciones violentas. Estas baterías pueden deteriorarse con el paso del tiempo y pasar a la categoría roja
Severamente dañadas	Rojo	Baterías con claros y graves daños mecánicos, deformadas o inflamadas o con desprendimiento de calor, olor o lixiviados	Baterías que presentan desprendimiento de gases o calor excesivo. Baterías que presentan reacciones violentas. Baterías con daños mecánicos graves	Alta probabilidad de explosión o incendio o de reacciones violentas y espontáneas.

Como aspectos comunes de todas las categorías el empaque y embalaje de los residuos de baterías de iones de litio se debe procurar que los contactos eléctricos, bornes o terminales se encuentren cubiertos con cinta o material aislante, para evitar la generación de chispa por corto circuito. Las baterías de vehículos eléctricos por su tamaño y peso deben ser empacadas en contenedores unitarios ignífugos y aptos para la contención de posibles lixiviados. Los empaques y embalajes preferidos son: cajas de madera o cartón con recubrimiento plástico, cajas, guacales o canastas de madera o plásticas o de cartón estructural siempre y cuando soporten adecuadamente el peso de las baterías.

Para el transporte de residuos de baterías de iones de litio debe seguirse lo establecido en el decreto 1079 de 2015 frente al transporte de mercancías peligrosas, los vehículos que transporten este tipo de residuos deberán estar claramente etiquetados con el código de las naciones unidad UN 3480 y el rombo de clasificación 9 (Figura 22).

Figura 22 Etiquetas de los vehículos que transportan residuos de baterías de iones de litio. Fuente: U.S. Department of Transportation (2024)



En la Tabla 16 se describen las consideraciones generales para el transporte de residuos de baterías de iones de litio

Tabla 16 Consideraciones para el transporte de residuos de baterías de iones de litio. Fuente: Elaboración propia (2025)

Categoría	Transporte	Precauciones	Observación
Nuevas o usadas	Si	Apilar con precaución. Asegurarse de que las baterías no entren en contacto con otras baterías, con superficies conductoras o con objetos de metal. Manipular con precaución durante la carga y descarga	Es recomendable incluir los residuos de pilas y baterías de litio en el plan de contingencias o gestión del riesgo para la preparación para emergencias que involucren este residuo. Nivel de alerta. verde: Continuar con las actividades con normalidad.
Defectuosa	Si con precauciones	Apilar con precaución: El peso de las baterías superiores puede romper las baterías inferiores y generar una reacción en cadena. Manipular con precaución durante la carga y descarga.	Es recomendable incluir los residuos de pilas y baterías de litio en el plan de contingencias o gestión del riesgo para la preparación para emergencias que involucren este residuo. Nivel de alerta. Amarillo: Atención a los cambios preparación para la atención de la emergencia.

Categoría	Transporte	Precauciones	Observación
Severamente dañadas	Si con altas precauciones	<p>No apilar.</p> <p>No transportar con otros elementos incompatibles.</p> <p>Evitar calor excesivo durante el transporte > 40 °C.</p> <p>Manipular con precaución durante la carga y descarga</p>	<p>Es recomendable incluir los residuos de pilas y baterías de litio en el plan de contingencias o gestión del riesgo para la preparación para emergencias que involucren este residuo.</p> <p>Nivel de alerta. rojo: Preparados para la atención de la emergencia.</p>

El almacenamiento de los residuos de pilas y baterías de iones de litio debe hacerse teniendo en cuenta los residuos de los cuales debe estar alejado, separado o aislado de acuerdo con la matriz de compatibilidad, en su respectivo embalaje y etiqueta visible. Algunos ejemplos de incompatibilidad son combustibles, solventes o agentes comburentes. Si las baterías son almacenadas por periodos de tiempo prolongados es recomendable hacer un plan de monitoreo y seguimiento con el objetivo de identificar de forma temprana cambios en el estado de estas, lo cual debe llevar a una recategorización.

Píldora informativa. ¿Qué hacer con mi batería de iones de litio cuando se convierte en residuo?



1 Identifico los peligros y gestiono los riesgos de la batería
 Las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos representan peligros que pueden afectar la salud y el ambiente, como lo son la liberación de vapores y humos tóxicos, sobrecalentamiento, incendios o explosiones.



2 Manipulo con cuidado la batería
 Evitar sobrecargas eléctricas, perforaciones o rompimiento de la batería. Si va a manipular la batería evite hacerlo en lugares cerrados o confinados. Si va almacenar temporalmente la batería hágalo alejado de fuentes de calor y de productos inflamables y combustibles (solventes, gasolina, ACPM, madera, papel, cartón, etc.).



