



# Gestión de baterías usadas de ion-Litio en Colombia

Lineamientos técnicos

Federico Werner, Carlos Hernández, Mathias Schlupe  
Febrero 2025

## Resumen ejecutivo

Las baterías de ion-litio (LIB) desempeñan un papel central en la transición energética y la movilidad sostenible, con una adopción creciente en sectores como el almacenamiento de energía renovable y el transporte eléctrico. Sin embargo, su gestión al final de la vida útil plantea importantes desafíos ambientales, técnicos y económicos, relacionados con la recuperación de materiales críticos, aspectos de seguridad en su manipulación y la consolidación de cadenas de valor para su reutilización y reciclaje.

En Colombia, el uso de LIB ha crecido inicialmente en el sector de aparatos eléctricos y electrónicos, y se espera un crecimiento de magnitud en su uso para la movilidad y el almacenamiento de energía. Aunque el país cuenta con una red establecida de recolección y procesamiento de baterías, la capacidad actual no será suficiente para gestionar el incremento proyectado en los volúmenes de baterías usadas.

Ante esta situación, el programa global Go Circular de la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo Internacional (GIZ) ha propuesto su colaboración para impulsar capacidades colombianas en materia de gestión de baterías de ion-litio usadas (ULIB). La iniciativa se compone de dos medidas principales: la recopilación de información sobre aspectos técnicos de la gestión de ULIB, con foco en la reutilización y el reciclaje, y el diseño de una estrategia intersectorial en la que se defina, en un proceso colaborativo con los actores relevantes, el camino a seguir para el impulso de la actividad.

En estos lineamientos técnicos se presenta la recopilación de información existente a nivel internacional sobre el estado del arte en materia de gestión de

ULIB, que pueda ser aplicable al contexto colombiano. Su propósito es dar soporte a la elaboración de la estrategia, y contribuir a la definición de políticas nacionales y subnacionales en la materia. En consecuencia, Está orientado a todos los actores de la cadena de valor de las LIB, desde comercializadores de productos que contienen LIB, hasta gestores de ULIB y autoridades.

En cuanto al contenido, el informe incluye una introducción a las principales características de las LIB, su ciclo de vida y enfoques óptimos para su gestión (capítulos 1 y 2). Luego se detallan los aspectos técnicos de la gestión de ULIB, comenzando por las estrategias para recolección y transporte de las ULIB (cap. 3); el diagnóstico y reacondicionamiento, incluyendo metodologías para evaluar el estado de salud (SoH) de las ULIB y su potencial de segunda vida en nuevas aplicaciones (cap. 4); las rutas tecnológicas para el reciclaje, comparando la eficacia y sostenibilidad de distintos procesos de recuperación de materiales (cap. 5); y los aspectos de seguridad, considerando los riesgos de inflamabilidad, explosión y exposición a sustancias peligrosas en cada etapa de la gestión (cap. 6).

La información documental recolectada y las observaciones recogidas en terreno durante las visitas realizadas a actores clave de la gestión de ULIB en Colombia, como así también las actividades de preparación de la estrategia, permiten una identificación preliminar de los desafíos específicos que enfrenta el sector en relación a la complejidad técnica de los procesos descritos. Estos desafíos se presentan en el capítulo 7, y se refieren, entre otros, a la necesidad de fortalecer la infraestructura de recolección y procesamiento, mejorar la trazabilidad de las baterías, armonizar regulaciones con estándares internacionales y generar incentivos económicos para la reutilización y el reciclaje.

## Contenido

Resumen ejecutivo.....	2
Contenido.....	3
Abreviaturas.....	5
Glosario.....	6
<b>1. Introducción.....</b>	<b>7</b>
1.1 Contexto general.....	7
1.2 Descripción del proyecto y objetivo.....	8
1.3 Alcance y metodología.....	8
<b>2. Conceptos básicos sobre baterías de ion-litio.....</b>	<b>9</b>
2.1 Descripción, principales tipos y ventajas.....	9
2.2 Ciclo de vida de la batería.....	13
2.3 Gestión de LIB usadas: objetivos y esquema óptimos.....	16
<b>3. Recolección y transporte.....</b>	<b>17</b>
3.1 Recolección.....	17
3.1.1 Criterios para el diseño de un sistema de recolección de ULIB.....	18
3.1.2 Principales modalidades de sistemas de recolección.....	18
3.2 Transporte.....	19
<b>4. Diagnóstico, reacondicionamiento y reutilización.....</b>	<b>19</b>
4.1 Inspección y diagnóstico.....	20
4.2 Clasificación y reacondicionamiento.....	22
4.3 Asignación de segunda vida.....	23
4.4 Lineamientos técnicos y normativos.....	23
4.4.1 Estándares técnicos.....	24
4.4.2 Normativa.....	24
<b>5. Reciclaje de ULIB.....</b>	<b>25</b>
5.1 Procesos de reciclaje de ULIB.....	25
5.1.1 Pre-tratamiento.....	26
5.1.2 Procesos mecánicos.....	27
5.1.3 Procesos pirometalúrgicos.....	28
5.1.4 Procesos hidrometalúrgicos.....	29

5.1.5 Otros procesos de reciclaje.....	30
5.2 Comparación entre los diferentes procesos.....	31
5.3 Lineamientos técnicos y normativos.....	33
5.3.1 Estándares técnicos.....	33
5.3.2 Normativa.....	33
<b>6. Aspectos de seguridad en la gestión de ULIB.....</b>	<b>35</b>
6.1 Caracterización de los riesgos de las LIB.....	35
6.2 Normativa en materia de seguridad para ULIB.....	37
6.2.1 Regulaciones internacionales.....	37
6.2.2 Regulaciones regionales y nacionales.....	39
6.2.3 Directrices específicas de la industria.....	40
6.3. Medidas de prevención de riesgos.....	40
6.3.1 Recolección y transporte.....	40
6.3.2 Embalaje.....	41
6.3.3 Almacenamiento.....	41
6.3.4 Reciclaje.....	42
6.4 Gestión de incidentes producidos por LIB y ULIB.....	42
<b>7. Discusión.....</b>	<b>43</b>
<b>8. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo 1: Recopilación de estándares técnicos internacionales.....</b>	<b>50</b>

## Abreviaturas

Nota: Las abreviaturas de algunos términos se han mantenido iguales a las de su expresión equivalente en idioma inglés, con el propósito de facilitar la accesibilidad y comparabilidad con la literatura internacional.

<b>ANSI</b>	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute)
<b>BEV</b>	Batería de ion-litio de un vehículo eléctrico
<b>BMS</b>	Sistema de gestión de la batería (battery management system)
<b>CAM</b>	Materiales activos del cátodo (cathode active metals)
<b>EE.UU.</b>	Estados Unidos de América
<b>EIS</b>	Espectroscopía de impedancia electroquímica
<b>EuL</b>	Final de vida (end of life)
<b>ESS</b>	Sistema de almacenamiento de energía (Energy storage system)
<b>EV</b>	Vehículo eléctrico (electric vehicle)
<b>IEA</b>	Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency)
<b>IEC</b>	Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)
<b>GIZ</b>	Agencia Alemana de Cooperación Internacional (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)
<b>LAB</b>	Baterías de plomo-ácido (lead-acid battery)
<b>LIB</b>	Baterías de ion-litio (lithium-ion battery)
<b>NTC</b>	Norma Técnica Colombiana
<b>OEM</b>	Fabricante original del equipo (original equipment manufacturer)
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>RAEE</b>	Residuos de aparatos eléctrico y electrónicos
<b>RE</b>	Energía renovable (renewable energy)
<b>REP</b>	Responsabilidad extendida del productor
<b>SOH</b>	Estado de salud de la batería (state of health)
<b>SRyG</b>	Sistema de recolección y gestión de RAEE
<b>UE</b>	Unión Europea
<b>ULIB</b>	Baterías usadas de ion-litio (used lithium-ion battery)

## Glosario

Nota: se incluyen aquí términos específicos de la gestión de ULIB que se prestan a interpretaciones diferentes en otros contextos.

**Batería primaria:** son las baterías que no admiten la recarga, por lo que deben ser desechadas luego de un uso único [1].

**Batería secundaria:** aquella que admite su recarga, posibilitando un uso continuo [1].

**Masa negra:** producto intermedio que se obtiene en el proceso de reciclaje de las LIB, compuesto principalmente por los materiales del cátodo y del ánodo. Su color negro se debe al contenido de grafito, que se usa habitualmente en el ánodo [2].

**Primera vida:** ver uso primario.

**Reacondicionamiento:** procedimiento para recuperar la funcionalidad de una ULIB luego de su primer uso. En general, incluye su reparación y eventual sustitución de componentes, pero no una alteración de la composición química de la batería [3].

**Reciclaje:** proceso de recuperación de los materiales de un producto o dispositivo para su reuso como insumo de otros productos. Por definición, involucra el desmantelamiento y separación de los materiales que componen al producto [3].

**Reconversión:** asignación de una segunda vida a un producto, en una aplicación diferente a la de diseño [4].

**Reuso:** asignación de una segunda vida a un producto que todavía presenta condiciones adecuadas de funcionamiento. Para las LIB, que presentan inevitablemente un proceso de degradación, el reuso suele ocurrir en una aplicación diferente, menos exigente, a la de diseño [5].

**Reutilización:** asignación de una segunda vida a un producto que por su estado de deterioro o degradación, ha requerido de una intervención de reacondicionamiento [3].

**Segunda vida:** ver uso secundario.

**Sistema de gestión de la batería:** El BMS (battery management system) es un dispositivo electrónico que monitorea el estado de carga, temperatura y voltaje de una batería, protegiéndola de condiciones de operación adversas y maximizando su vida útil [5].

**Uso primario:** uso o aplicación principal que desempeña el producto o dispositivo según su configuración de diseño [1].

**Uso secundario:** uso extendido del producto o dispositivo al finalizar su uso primario, luego de una verificación de su funcionalidad. El uso extendido puede ser para la misma aplicación (ver reuso) o para una aplicación diferente (ver reconversión) [1].

## 1. Introducción

### 1.1 Contexto general

Las baterías son una tecnología clave para el aprovechamiento eficiente de la energía eléctrica, ya que posibilitan un acceso flexible y en especial portable a ella. Desde la década de 2010, el mercado global de baterías ha crecido a tasas anuales promedio superiores al 30%, impulsado por la adopción a gran escala de las baterías de ion-litio (LIB) [6]. Si bien estas presentaban inicialmente un mayor costo, sus mejores prestaciones y eficacia han favorecido su prevalencia sobre otras tecnologías preexistentes como las de plomo ácido (LAB) para aplicaciones emergentes. Inicialmente, las LIB fueron adoptadas masivamente para dispositivos electrónicos portátiles, como computadoras y teléfonos celulares. A su vez, el incremento de su producción resultó en precios decrecientes, favoreciendo su adopción en otras aplicaciones. Más recientemente, los vehículos eléctricos (EV) y los sistemas de generación de energía renovable (RE), que requieren baterías para amortiguar los flujos intermitentes de energía, han impulsado aún más la demanda de este tipo de baterías [7]. Se prevé que la expansión prevista del uso de EV, como componente central de las políticas de transición energética prevalentes en el mundo, impulsará aún más la adopción de LIB [7].

Además de la ventaja de la portabilidad para los dispositivos de uso cotidiano, el uso de baterías en la movilidad y como parte de sistemas de RE, genera el impacto ambiental positivo de eliminar la necesidad de usar combustibles fósiles, lo que resulta en una menor emisión de gases contaminantes y con efecto invernadero. Sin embargo, estos efectos positivos pueden verse reducidos si las baterías no son gestionadas adecuadamente al final de su vida útil, ya que para su fabricación se usan sustancias que pueden afectar negativamente el ambiente. El necesario planteo de un sistema de recolección, reutilización,

reciclaje y disposición final, conlleva además considerar aspectos de seguridad, ya que las LIB presentan riesgos de explosión e incendio.

Asimismo, existen desafíos relacionados con el abastecimiento de los recursos requeridos para la fabricación de LIB. En particular para el litio y el cobalto, se prevé un crecimiento sustancial de la demanda, cuando en la actualidad ya existen restricciones sustanciales que plantean riesgos para el suministro derivadas de la concentración geográfica de la producción en un reducido número de países. Puntualmente para el caso del litio, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) estima que la demanda del metal casi se quintuplicará hacia 2030, partiendo de una demanda de 92 kton en 2023; y se multiplicará por 13 hacia 2040 [8]. El litio producido globalmente posee diversas aplicaciones, pero entre ellas, la producción de baterías es la que absorbe la mayor parte de la oferta, con un marcado ascenso en la última década [9].

En este contexto, es importante la adopción de medidas destinadas a la recolección de las LIB al finalizar su vida útil, para posibilitar el reciclaje y la reutilización de sus componentes. Esto permitirá un proceso más eficiente de adopción de esta tecnología, aliviando la necesidad de mayor extracción de recursos [10]. El concepto de economía circular, que promueve la satisfacción de las necesidades con los materiales que ya se encuentran en uso, brinda el marco teórico y político para la implementación de estas medidas [6].

En Colombia, el uso de LIB se encuentra muy extendido, asociado principalmente al consumo de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE). El uso de LIB en la movilidad es todavía mucho menor en volumen, aunque las medidas implementadas por las autoridades para promover la transición energética tanto

a nivel nacional como subnacional, se proyecta que resultarán en un incremento significativo en el uso de EV. Se espera también un incremento en el uso de LIB como parte de sistemas estacionarios de almacenamiento de energía (ESS). Los ESS solucionan el abastecimiento de pequeñas demandas aisladas de la red pública, como ser antenas de transmisión de datos o pequeños poblados de zonas rurales. Ante la consolidación de la tecnología de LIB para el almacenamiento energético, estos sistemas adoptan cada vez más el uso de LIB en reemplazo de otras tecnologías de baterías. Además, el impulso a la adopción de RE, independientemente de la ubicación, acarrea un crecimiento en la demanda de ESS [7].

El crecimiento de la electrificación, garantizado por las políticas públicas en curso, ofrece además oportunidades económicas que deben ser aprovechadas por el país mediante una integración estratégica en la cadena de valor de las baterías. Tanto la recuperación de los materiales que las componen, su reciclaje y demás etapas de gestión ofrecen la oportunidad para impulsar el desarrollo económico y tecnológico del país [11].

Inicialmente como parte del ordenamiento de la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), las autoridades han enfrentado el creciente uso de LIB instrumentando numerosas políticas para dar una adecuada gestión a las mismas. Como resultado de estas tempranas medidas, Colombia cuenta actualmente con una sólida red de recolección de baterías (tanto LIB como de otros tipos) y de empresas dedicadas a su tratamiento, reciclaje y disposición final. Aun así, ante la situación descrita de incremento esperado en el uso de LIB para la movilidad y otras aplicaciones, se prevé que las capacidades de captación, tratamiento y reciclaje deberán ser incrementadas sustancialmente [5].

## 1.2 Descripción del proyecto y objetivo

El presente documento surge como parte de una iniciativa de la Agencia de Cooperación Alemana para

el Desarrollo Internacional (GIZ) en el marco del programa global Go Circular para colaborar en el impulso de las capacidades colombianas en materia de gestión de baterías de ion-litio usadas (ULIB), ante el escenario descrito de un incremento en los volúmenes generados de éstas.

El objetivo del proyecto es proveer apoyo a los principales actores relacionados con la gestión de ULIB en el país, es especial a las entidades ya abocadas a la materia, como son los SRYG y empresas gestoras, generado las condiciones que permitan incrementar la capacidad operativa del sector. Para ello, la iniciativa plantea dos medidas: la creación de un documento de soporte en aspectos técnicos (éste documento), y el diseño de una estrategia intersectorial, a ser co-creada con los diferentes actores del sector de la gestión de ULIB en Colombia, convocados abiertamente para tal fin.

## 1.3 Alcance y metodología

El objetivo del documento es reunir información existente a nivel internacional sobre el estado del arte en materia de gestión de ULIB, que pueda ser aplicable al contexto colombiano y enriquecer así la discusión para la definición de políticas nacionales y subnacionales en la materia. Está orientado a todos los actores de la cadena de valor de las LIB, desde comercializadores de productos que contienen LIB, hasta gestores de ULIB y autoridades.

El alcance temático hace foco en los aspectos técnicos del reuso y reciclaje de ULIBs y está distribuido de la siguiente forma: el capítulo 2 presenta a modo introductorio una descripción general de las LIB y de las estrategias para su gestión material. Los capítulos 3 a 6, el núcleo de este documento, presentan una síntesis de los lineamientos técnicos vigentes internacionalmente para las diferentes etapas de gestión de ULIB: recolección y transporte (cap. 3), diagnóstico, reacondicionamiento y reutilización (cap. 4), reciclaje (cap. 5) y aspectos de seguridad aplicables a todas las etapas (cap. 6). La creciente diversidad de tecnologías y aplicaciones de las LIB pueden dificultar una

aproximación unificada a su gestión. Este trabajo se ha guiado por la premisa de cubrir todos los tipos de LIB, e indicar las diferencias correspondientes para cada tipo de batería a lo largo de cada temática abarcada. Sin embargo, al estar la expectativa de crecimiento concentrada en los sectores de movilidad y almacenamiento estacionario, los capítulos de reuso y reciclaje fueron enfocados en ese tipo de baterías.

El documento ha sido elaborado mediante una revisión de literatura científica y gris a nivel internacional, latinoamericano y colombiano.

La cobertura temática ha sido nutrida y ajustada a partir de diversas actividades realizadas por los autores en el terreno en Colombia:

- **Visitas técnicas** a instalaciones de gestión de baterías usadas en las ciudades de Bogotá, Cali y Medellín, y a los laboratorios de la Universidad de Antioquía, en junio de 2024.

## 2. Conceptos básicos sobre baterías de ion-litio

### 2.1 Descripción, principales tipos y ventajas

Entre las diferentes tecnologías disponibles de almacenamiento de energía eléctrica, las LIB cuentan con características de rendimiento y eficiencia que, a pesar de su costo comparativamente mayor, las posicionan como la solución más atractiva para una gran variedad de aplicaciones, desde los AEE hasta vehículos de transporte de personas y mercancías, y almacenamiento de energía renovable a pequeña escala. Dichas características son [12], [13]:

- **alta densidad energética:** buena capacidad de almacenamiento de energía en un volumen escaso de batería, por lo que ofrecen un buen desempeño con un equipo liviano.

- **Reunión de lanzamiento** del proyecto, realizada en Bogotá el 6 de junio de 2024. En la reunión participaron 19 representantes de entidades relacionadas con la gestión de baterías de litio usadas: autoridades nacionales y locales, empresas recicladoras, sistemas de recolección y gestión, empresas comercializadoras de vehículos eléctricos y asociaciones empresariales.

A partir de la información documental recolectada y las observaciones recogidas en terreno durante las visitas, como así también las actividades de preparación de la estrategia, se plantean además una serie de desafíos técnicos y de gestión que se presentan en el manejo de ULIB en Colombia.

El documento de la estrategia, que forma parte de este trabajo y debe ser leído en conjunto, concentra la información colectada sobre la situación colombiana en materia de gestión de ULIB.

- **bajo efecto memoria:** el régimen de uso prácticamente no afecta la capacidad de recarga de la batería, en comparación con otros tipos de baterías.
- **baja tasa de autodescarga:** una vez recargada, la batería no pierde carga aun cuando no sea usada.
- **vida útil prolongada:** soportan un alto número de ciclos de descarga y recarga sin presentar desgaste.
- **alta eficiencia de carga y descarga:** escasa pérdida de energía durante el proceso.

La unidad mínima funcional de una LIB se denomina celda (Figura 1). Cada celda está compuesta de cinco elementos principales, dispuestos en capas laminadas [14]:

- **Cátodo:** electrodo positivo. Fabricado a partir de combinaciones de óxidos de litio y diferentes metales que determinan la capacidad y estabilidad de la batería y se conocen también como materiales activos del cátodo (CAM). Los CAM suelen estar suplementados con una sustancia aglutinante (o binder) por motivos estructurales.
- **Ánodo:** electrodo negativo, compuesto habitualmente de grafito.
- **Electrolito:** es el medio conductor iónico a través del cual fluyen los iones de litio entre los electrodos. Puede ser líquido o sólido. Los más

- comunes en las LIB son soluciones de sales de litio en solventes orgánicos o polímeros.
- **Separador:** capa sólida que cumple la función estructural de mantener separados los electrodos para evitar un cortocircuito. Es porosa, para permitir el flujo de electrolito (y de iones de litio) entre los electrodos.
- **Conectores:** son capas metálicas de conducción que permiten el flujo de energía desde y hacia los electrodos. Para el cátodo se suele utilizar aluminio y para el ánodo cobre.

El conjunto está contenido en una carcasa rígida, habitualmente de acero inoxidable, la cual, además de una función aisladora, suele dar soporte estructural a la batería y cumplir funciones de disipación de calor. También existen contenedores de otros materiales (p.ej. plástico), y otros no rígidos, en forma de bolsa.