3 No dispongo las baterías con los residuos ordinarios
 Las baterías descartadas de los vehículos eléctricos no se pueden disponer en rellenos sanitarios por los riesgos que representa para la salud de las personas y el ambiente.



4 Dispongo en un lugar adecuado
 Colombia cuenta con Sistemas de Recolección y Gestión encargados de gestionar y reciclar adecuadamente las baterías de iones de litio descartadas. Contáctalos a través de tu distribuidor (almacén de venta, tienda de repuestos, concesionario, taller, serviteca, etc.) o consulta la información de los programas aprobados por la ANLA en:
<https://www.anla.gov.co/metarep/estrategia-rep>



5 Segunda vida y reciclaje
 Los Sistemas de Recolección y Gestión cuentan con gestores que darán una segunda vida a las baterías y finalmente harán el reciclaje de los materiales que la componen.

Esto nos hará un país más sostenible.

Bibliografía

Acc Automotive Cells Co (2022). Battery Cell, Module or Pack. What's the difference?. https://www-acc--emotion-com.translate.goog/stories/battery-cell-module-or-pack-whats-difference-infographics?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge

Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2024). Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en América Latina y el Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales. <https://publications.iadb.org/es/reciclaje-y-reuso-de-baterias-de-litio-en-america-latina-y-el-caribe-revision-analitica-de>.

Basia, A., Simeu-Abazi, Z., Gascard, E., & Zwolinski, P. (2021). Review on State of Health estimation methodologies for lithium-ion batteries in the context of circular economy. En CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (Vol. 32, pp. 517–528). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.02.004>.

Baterías y Amperios soluciones en baterías (s.f.). Tipos de celdas de baterías de Litio. <https://bateriasyamperios.com/tipos-de-celdas-de-baterias-de-litio/>.

Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2024). Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en América Latina y el Caribe - Revisión analítica de prácticas globales y regionales. <https://residuoselectronicosal.org/wp-content/uploads/2024/03/Reciclaje-y-reuso-de-baterias-de-litio-en-America-Latina-y-el-Caribe-revision-analitica-de-practicas-globales-y-regionales.pdf>.

CICenergiGUNE (2021). Reciclaje de baterías de iones de litio: el camino hacia una transición energética sostenible. <https://cicenergigune.com/es/blog/reciclaje-baterias-iones-litio-transicion-energetica-sostenible>.

Coches.net (2022). ¿Qué tipos de baterías para coches eléctricos existen?. <https://www.coches.net/blog-profesionales/que-tipos-de-baterias-para-coches-electricos-existen/>.

Congreso de Colombia (2013). Ley 1672 de 2013. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1672-2013.pdf>.

Congreso de Colombia (2019a). Ley 1964 de 2019. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=85510>.

Congreso de Colombia (2019b). Ley 1972 de 2019. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>.

Consejo de la Unión Europea (1996). Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:31996L0061>.

Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales – DIAN (2005). Consulta por estructura arancelaria. <https://muisca.dian.gov.co/WebArancel/DefConsultaEstructuraArancelaria.faces#>.

ELDANRECYCLING (s.f.). ELDAN TOWER: A Revolutionary Solution for Lithium-Ion Battery Recycling. <https://www.eldan-recycling.com/lithium-and-li-ion-batteries-recycling/>.

Etude, M. C., Ikeuba, A. I., Njoku, C. N., Yakubu, E., Uzoma, H. C., Mgbemere, C. E., & Udunwa, D. I. (2024). Recycling lithium-ion batteries: A review of current status and future directions. Sustainable Chemistry One World, 4, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100027>.

Etxandi-Santolaya, M., Canals Casals, L., & Corchero, C. (2024). Extending the electric vehicle battery first life: Performance beyond the current end of life threshold. Heliyon, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26066>.

Fan, T., Liang, W., Guo, W., Feng, T. & Li, W. (2023). Life cycle assessment of electric vehicles' lithium-ion batteries reused for energy storage. Journal of Energy Storage, vol. 71. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108126>.

Fenalco & ANDI (2024). Boletín vehículos eléctricos e híbridos Julio de 2024. <https://drive.google.com/file/d/1J3057im3P0bwsr4D3vwqXPaAQQGi0P8/view>.

Flux Power (2021). How To Read A Lithium-ion Battery Data Plate. <https://www.fluxpower.com/blog/how-to-read-a-lithium-ion-battery-data-plate>.

Georgia State University (2017). HyperPhysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>.

Huang, C., Lipatnikov, A., Löfström, C., Smajovic, N., Andersson, L., & Ismail, A. (2024). Experimental investigation of dust explosions with a focus on black mass in battery recycling. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105526>.