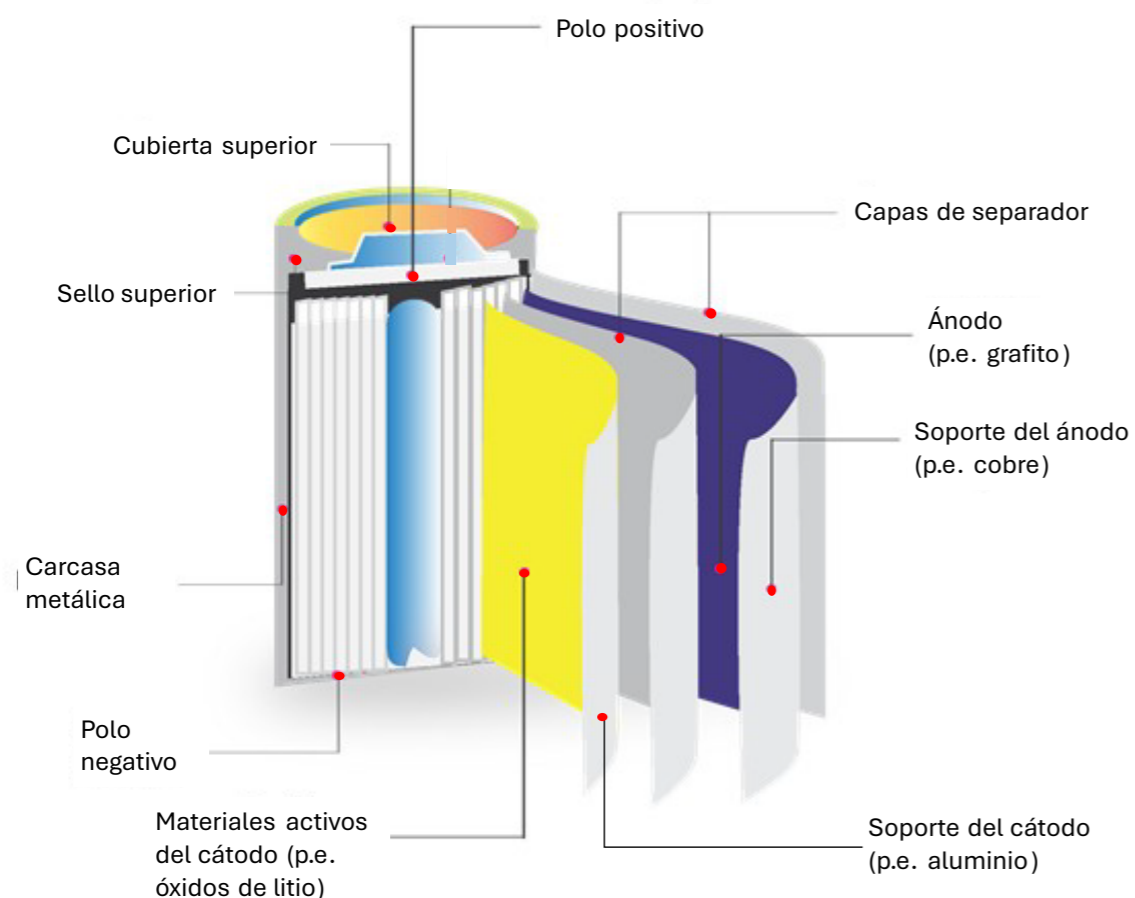


Figura 1: Estructura típica de una celda de LIB (adaptado a partir de [15]).

Las LIB son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, por lo que existen muchos tipos, tamaños y diseños. Las categorizaciones más comunes derivan de la combinación de sustancias químicas utilizadas para los CAM (química de la batería) y de la forma de la carcasa o empaquetado. En cuanto a la composición, las químicas más comunes de los CAM para baterías de mayor capacidad son óxidos de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC), óxido de aluminio de litiomníquel-

cobalto (NCA) y fosfato de hierro y litio (LFP) [2]. Para baterías más pequeñas, es más predominante la combinación litio-cobalto (LCO). En la Tabla 1 se presentan las principales químicas y sus aplicaciones típicas. Los CAM, especialmente el cobalto y el níquel, son en general el componente más valioso de la batería, determinando tanto su costo como su atractivo económico para el reciclaje [5].

Química de la batería	Rango de densidad energética (Wh/kg)	Cantidad de ciclos de carga	Aplicaciones típicas
LCO (Litio-cobalto)	150-200	500-1000	Dispositivos electrónicos portátiles.
LFP (Litio-ferrofosfato)	90-180	2000-7000	Aplicaciones estacionarias (almacenamiento de energía solar). Propulsión de EV.
LMO (Óxido de litiomanganeso)	100-150	400-750	Aplicaciones estacionarias.
LTO (Titanato de litio)	50-80	S/D	Aplicaciones estacionarias. Equipos militares y aeroespaciales.
NCA (Óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto)	200-260	400-1000	Propulsión de EV. Dispositivos médicos. Baterías industriales.
NMC (Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto)	150-260	2000-3000	Herramientas eléctricas. Propulsión de EV.

Tabla 1: Tipos de LIB según su composición química y características destacadas. Fuentes: [5], [13], [14], [16]. S/D: sin datos.

En cuanto a la forma de la carcasa o empaquetado de la celda, los principales tipos son cilíndricas, prismáticas y tipo bolsa (Figura 2). Las diferentes formas repercuten en el rendimiento de las baterías; por lo tanto, cada tipo es usado según las necesidades a priorizar en cada aplicación. Por ejemplo, en los dispositivos electrónicos portátiles, se prioriza el menor volumen (y peso). Los factores de rendimiento que se ven afectados por la forma de la celda son la disipación térmica, la densidad

de empaquetado y la rigidez estructural. Las principales características de cada configuración se describen a continuación:

- **Forma cilíndrica:** las capas del ánodo, separador y cátodo son enrolladas concéntricamente. Permiten obtener una buena relación volumen/superficie, lo que les otorga una mayor capacidad, aunque la disipación de calor puede ser más lenta. La forma cilíndrica del

recipiente contenedor brinda la ventaja de una buena resistencia estructural.

- **Forma de bolsa:** los componentes activos de la celda son colocados en una bolsa flexible y sellada, generalmente de forma rectangular. Pueden ser más vulnerables a daños físicos en casos de rotura de la bolsa, si esta no se encuentra adecuadamente protegida.

- **Forma prismática:** el cátodo y el ánodo se encuentran dispuestos en forma de láminas rectangulares apiladas. También permiten una buena capacidad de almacenamiento de energía en relación al volumen, con la ventaja de posibilitar su combinación en módulos (o grupos de celdas) con menor pérdida de espacio.

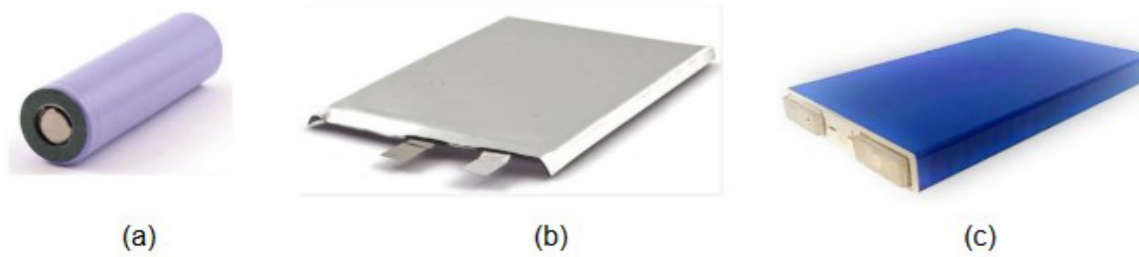


Figura 2: Principales tipos de formas de celdas. (a) cilíndrica, (b) bolsa, (c) prismática [17].

Las aplicaciones que requieren mayor potencia, como los vehículos y los ESS, utilizan combinaciones de celdas denominadas módulos y combinaciones de módulos, denominadas packs (o sistemas de baterías). Los packs suelen estar equipados con un sistema electrónico denominado sistema de gestión de baterías (BMS) que monitoriza continuamente diversos parámetros de funcionamiento en cada celda, principalmente el estado de carga de cada una, temperatura y corriente. El BMS cumple también una función protectora ya que interrumpe el flujo de energía o activa el sistema de ventilación cuando los parámetros de funcionamiento exceden los rangos ideales. Por lo tanto, es un componente clave para extender la vida útil de la batería.

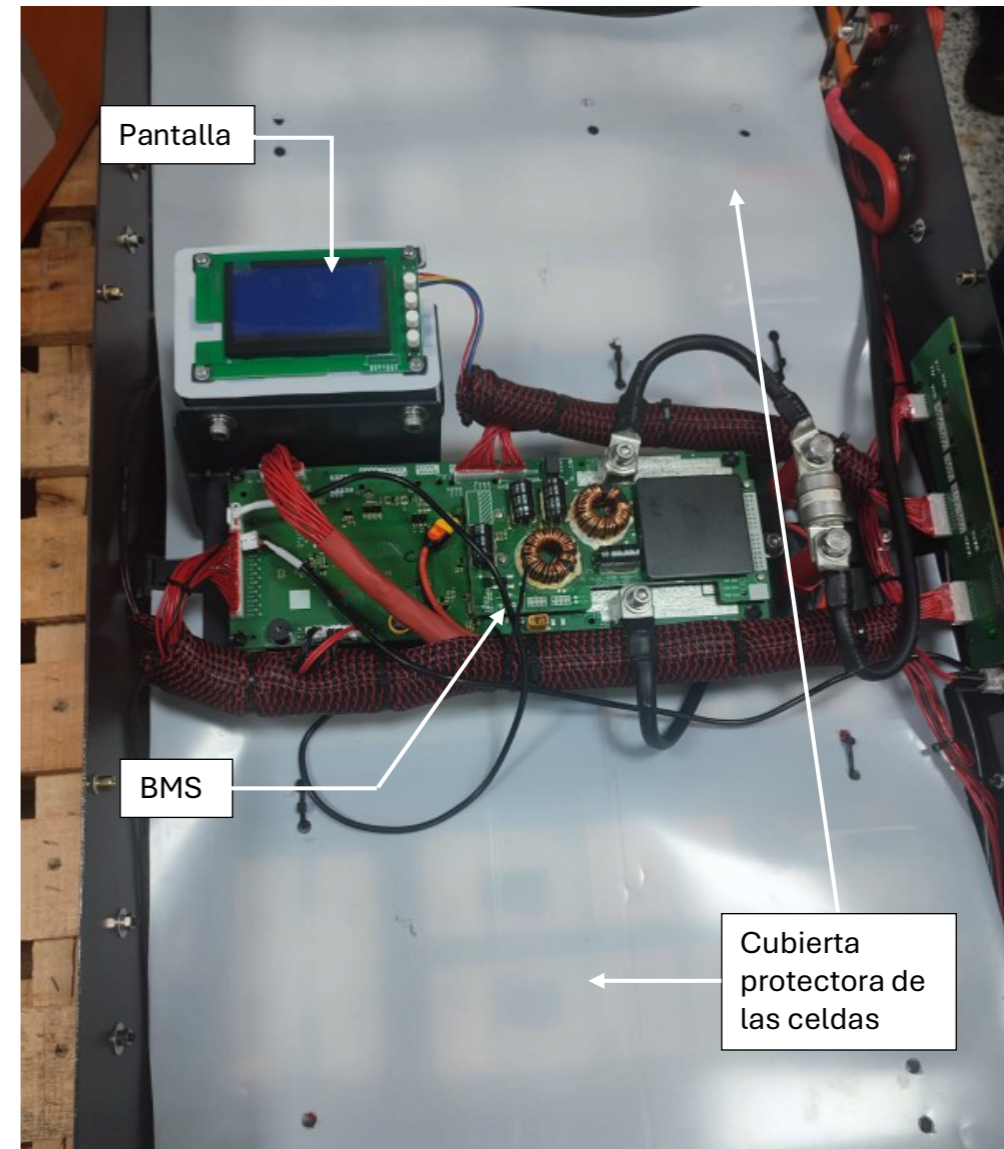


Figura 3: Ejemplo de un sistema de gestión de baterías (BMS) (Fotografía de los autores tomada en la planta de Tronex en Medellín).

## 2.2 Ciclo de vida de la batería

Por ciclo de vida se entiende a la secuencia de procesos necesarios para que un producto pueda cumplir su función. El ciclo de vida incluye no solo la etapa de uso, sino también las etapas previas y posteriores, como la de diseño, extracción de materias primas, la fabricación (etapas previas) y la disposición final de los materiales no reutilizables

luego de finalizado su uso (etapa posterior).

Hoy en día, el modelo predominante de producción y consumo se basa en un flujo lineal de los materiales a través del ciclo de vida, implicando una necesidad cada vez mayor de recursos vírgenes y una generación creciente de desechos.

Sin embargo, existe un claro consenso sobre las debilidades de este modelo en materia de sostenibilidad. Por lo tanto, el concepto de economía circular se ha posicionado como guía conceptual para el diseño de políticas de producción y de gestión de los recursos naturales [18]. Bajo este concepto, se prioriza la reutilización de los materiales incorporados previamente al ciclo productivo, generando flujos circulares de materiales (Figura 4).

En la cadena de valor de las LIB, las principales medidas para favorecer la circularidad de los materiales son [19], [20]:

- Extender el período de uso (o vida útil) de las baterías lo más posible, habilitando vías para su reutilización en aplicaciones de “segunda vida”.

- Incrementar las capacidades técnicas que faciliten (1) la evaluación de las condiciones de rendimiento de las baterías usadas, o “estado de salud” (SOH) y (2) su reparación o reacondicionamiento para extender su uso de acuerdo con el punto anterior.
- Una vez agotadas las posibilidades de reutilización, promover la recuperación de los materiales contenidos en las LIB mediante el reciclaje, posibilitando su reincorporación al ciclo productivo.

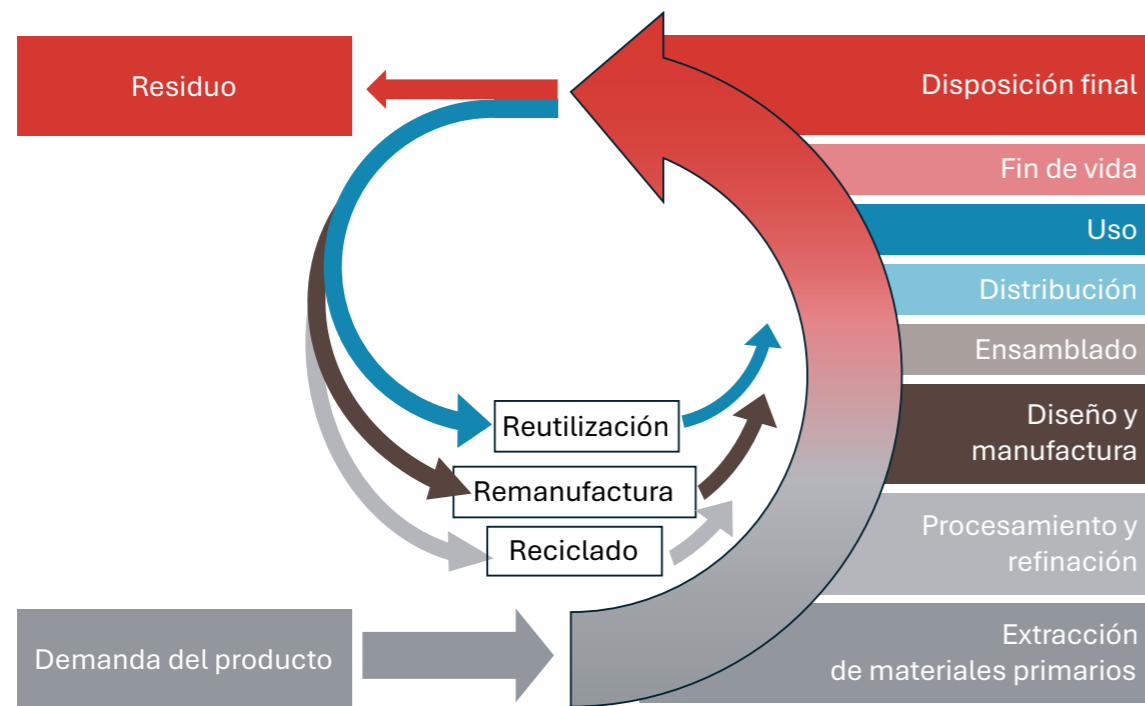


Figura 4: Ciclo de vida de las LIB contemplando conceptos de economía circular (Adaptado a partir de Tembo et al., (2024) [20]).

En una LIB, la vida útil es definida por la cantidad de ciclos de carga y descarga que puede soportar antes de que su capacidad de almacenamiento se degrade significativamente. Las LIB poseen, en comparación con otros tipos de baterías, una vida útil prolongada, ya que soportan un número alto de ciclos de carga y descarga, sufriendo un bajo desgaste o “efecto memoria” [13]. Este se refiere al efecto que posee el nivel de carga previa de la batería en la eficiencia de una nueva recarga. También favorece a su vida útil prolongada una baja tasa de autodescarga (pérdida de energía cuando no son usadas) y una alta eficiencia de carga y descarga (baja pérdida energética en estos procesos). La Tabla 1 presenta las cantidades de ciclos de recarga que admiten los principales tipos de LIB.

Los principales factores que afectan la vida útil de las LIB son la temperatura, la velocidad de carga y la “profundidad” de descarga (o nivel mínimo de carga previo a una nueva recarga). El uso de BMS, que permiten controlar estos factores, es una herramienta clave para prolongar la vida útil de las LIB [1].

La pérdida de capacidad de una batería, una vez que ya se encuentra en uso, se mide mediante el parámetro “estado de salud” (SOH), el cual mide la capacidad de carga actual de una batería respecto de su capacidad de diseño. Como regla general, se

considera que las baterías alcanzan el final de su vida útil primaria cuando su SOH alcanza un rango de entre 80 y 70% [2]. La elección de este rango como límite de la vida útil está relacionado más con el rendimiento de la aplicación primaria que con la condición de la batería en sí, la cual conserva un considerable potencial de uso.

El desgaste de las LIB (o pérdida de capacidad) ocurre habitualmente de modo lineal [17] y a una velocidad lenta en comparación a otros tipos de baterías. Esto permite, además de una vida útil prolongada, su reutilización para aplicaciones alternativas: una vez superado el umbral de desgaste o de SOH que las hace inapropiadas para su uso primario, las LIB conservan un buen potencial de uso para otras aplicaciones en las cuales es aceptable un rendimiento degradado, como en sistemas estacionarios de almacenamiento de energía (ESS) o como parte de sistemas de generación de RE, luego de una revisión y reacondicionamiento básico. Los usos secundarios en aplicaciones alternativas son conocidos como la “segunda vida”. Una vez agotadas las posibilidades de uso de la batería, luego de sus usos primario y secundario, esta alcanza su fin de vida útil (EoL), a partir del cual debe ser intervenida físicamente para su recuperación, o bien enviada a reciclaje. En la Figura 5 se sintetizan las etapas de la vida útil descritas.

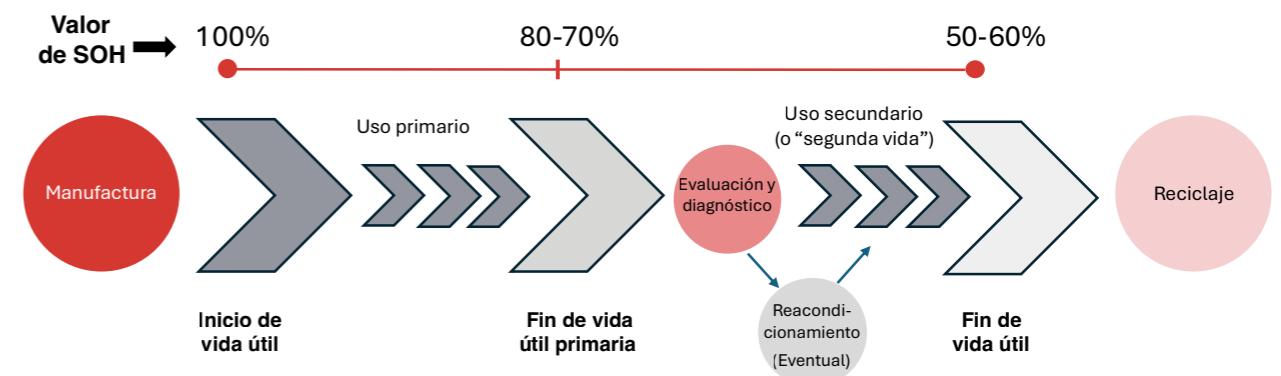


Figura 5: Etapas de la vida útil de las LIB de relevancia para su gestión material. Diseño propio a partir de información de Tembo et al., (2024) [20].

## 2.3 Gestión de LIB usadas: objetivos y esquema óptimos

Una vez alcanzado el final de su vida útil, las LIB usadas (o ULIB) deben ser gestionadas cuidadosamente para lograr los objetivos mencionados de protección ambiental y uso eficiente de los recursos. Este proceso presenta importantes desafíos [1], [5]:

- La generación de ULIB ocurre con una gran dispersión espacial y temporal.
- Los generadores de ULIB son actores muy diversos (usuarios individuales, entidades públicas, empresas). Cada uno posee motivaciones y recursos variados para asumir la gestión de las ULIB generadas.
- Gran variedad de ULIB en cuanto a tipos (química), modelos, estado de salud, condiciones de uso, etc.
- Escasos incentivos económicos para el procesamiento y reciclaje de ULIB: si bien contienen materiales valiosos, su extracción es un proceso complejo, de alto costo, que requiere una integración con otros actores de la cadena de valor para alcanzar un nivel de rentabilidad adecuado.
- Integración con recolectores y/o recicladores del sector informal.

Ante este escenario complejo, el éxito de una gestión adecuada de las ULIB depende en gran medida

de la implementación de reglamentaciones y de sistemas integrales (que abarquen a toda la cadena de valor), liderados por las autoridades correspondientes.#

Los componentes básicos de un sistema de gestión óptimo de ULIB son [1], [5]:

1. **Recolección, almacenamiento transitorio y transporte:** comprende las medidas que posibilitan el acopio de las ULIB una vez son generadas y su llegada a las plantas habilitadas para inspección, procesamiento o reciclaje.
2. **Reutilización:** contempla la inspección, diagnóstico del estado de salud (SOH) y asignación de un uso secundario (o segunda vida) a las ULIB.
3. **Reciclaje:** proceso de desensamblado y separación de los materiales que componen las ULIB para su reutilización como materias primas en la fabricación de nuevas LIB o de otros productos.

En la Figura 6 se sintetiza la estructura de un sistema de gestión óptimo de ULIB. En el siguiente capítulo, se describe la situación específica de Colombia en la materia. En los capítulos posteriores, se profundiza la información sobre aspectos técnicos específicos referidos a las etapas principales de este esquema.