Jacoby, M. (2019). It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries. Energy Storage. <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>

Liu, C., Neale, Z.G., Cao, G (2016). Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. Materials Today, volumen 19, páginas 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.009>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2015). Decreto 1076 de 2015. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2017). Política nacional para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica_RAEE.pdf.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2018). Decreto 284 de 2018. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/decreto-284-de-2018/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2022a). Resolución 851 de 2022. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/Resolucion-0851-de-2022.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente (2022b). Resolución 762 de 2022. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/09/Resolucion-762-de-2022.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente y Ministerio de Comercio Industria y Turismo - MinComercio (2019). Estrategia nacional de economía circular. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Estrategia-Nacional-de-Economia-Circular-2019-Final.pdf>.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT (2005). Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/POLITICA+AMBIENTAL+PARA+LA+GESTION+INTEGRAL+DE+RESPEL.pdf/fb42059d-77ec-423b-8306-960dee6bb9c6>.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT (2009). Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Guia_RAEE_MADS_2011-reducida.pdf.

Ministerio de Transporte – MinTransporte (s.f.). Movilidad ambientalmente sostenible. <https://especiales.mintransporte.gov.co/SemanaMovilidadCO/movilidad-ambientalmente-sostenible.php#:~:text=La%20movilidad%20ambientalmente%20sostenible%20busca,la>.

MIT Electric Vehicle Team (2008). A Guide to Understanding Battery Specifications. https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.

Mohanty, A., Sahu, S., Sukla, L. B., & Devi, N. (2021). Application of various processes to recycle lithium-ion batteries (LIBs): A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1203–1212. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.645>.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2023). Reglamento (UE) 2023/1542 de 12 de julio de 2023, relativo a las pilas y baterías y sus residuos y por el que se modifican la Directiva 2008/98/CE y el Reglamento (UE) 2019/1020 y se deroga la Directiva 2006/66/CE. https://eur-lex-europa-eu.translate.google/eli/reg/2023/1542/oj/eng?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.

Pesaran, A., Roman L., & Kincaide, J. (2023). Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Life Cycle Management. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5700-84520. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84520.pdf>.

Roy, J. J., Cao, B., & Madhavi, S. (2021). A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach. In *Chemosphere* (Vol. 282). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130944>.

Ruiz, V. (2018). Standards for the performance and durability assessment of electric vehicle batteries - Possible performance criteria for an Ecodesign Regulation, EUR 29371 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-94179-5, doi:10.2760/24743, JRC113420.

Secretaria Distrital de Movilidad – SDM (2021). Resolución 93495 de 2021. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=117161>.

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá – SDA (2024). Guía sobre la gestión adecuada de las baterías de litio. https://www.ambientebogota.gov.co/todas-las-investigaciones/-/asset_publisher/pibvwzUnZiNr/document/id/6874710.

Schomburg, F., Heidrich, B., Wennemar, S., Drees, R., Roth, T., Kurrat, M., Heimes, H., Jossen, A., Winter, M., Cheong, J. Y., & Röder, F. (2024). Lithium-ion battery cell formation: status and future directions towards a knowledge-based process design. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 17, Número 8, pp. 2686–2733). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3ee03559j>.

Solving the E-Waste Problem – StEP (2009). One Global Understanding of Re-Use - Common Definitions. https://www.step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_TF3_WPCommonDefinitions.pdf.

United Nations Environment Programme - UNEP (2023). Technical guidelines on transboundary movements of electrical and electronic waste and used electrical and electronic equipment, in particular regarding the distinction between waste and non-waste under the Basel Convention. UNEP/CHW.16/INF/10/Rev.1, 3 July 2023, Original: English. <https://www.basel.int/Implementation/TechnicalMatters/DevelopmentofTechnicalGuidelines/TechnicalGuidelines/tabid/8025/Default.aspx>.

Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME (2018). Resolución 00463 de 2018. <https://www1.upme.gov.co/Normatividad/463-2018.pdf>.

U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (2024). Guía de respuesta en caso de emergencia 2024. <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-04/GRE2024-Spa-Web-a.pdf>.

Wei, Q., Wu, Y., Li, S., Chen, R., Ding, J., & Zhang, C. (2023). Spent lithium ion battery (LIB) recycle from electric vehicles: A mini-review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 866). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161380>.

Woeste, R., Drude, E. S., Vrucak, D., Klöckner, K., Rombach, E., Letmathe, P., & Friedrich, B. (2024). A techno-economic assessment of two recycling processes for black mass from end-of-life lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122921>.