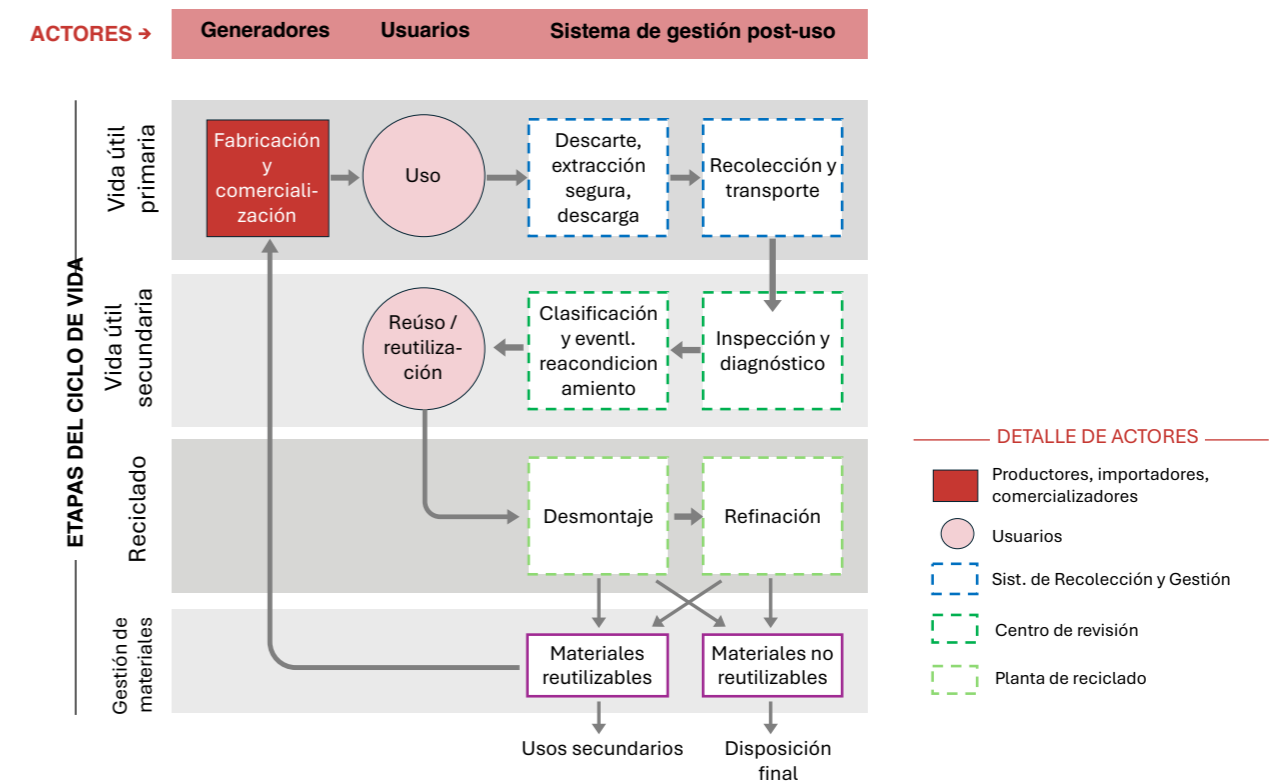


Figura 6: Estructura óptima de un sistema de gestión de ULIB. Elaboración propia a partir de información de López Hernández, et al. (2024) [5] y Zagorodny (2023) [1].

## 3. Conceptos básicos sobre baterías de ion-litio

La etapa de recolección y transporte comprende los procedimientos necesarios para solucionar el problema de la dispersión espacial y temporal con la que ocurre la generación de ULIB. Implican actividades logísticas (acopio, transporte, almacenamiento), procedimientos mecánicos (desmontaje, remoción) y tareas de gestión: educación y sensibilización de los usuarios, establecer acuerdos de cooperación entre generadores y gestores, etc.

### 3.1 Recolección

La recolección se refiere a los procedimientos que buscan reunir las ULIB una vez han sido generadas. Además de aspectos técnicos y logísticos, el diseño de un sistema de recolección eficiente enfrenta un importante desafío de diseño relacionado con la

llegada a un universo amplio y diverso de actores que intervienen en el ciclo de vida de las LIB. Por ejemplo, no es suficiente con el establecimiento de puntos de recolección, si no se realiza además la sensibilización de los usuarios de LIB sobre cómo

deben ser gestionadas cuando alcanzan el final de su vida útil. Por otra parte, algunos tipos de LIB de mayor capacidad, como las de EV, deben ser manipuladas por personal capacitado debido al riesgo eléctrico que presentan (ver sección 6.3.1).

### 3.1.1 Criterios para el diseño de un sistema de recolección de ULIB

Al menos tres aspectos son clave para el éxito de un sistema de recolección de ULIB eficiente: la legislación y reglamentaciones, las consideraciones de seguridad y la educación y sensibilización [1].

Las **reglamentaciones (1)** aseguran la trazabilidad de las LIB a lo largo de su ciclo de vida, y (2) definen las responsabilidades para su gestión en cada etapa, con fuerza de ley. Por lo tanto son clave para motivar a los usuarios de baterías a gestionarlas adecuadamente. La falta de reglamentaciones resulta, en el caso de las ULIB, en su disposición inadecuada, por ejemplo en vertederos de residuos domiciliarios. Esta situación genera riesgos ambientales por filtración de las sustancias contenidas en las baterías y un desperdicio de materiales valiosos con un alto potencial de reutilización.

El manejo y manipulación de LIB usadas o al final de su vida útil requiere considerar **aspectos**

**de seguridad** debido a su contenido de sustancias que pueden causar incendios, explosiones o descargas eléctricas, lo que implica riesgos para las personas que realizan las tareas como para las instalaciones y vehículos utilizados. Por lo tanto, la recolección debe realizarse siguiendo criterios de prevención de estos riesgos, los cuales se describen en el Capítulo 6.

Deben realizarse además campañas de **educación y sensibilización**, dirigidas a los usuarios de las baterías sobre el proceso adecuado de disposición de las mismas. Debe evaluarse cuidadosamente el universo de usuarios que es destinatario de estas campañas, ya que no solo abarca a usuarios individuales (por ejemplo, de pequeños vehículos eléctricos), sino también deben incluirse a actores como administradores de flotas públicas o privadas de EV, o talleres de reparación, centros de reventa, etc.

### 3.1.2 Principales modalidades de sistemas de recolección

Los sistemas de recolección de ULIB pueden tomar diferentes formas en función del contexto político, sociocultural y económico. También pueden convivir diferentes esquemas en una misma región, enfocados cada uno en diferentes flujos de ULIB [1].

Las modalidades más habituales son:

- **Sistemas de recolección obligatorios:** están sustentados en la sanción de legislación que impone a los productores e importadores que organicen y financien la recolección y gestión de las baterías asociadas a los productos que comercializan, mediante un esquema de REP.

Este enfoque asegura que haya un método estructurado y consistente para la recolección de ULIB.

- **Esquemas de recolección voluntarios:** Ante la ausencia de regulaciones y dependiendo de la cooperación de los actores involucrados, pueden plantearse sistemas voluntarios. Para ser efectivos, deben estar respaldados por fuertes incentivos o campañas de concientización.
- **Asociaciones público-privadas:** los acuerdos de colaboración entre autoridades públicas y empresas pueden brindar respuestas eficaces a situaciones específicas. Sin embargo, su surgi-

miento puede estar limitado a la existencia de condiciones no siempre presentes.

- **Iniciativas comunitarias:** son generalmente impulsadas a nivel local por organizaciones no gubernamentales o grupos comunitarios. Pueden desempeñar un rol importante en áreas donde no existen sistemas formales, o tienen una menor llegada. Son muy efectivas en mejorar la concientización y fomentar la participación ciudadana.

Un mecanismo habitual para asegurar la eficacia de la recolección, es el de **responsabilidad extendida del productor (REP)**. La REP integra a diferentes actores en la cadena de valor de las LIB en pos de lograr una gestión adecuada de las mismas.

### 3.2 Transporte

Para la manipulación y traslado de las ULIB desde los puntos de recolección hasta los de procesamiento, deben tenerse en cuenta, como factores que orientan el procedimiento, (1) al riesgo asociado a las ULIB, el cual proviene de las sustancias contenidas en éstas, a la presencia de carga eléctrica residual, y a la posibilidad de generar

La REP permite, por ejemplo, que los productores o comercializadores de equipos que usan LIB financien empresas dedicadas exclusivamente a su recolección, quienes montan una red de puntos de recolección en donde los consumidores de esos equipos disponen las ULIB. Por lo tanto, una de sus actividades principales es la educación de los usuarios de LIB sobre las conductas adecuadas para disponer de ellas luego de finalizado su uso. Adicionalmente, establecen acuerdos con entidades que son grandes generadoras de ULIB, como ser empresas de transporte o fabricantes de EV.

incendios o explosiones ante situaciones de golpes o exposición a altas temperaturas; (2) las regulaciones nacionales e internacionales de transporte derivadas de dichos riesgos; y (3) el costo de las operaciones [1]. Sobre los puntos 1 y 2, se presentan más detalles en el Capítulo 6.

## 4. Diagnóstico, reacondicionamiento y reutilización

Un paso clave a desarrollar en la cadena de valor de las LIB para posibilitar la extensión de su vida útil y mejorar la circularidad de materiales en el sector, es el diagnóstico o evaluación posterior al primer uso.

La continua mejora tecnológica en la fabricación de LIB ha resultado en una extensión notable de su vida útil. Para las LIB de vehículos eléctricos (BEV) fabricadas actualmente, por ejemplo, se espera que tengan una durabilidad mayor a la del vehículo en las que son usadas. Por lo tanto, es primordial

desde el punto de vista de la economía circular y del uso eficiente de los recursos, considerar una segunda vida para estas baterías que conservan todavía una buena capacidad al finalizar su uso primario [21].

En líneas generales, el reutilización de ULIB se logra mediante un proceso técnico que contempla cinco pasos principales: (1) recolección de las ULIB, (2) transporte a la planta de procesamiento, (3) inspección y evaluación, (4) clasificación y reacondicionamiento, y (5) asignación del segundo uso [21].

Los pasos 1 y 2 han sido descritos en el capítulo anterior, por lo que a continuación se describirá el resto de los pasos. Debido al esfuerzo requerido en este proceso, la reutilización es redituable solo para las ULIB de mayor capacidad (como las BEV), y las baterías de pequeños electrónicos suelen ser enviadas directamente a reciclaje.

En una segunda vida, una ULIB puede usarse para la misma aplicación de diseño (reúso) o para una aplicación diferente, por ejemplo el uso de BEV para almacenamiento estacionario o para un vehículo de menor potencia (**reconversión**) [4].

Si el estado de conservación de la batería no es adecuado, previo a la asignación del segundo uso debe realizarse un reacondicionamiento, el cual incluye una reparación o sustitución de componentes, aunque sin modificar la composición química de la batería. Este caso de segunda vida para el que se

## 4.1 Inspección y diagnóstico

El primer paso en el procesamiento de ULIB consiste en su inspección y evaluación, con el fin de conocer las **características técnicas** de la batería (p.e. tipo de química, voltaje nominal, capacidad de diseño), integridad física (señales de daño como abolladuras o fugas), como así también su **nivel de degradación**, es decir, su SOH, con el objetivo de determinar la aptitud de una ULIB para potenciales usos secundarios, o bien si debe ser destinada a reciclaje.

La inspección suele realizarse en centros de diagnóstico de ULIB, a veces asociados a plantas de reciclaje de ULIB. Para el caso de las BEV, el fabricante original del vehículo (OEM) puede haber dispuesto talleres o concesionarios en donde brindan servicios de mantenimiento y/o recambio de baterías para sus clientes.

En principio, el SOH de una ULIB puede ser determinado a partir de los datos de uso almacenados en el BMS (p.e. historial de recarga, temperatura

requiere una intervención del producto se conoce como reutilización, aunque existen divergencias en la interpretación del término en la literatura. Existen diversos ejemplos de segunda vida de BEV [22], los que pueden agruparse según su escala:

- **Pequeña escala:** ESS estacionarios para sistemas de generación domiciliarios, para puntos de recarga de EV, o para iluminación urbana.
- **Escala media:** provisión de energía a instalaciones industriales o para vehículos acuáticos.
- **Gran escala:** un parque de numerosas ULIB puede usarse al servicio de las redes eléctricas públicas, permitiendo maximizar la eficiencia en la generación de ER (almacenamiento durante los momentos pico de generación, para provisión en los momentos pico de demanda). También, para el alivio de la congestión en redes de transmisión eléctrica.

promedio, motivo de su retiro, nivel promedio de carga), por lo que el acceso a esta información es clave para facilitar el diagnóstico [23], [24]. Sin embargo, por regla general los datos del BMS no están disponibles libremente. Por motivos comerciales, existen criterios diversos entre los fabricantes de LIB o EV sobre el acceso a dichos datos. En algunos casos, el fabricante incluso programa la eliminación automática de la información una vez que la batería alcanza el fin de su uso primario. Ante estas restricciones, el acceso a los datos en un centro de diagnóstico puede requerir la tramitación con el fabricante de permisos o el uso de software específico [24].

Actualmente se encuentra en discusión la disponibilidad abierta a los datos del BMS. En este contexto, debe considerarse que los datos acumulados en el BMS permiten también identificar patrones de uso de las LIB o EV, por lo tanto, los usuarios podrían alegar un derecho de propiedad sobre los mismos.

Si los datos del BMS no pueden ser accedidos, los centros de diagnóstico deben realizar una serie de tests para determinar el SOH. Es preferible realizar el testeado de la ULIB a nivel del módulo, ya que realizarlo a nivel de celdas incrementa la complejidad y costo del procedimiento. El testeado consiste de una recarga completa y luego descarga controlada y monitorizada de la batería, proceso que puede requerir varios ciclos. Es un procedimiento lento e intensivo en mano de obra. Una complicación adicional es la escasa estandarización entre las metodologías para determinar el SOH, por lo que diferentes centros de testeado podrían realizar el procedimiento con diferentes métodos, llegando a resultados no siempre comparables [17], [21], [22].

Los ensayos suelen iniciarse sobre los packs completos, y de no alcanzarse un resultado satisfactorio (según el uso secundario previsto para el dispositivo), se realiza la separación de módulos o celdas individuales, es decir el desensamblado, para su diagnóstico individualizado [1]. Este procedimiento puede ser más complejo si las baterías no están prediseñadas para su desensamblado, lo que requiere un cuidadoso trabajo de separación de módulos unidos por pegamento, soldadura o uniones plásticas. Por el costo implícito en esta tarea, para las aplicaciones de segunda vida suelen preferirse baterías enteras o intactas [21].

El proceso de inspección es artesanal y laborioso, ya que se realiza generalmente de manera manual por personal técnico especializado. Por otra parte, la gran mayoría de las LIB son fabricadas sin contemplar un uso de segunda vida y en consecuencia no cuentan con características de diseño que faciliten el diagnóstico [21]. Por lo tanto, cada compañía

dedicada a la inspección de ULIB suele desarrollar sus propios protocolos de pruebas de SOH, en función de las baterías disponibles en el mercado.

El testeado de ULIB se realiza mediante diversos métodos (o una combinación de ellos), entre los que se destacan los siguientes [20]:

- **Medición directa:** implica la carga y descarga totales de la LIB, con una corriente baja y constante, a temperatura ambiente. La carga transferida durante el ciclo completo de carga y descarga es medida con precisión, para luego calcular el SOH.
- **Medición indirecta:** implica primero usar una señal eléctrica que es enviada al sistema y luego el registro de la respuesta en términos de impedancia mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), capacidad incremental (IC) resistencia interna, o herramientas de inteligencia artificial. Se ha establecido que la resistencia eléctrica se incrementa linealmente con la edad de la batería, por lo que usando una tabla o “mapa” que relacione la capacidad disponible con la resistencia se logra el cálculo del SOH.
- **El enfoque de modelado** involucra modelos eléctricos y electroquímicos y ecuaciones diferenciales parciales no lineales para correlacionar el SOH de la batería con señales medidas, como la corriente, el voltaje y la temperatura.
- Los **enfoques basados en datos**, como los vectores de soporte y de fuzzy logic, pueden aprovechar el aprendizaje automático para calcular indicadores de degradación de la batería utilizando datos recopilados durante su funcionamiento.



Figura 7: Testeo de ULIB por medición y análisis computarizado de datos de desempeño (Fotografía de los autores tomada en la planta de Tronex en Medellín).

Una dificultad característica de los centros de diagnóstico que procesan baterías de diversos orígenes, es la heterogeneidad de las unidades a procesar: no sólo de tipos, modelos y capacidades, sino tam-

bién de historiales de uso. Esta es una barrera que impide optimizar los procesos de desensamblado y asignación de un uso secundario [21].

## 4.2 Clasificación y reacondicionamiento

Luego de su evaluación, las baterías, módulos o celdas que presentan condiciones satisfactorias de integridad física y SOH son clasificadas y agrupadas de acuerdo a su nivel de rendimiento esperado. En general, las baterías o sus componentes deben ser agrupados según nivel de SOH ya que, por ejemplo, el desempeño de todo un módulo estará determina-

do por el de su celda individual con peor nivel de SOH. En general, no es recomendable el recambio parcial de celdas en módulos o packs, ya que luego el conjunto presentará potenciales incompatibilidades debido a los diferentes grados de envejecimiento, y por tanto expectativa de rendimiento [1].

En este paso, un desafío es la elección de los parámetros o indicadores más adecuados para determinar el agrupamiento. Otro desafío implica el desarrollo de un algoritmo de clasificación eficaz. Dado que la degradación de las baterías con el uso implica varios mecanismos 29 paralelos, es difícil crear un algoritmo que abarque todos los indicadores correspondientes [22].

Las baterías reensambladas a partir de celdas o módulos evaluados, son equipadas con un nuevo BMS y se consideran equipos reacondicionados y aptos para una segunda vida.

Una batería reacondicionada no se comportará como una batería nueva, por lo que se requerirán estrategias de control adaptadas para, por ejemplo, estabilizar la salida de potencia o limitar los eventos de sobrecalentamiento [22], lo cual en gran medida es solucionado mediante el equipamiento

de la batería reacondicionada con un nuevo BMS. Además, será necesario diseñar estrategias de equalización para reducir las inconsistencias entre el comportamiento electroquímico de las celdas o módulos individuales, que se espera aumenten a lo largo de la segunda vida de una batería. Por último, se deben desarrollar algoritmos avanzados de diagnóstico de fallas con fines de seguridad para detectar eventualidades como cortocircuitos internos. Si bien estos algoritmos ya se han desarrollado para baterías nuevas, aún no se ha determinado su eficacia para las baterías de segundo uso [21].

El reacondicionamiento puede también implicar la necesidad de restaurar las condiciones estructurales de la batería a nivel de componentes químicos, lo cual supone un solapamiento conceptual con el proceso de reciclaje. Estos procedimientos se explican en el capítulo siguiente (apartado 5.1.5).

## 4.3 Asignación de segunda vida

El proceso de determinación de la segunda vida más óptima para una ULIB reacondicionada es complejo y puede presentar soluciones variables, ya que deben conciliarse factores de diferente tipo, principalmente técnicos, económicos y de regulaciones que influyen sobre dichos aspectos [1].

Los factores técnicos tienen que ver con el producto elaborado: calidad (SOH) y cantidad de las baterías de origen usadas, como así también de las baterías reacondicionadas. Los factores económicos son: existencia en el mercado de una demanda del tipo de producto específico que ha sido elaborado, y un suficiente beneficio económico del proceso de reacondicionamiento.

## 4.4 Lineamientos técnicos y normativos

El desarrollo de estándares y protocolos técnicos que orienten los procesos de reacondicionamiento de ULIB es un factor importante para promover la actividad, ya que, por un lado, facilitan el acceso a conocimientos técnicos y promueven el logro de niveles mínimos de eficiencia en los procesos. Por otro lado, potencian el valor de los productos elaborados, ya que puede certificarse su calidad mediante la verificación del cumplimiento de

estándares, lo cual permite un mejor posicionamiento de estos productos en el mercado. Debido a la continua evolución de las tecnologías tanto de fabricación como de procesamiento post-primera vida de las LIB, el desarrollo de estándares referidos al proceso de evaluación y asignación de segunda vida de ULIB es todavía limitado [4], [22]. Existe un considerable cuerpo de estándares referidos a las características que deben cumplir las LIB

para su ingreso al mercado (primera vida) en cuanto a rendimiento y durabilidad. Por ejemplo, Ruiz (2018) [25] brinda un panorama del cuerpo de estándares aplicables a baterías de primera vida en Europa, es decir, aplicables prioritariamente en la etapa de manufactura. En algunos casos, los lineamientos técnicos brindados en estas nor-

#### 4.4.1 Estándares técnicos

Los protocolos técnicos existentes que orientan el proceso de evaluación y reutilización de baterías son estándares sectoriales elaborados por organizaciones internacionales. No se han encontrado documentos homólogos elaborados o adaptados localmente en Colombia.

**ANSI/CAN/UL 1974:2023. Estándar para la evaluación y reutilización de baterías (Standard for Evaluation for Repurposing Batteries)** [26]. Esta norma del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute, ANSI) de reciente publicación (noviembre de 2023) abarca el proceso de selección y clasificación de paquetes de baterías, módulos y celdas y condensadores electroquímicos que fueron originalmente configurados y utilizados para otros fines, como la propulsión de EV, y que prevén ser usados en una aplicación de segundo uso, como para en sistemas

#### 4.4.2 Estándares técnicos

**UN Manual of Tests and Criteria, Section 38.3.2.2 (Manual ONU de pruebas y criterios)** [28]. El Manual contiene los criterios, métodos de prueba y procedimientos que deben utilizarse para la clasificación de mercancías peligrosas de acuerdo con las disposiciones de las Recomendaciones de la ONU relativas al transporte de mercancías peligrosas, así como de los productos químicos que presentan riesgos físicos de acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (Globally Harmonized System

mas pueden aplicarse a la evaluación de baterías post-primer uso. Por otra parte, las referencias técnicas disponibles se encuentran disponibles en idioma inglés, lo cual impone una barrera para su rápida adopción en Colombia o la región latinoamericana.

de almacenamiento de energía. También cubre los requisitos específicos de aplicación para sistemas de baterías reutilizadas y sistemas de baterías que contienen componentes reutilizados.

**IEC 63330-1:2024. Requisitos generales para el reutilización de baterías secundarias (General requirements for repurposing of secondary batteries)** [27]. De reciente publicación (junio de 2024), este estándar de la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC) establece los requisitos generales para la reutilización de baterías secundarias (células, módulos, conjuntos de baterías) fabricadas originalmente para otras aplicaciones, como los EV. Se especifica el procedimiento para evaluar el rendimiento y la seguridad de las ULIB y proporciona los requisitos básicos para la aplicación de reutilización (o segunda vida).

of Classification and Labelling of Chemicals, GHS). Describe los métodos y procedimientos de ensayo considerados más útiles para proporcionar a los oficiales que realizan la clasificación de mercancías la información necesaria para realizar una clasificación adecuada. Su sección 38.3 se aplica a baterías de metal litio y de ion litio, sin distinguir si son de primera o segunda vida (por lo que los ensayos debe realizarse indistintamente).

## 5. Reciclaje de ULIB

Un paso clave a desarrollar en la cadena de valor de las LIB para posibilitar la extensión de su vida útil y mejorar la circularidad de materiales en el sector, es el diagnóstico o evaluación posterior al primer uso.

La continua mejora tecnológica en la fabricación de LIB ha resultado en una extensión notable de su vida útil. Para las LIB de vehículos eléctricos (BEV) fabricadas actualmente, por ejemplo, se espera que tengan una durabilidad mayor a la del vehículo en las que son usadas. Por lo tanto, es primordial desde el punto de vista de la economía circular y del uso eficiente de los recursos, considerar una

### 5.1 Procesos de reciclaje de ULIB

Los procesos de reciclaje practicados en la actualidad son muy variables, como resultado de la diversidad de tipos (químicas) y modelos de ULIB existentes en el mercado [29]. Existen varias "rutas" que combinan los procesos disponibles según el material objetivo prioritario y la ecuación o matriz económica del mercado. Los tres principales procesos son:

- Desactivación, tratamiento mecánico y térmico: resulta en la denominada "masa negra", concentrado homogéneo de los materiales del cátodo y ánodo.
- Procesos pirometalúrgicos: fundición de las baterías, con foco en la recuperación de los metales del cátodo. Se eliminan los compuestos orgánicos y se pierden las sales de litio.
- Procesos hidrometalúrgicos: permite, a partir de la masa negra, recuperar litio aluminio y manganeso como sales metálicas.

segunda vida para estas baterías que conservan todavía una buena capacidad al finalizar su uso primario [21].

En líneas generales, el reutilización de ULIB se logra mediante un proceso técnico que contempla cinco pasos principales: (1) recolección de las ULIB, (2) transporte a la planta de procesamiento, (3) inspección y evaluación, (4) clasificación y reacondicionamiento, y (5) asignación del segundo uso [21].

A continuación se describen las características de las tecnologías más utilizadas.

Estos caminos pueden combinarse y compartir algunos o parte de sus procesos, según los objetivos específicos buscados en cada caso. En la siguiente figura se resumen los procesos principales y las técnicas utilizadas en cada uno.

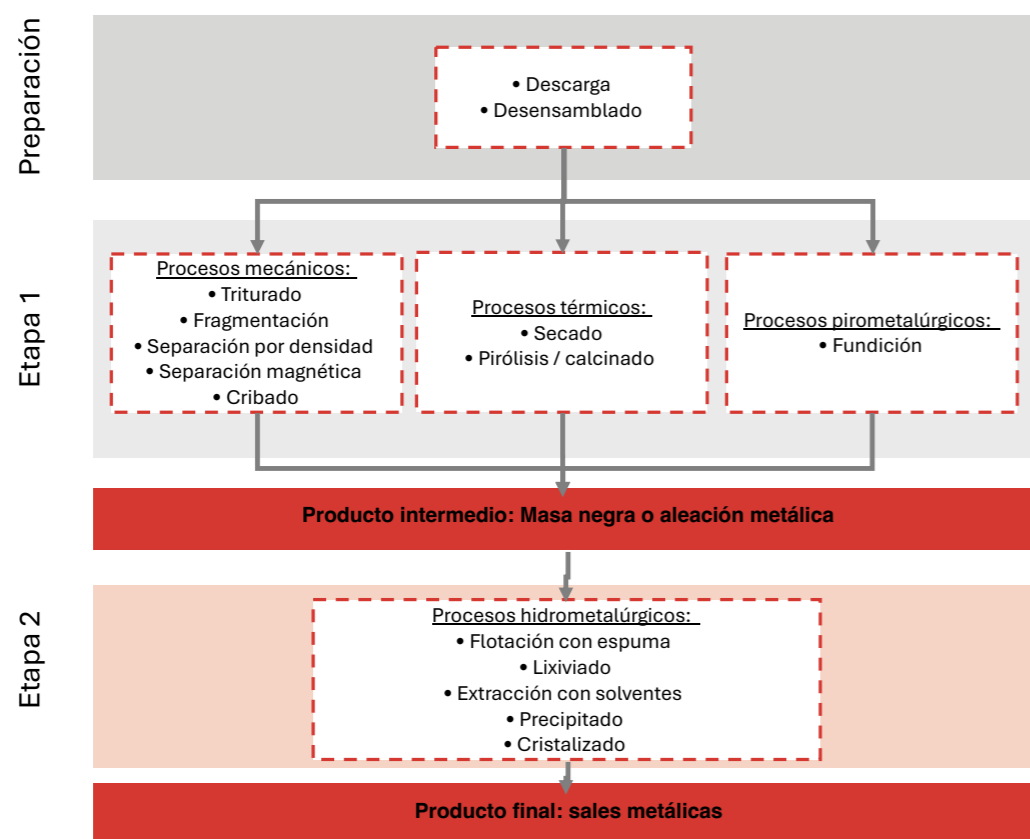


Figura 8: Principales procesos de reciclaje de ULIB. Adaptado a partir de Heimer et al. (2023) [2].

A continuación se describen las características principales de cada proceso, y en el apartado siguiente se comparan los procesos entre sí a partir de su eficacia y desempeño ambiental.

## 5.1.1 Pre-tratamiento

La mayoría de los procesos de reciclaje requieren un pretratamiento de las LIB, también llamado “desactivación”, que involucra en general la descarga y el desensamblado. Con esto, se logran dos objetivos: la separación de los componentes fácilmente desmontables y la eliminación de los riesgos por carga eléctrica [2].

**Descarga:** la mayoría de las ULIB recolectadas se encuentran al menos parcialmente cargadas al momento de su recepción. La descarga es un procedimiento clave para eliminar los riesgos derivados del riesgo eléctrico (véase apartado 6.1). Existen

diferentes métodos para realizar la descarga. Un descargador eléctrico puede lograr la descarga a menos de 0,1 V, aunque este procedimiento no suele ser eficaz para la mayoría de las LIB. Otro método muy utilizado es la sumersión de las LIB en soluciones salinas, como NaCl, Na<sub>2</sub>S o MgSO<sub>4</sub>, que actúan como medio de descarga. Las sumersión puede ser completa, o solo implicar sus contactos, siendo este último caso más recomendable para baterías de mayor capacidad como las de EV [14]. Las soluciones utilizadas deben ser luego debidamente tratadas, ante la posibilidad de disolución de metales u otros componentes de las baterías en ellas.

**Desensamblado:** esta etapa busca una primera separación no destructiva de las partes y grupos de materiales, básicamente retirando los accesorios de funcionamiento (bornes, conectores, BMS) y desarmando los componentes estructurales como cubiertas y separadores. El desensamblado desde

el nivel de packs de baterías hasta módulos suele realizarse manualmente, ya que las cantidades de ULIB recuperadas son bajas como para la automatización [2]. Los operarios a cargo del trabajo deben ser entrenados debido al riesgo eléctrico.

## 5.1.2 Procesos mecánicos

Los procesos mecánicos buscan separar los materiales de las diferentes partes de la batería (cátodo, ánodo, separadores orgánicos y restos de la estructura contenedora) con intervenciones que ahora sí destruyen la estructura original de las ULIB. El objetivo de separación se consigue mediante la descomposición estructural (trituración) de los materiales de las baterías hasta obtener un medio homogéneo tipo polvo, sobre el cual se aplican secuencialmente técnicas que permiten la separación de los diferentes materiales mediante principios físicos.

Las principales técnicas involucradas son [2]:

- **Trituración:** implica la destrucción por molienda de los módulos o celdas hasta lograr un material a granel más fino y transportable. Puede realizarse de manera “seca” o “húmeda”. La técnica seca implica la trituración en una atmósfera inerte, para mitigar el riesgo de incendio. La técnica húmeda implica realizar el proceso en un medio acuoso, con el mismo fin de mitigar los riesgos, aunque requiriendo luego un adecuado tratamiento del agua utilizada.
- **Fragmentación:** es una técnica alternativa a la trituración, todavía en estado experimental, en la que la destrucción de la estructura de la batería se realiza mediante un chorro de agua a alta presión que separa los materiales activos de las capas de ánodos y cátodos. Otra técnica de fragmentación en estudio implica la aplicación de ondas vibratorias dentro de un medio acuoso.

- **Secado:** busca la extracción de los electrolitos volátiles del material triturado. Puede realizarse por vacío, por contacto, por convección y/o por luz infrarroja. Resulta ventajoso que el secado se lleve a cabo mientras se agita y/o hace circular el material triturado [2].

- **Separación por densidad:** sirve para separar los materiales de mayor y menor densidad del material triturado. Se usa, por ejemplo, un tamiz con movimiento en zigzag. Pueden requerirse dos o más aplicaciones. Los componentes separados con esta técnica son típicamente los restos de la carcasa contenedora (acero) o electrodos 34 de aluminio o cobre entre los elementos más pesados. El material plástico de los separadores (polietileno y/o polipropileno) se obtiene de la fracción más liviana.
- **Separación magnética:** se utiliza para separar materiales magnéticos (principalmente restos de acero). El dispositivo consiste de un rodillo cilíndrico magnético por el cual se tamiza la mezcla a lo largo de un recorrido lo suficientemente prolongado para lograr una separación adecuada.

- **Cribado:** permite clasificar el material triturado en función del tamaño de sus partículas. El proceso retiene los materiales de la carcasa de la batería (aleación Al/Fe/Mn), los plásticos y los colectores de corriente como partículas gruesas, mientras que la fracción fina consiste principalmente en masa negra (materiales activos).

Los procesos mecánicos permiten como resultado una separación sin alteración química de dos fracciones principales: por un lado los materiales plásticos o metálicos de la carcasa contenedora, y

### 5.1.3 Procesos pirometalúrgicos

La familia de procesos pirometalúrgicos implican someter las ULIB a altas temperaturas para eliminar algunos de sus componentes por calcinación o para facilitar su separación. En este tipo de procesos se descarta la recuperación de los electrolitos y los plásticos u otros componentes como las sales de litio. La pirometalurgia puede usarse como pretratamiento o bien como tratamiento principal de separación [1].

Las técnicas térmicas de pretratamiento incluyen [14]:

- **Pretratamiento por incineración:** se realiza para eliminar los compuestos orgánicos de la batería, mediante incineración en presencia de aire u oxígeno, a altas temperaturas.
- **Pretratamiento por pirólisis:** La pirólisis es el proceso de conversión térmica de compuestos orgánicos en productos de bajo peso molecular que pueden utilizarse como combustible o materia prima. Esto normalmente se hace calentando el material de la batería por encima de su temperatura de descomposición en una atmósfera anóxica o inerte, para evitar que se produzcan reacciones químicas desfavorables, ya que el litio es muy reactivo con el aire. Durante la pirólisis se pierde el electrolito, pero se puede recuperarlo por condensación.
- En los procesos de extracción pirometalúrgica propiamente dichos, se someten las baterías a altas temperaturas, lo que implica básicamente fundirlas, para reducir los óxidos metálicos a una aleación de Co, Cu y Ni. Según las características de las ULIB a procesar y la existencia de un interés específico en extraer determinados materiales, se puede recurrir a

por otro los materiales activos del cátodo (CAM) y los del ánodo en forma de un polvo negro (debido al grafito del ánodo) o masa negra [14].

diferentes variaciones del proceso, como ser [20]:

- **Tostación o calcinación:** Luego del pretratamiento, el CAM recuperado se procesa mediante tostación por reducción carbotérmica, que implica reacciones exotérmicas entre el gas y el sólido a altas temperaturas.
- **Fundición:** La fundición es otro método pirometalúrgico eficaz que se utiliza para extraer metales valiosos de ULIB. Durante este proceso, el material de la batería se calienta por encima de su punto de fusión para permitir la separación mediada por reducción de los metales en la fase líquida y la posterior producción de capas fundidas inmiscibles.
- **Tostación sin oxígeno y separación magnética húmeda:** En este proceso, las ULIB se someten a descarga, raspado, cribado, tostación sin oxígeno y, finalmente, separación magnética húmeda.

El proceso de pirólisis se encuentra comercialmente bien establecido a nivel global para las LIB provenientes de los dispositivos electrónicos de consumo. A pesar de los impactos ambientales (producción de gases tóxicos que deben ser tratados, y la necesidad de procesar las escorias a través de procesos hidrometalúrgicos), el costo implícito en la gran cantidad de energía requerida, y la limitada recuperación de materiales, este proceso es uno de los más usados para la extracción de Co y Ni [1].

### 5.1.4 Procesos hidrometalúrgicos

Los procesos hidrometalúrgicos (HM) consisten en principio en disolver los componentes de la masa negra separada en el pretratamiento, utilizando diferentes reactivos químicos. Difiere de los procesos pirometalúrgicos en cuanto a que aquí sí se logra recuperar el litio y ofrecen el potencial de recuperar el grafito, lo cual se ha conseguido a escala de investigación. Los procesos que usan este principio son múltiples, y se pueden usar en secuencia o paralelamente para conseguir diferentes objetivos de reciclaje. Algunas variaciones requieren obligatoriamente etapas de procesamiento mecánico previo. La elección final de la combinación de procesos a utilizar, dependerá de las características del insumo (tipos de ULIB disponibles), recursos disponibles (equipamiento, espacio, energía) y eventual preferencia por la recuperación de algunos materiales por sobre otros. Muchas empresas que realizan procesos HM custodian cuidadosamente su propiedad intelectual, cuyo desarrollo suele llevar años de inversión [4].

Algunos de los procesos HM más comunes son: (1) separación de los materiales activos del cátodo (CAM) de la lámina colectora de aluminio, (2) lixiviado de la masa negra, y (3) separación de metales del lixiviado, los que se describen a continuación [20].

1. **La separación de los CAM de la lámina de aluminio** puede realizarse con tres técnicas diferentes: dilución con un solvente orgánico (por ejemplo N-metilpirrolidona (NMP) polar o NaOH), tratamiento térmico mediante trituración y eliminación del contenido orgánico por

calcinación, o la pirólisis en vacío que actúa debilitando la adhesión entre la lámina de aluminio y los CAM mediante la descomposición de las sustancias orgánicas que los unen.

2. El **lixiviado** es el proceso principal a ser aplicado sobre la masa negra para la recuperación de los metales contenidos en ella. En el lixiviado, los metales contenidos en los CAM se convierten en iones disueltos en una solución acuosa. Las diferentes técnicas disponibles para realizar este procedimiento varían según el agente de lixiviado que utilizan: ácido inorgánico, ácido orgánico o una solución alcalina.
3. **La separación de los metales del lixiviado.** Una vez procesados los CAM, el lixiviado obtenido contendrá metales valiosos como Li, Co, Ni, Mn, Cu, Al y Fe. Se pueden utilizar métodos como la extracción por solvente, la precipitación química y la deposición electroquímica para extraer los metales valiosos de la solución. Se deben utilizar dos o más métodos simultáneamente debido a la complejidad de la solución.

Las ventajas de los procesos HM son su flexibilidad de aplicación y separación, el bajo consumo de energía, la elevada tasa de recuperación de metales y la gran pureza del producto. Sin embargo, algunos de sus inconvenientes son el elevado consumo de reactivos químicos y la larga duración del proceso. Además, no es económicamente rentable para las baterías LFP y genera un gran volumen de aguas residuales que deben ser tratadas [14].

## 5.1.5 Otros procesos de reciclaje

Existen además otros procesos que combinan técnicas hidro o pirometalúrgicas, y que funcionan sólo para tipos específicos de baterías. Algunos ejemplos son:

**Reciclaje directo de cátodos de LIB por restauración dirigida:** El reciclaje directo es un enfoque de reciclaje de bajo costo que se basa en el “relitiado” (o recuperación dirigida) del CAM, sin necesidad de descomponer la estructura de materiales de la batería permitiendo así prescindir de los costos de refabricado. El reciclaje directo incluye procedimientos electroquímicos, mecánicos, de cátodo a cátodo y de “curación de cátodos” (marca registrada por la empresa Hulico LLC en EE.UU.) [20].

**Proceso de separación precisa:** Es una técnica eficaz para reciclar las LIB sin necesidad de pretratamiento. Implica la inmersión de las baterías en agua, donde los materiales separados no se mezclan y se pueden extraer fácilmente de la solución

acuosa. Cuando se sumergen, el único material de la LIB que reacciona con el agua es el grafito litiado (LiCx) presente en el ánodo, lo que permite que los materiales del ánodo se separen de la lámina de cobre y produzcan LiOH soluble, lo que facilita la recuperación del litio [14].

**Separación por corrientes de Foucault (o “eddy current”):** En este proceso, aplicable para reciclar baterías tipo LFP, se realiza primero la descarga y luego un desmantelamiento manual. La carcasa de aluminio se recicla directamente, mientras que el núcleo interno se separa en rodajas de ánodo, rodajas de cátodo y diafragma. Las rodajas de ánodo se raspan para separar la lámina de cobre del polvo de ánodo. El cátodo se trata térmicamente, se tritura y luego se alimenta a un separador de corrientes de Foucault (ECS) para separar los metales no ferrosos (aluminio) de la mezcla de LFP. La ECS depende principalmente de la capacidad del campo magnético para hacer levitar el componente conductor [14].

## 5.2 Comparación entre los diferentes procesos

La combinación de factores a considerar para la elección del proceso de reciclaje es compleja. La matriz de comparación puede incluir factores como eficiencia total del reciclaje, priorización de determinados materiales, consumo de energía y agua, generación de efluentes líquidos y gaseosos, dispo-

nibilidad de recursos tecnológicos, entre otros. En las siguientes tablas se presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de cada proceso, y parámetros de comparación en términos de eficacia y consumo de recursos [14].

Tabla 2: Características de los principales procesos de reciclaje de LIB.

Proceso	Ventajas	Desventajas	Desafíos
<b>Hidrometalúrgico</b>	Alta tasa de recuperación. Producto de alta pureza. Consumo energético bajo. Menores emisiones gaseosas. Alta selectividad.	Mayor cantidad de efluentes líquidos. Mayor tiempo de proceso.	Tratamiento del efluente líquido. Optimización del proceso.
<b>Pirómetalúrgicos</b>	Operación simple y de flujo corto. Versatilidad a partir de la baja necesidad de pretratamiento: no es necesario categorizar las LIB por tipos, y también pueden reciclarse otros productos comparables (p.e. RAEE). Alta eficiencia. Disponibilidad comercial del equipamiento.	No se recuperan Al, Li, y Mn. Necesidad de separación de metales fundidos. Consumo energético elevado. Baja eficiencia de recuperación, mayores emisiones gaseosas, elevado costo de tratamiento de efluentes gaseosos	Reducción de consumo energético y de la emisión de gases contaminados. Reducción de los riesgos ambientales.
<b>Reciclaje directo</b>	Ruta de recuperación corta. Bajo consumo de materiales. Ambientalmente seguro. Alta tasa de recuperación.	Altos requerimientos operativos y de equipamiento. Requiere pretratamiento y preselección de materiales (deben procesarse baterías de igual química). Recuperación incompleta.	Reducción de los costos de recuperación. Disminuir los requisitos para las diferentes categorías. Incrementar el desempeño del producto.

Fuentes: [14], [30].

Tabla 3: Parámetros de comparación de eficacia para procesos de reciclaje de LIB.

Proceso	Consumo de energía (MJ/kg de batería procesada)	Consumo de agua (L/kg de batería procesada)	Volumen de emisiones gaseosas (Kg de gas/kg de batería procesada)	Eficacia total (% de recuperación de materiales)
Hidrometalúrgico	5	9,5	1,5	37,54
Pirómetalúrgicos	13	2,6	2	12,32
Separación precisa	6	14	0,28	97,82
Reciclaje directo	43	3,9	1,8	64,50

Fuente: [14]

Con una perspectiva más amplia, en la Figura 9 se incluye en la comparación factores de mercado, costos y efectividad relativa para los principales metales [31].

	Maduración de la tecnología	Requerimiento de capital	Costo de operación	Complejidad técnica	Calidad del material recuperado	Cantidad de material recuperado	Generación de residuos	Uso de energía
Pirómetalúrgicos	5	1	5	5	1	3	2	1
Hidrometalúrgicos	4	3	3	3	3	4	3	3
Reciclado directo	2	3	1	1	2	5	4	3

	Recuperación de metales					
	Cobalto	Níquel	Cobre	Manganeso	Aluminio	Litio
Pirómetalúrgicos	5	5	5	2	Ninguno	1
Hidrometalúrgicos	5	5	4	2	5	3
Reciclado directo	5	5	5	5	5	5

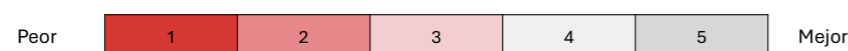


Figura 9: Comparación entre las familias de procesos de reciclaje de ULIB. Adaptado a partir de Harper et al. (2019) [31].

## 5.3 Lineamientos técnicos y normativos

### 5.3.1 Estándares técnicos

Si bien el número del EV en el mercado global se ha incrementado en los últimos años, la cantidad de vehículos que han alcanzado su EoL es todavía bajo. Como resultado, el desarrollo de estándares técnicos específicos sobre las técnicas de reciclaje de ULIB es aún limitado [4], [23]. Como un ejemplo referido específicamente al proceso de reciclaje de BEV, puede mencionarse:

**Estándar SAE J2974. Informe técnico sobre el reciclaje de baterías de vehículos (Technical Information Report on Automotive Battery Recycling)** [32]. Este documento de SAE International propone el vocabulario técnico a utilizar en el procesamiento de baterías al final de su vida útil (al momento de su transferencia al reciclador, desmantelador u otro tercero). También proporciona una recopilación de las actuales tecnologías y rutas de reciclaje, y su aplicación a diferentes químicas de baterías en su EoL. Si bien el documento es aplicable especialmente a LIB, aunque también contempla su aplicación a otros tipos de baterías.

En la República Popular China, el mercado más desarrollado en la manufactura y adopción de LIB para la movilidad, las autoridades han desarrollado tempranamente medidas para anticiparse a la cuestión de gestionar las baterías en EoL. Entre ellas destacan una serie de estándares y códigos naci-

onales que fueron introducidos entre 2015 y 2020, algunos de los cuales se refieren específicamente a la etapa del reciclaje [1]:

- **GB/T 33598-2017:** Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Especificación para desmantelamiento [33].
- **GB/T 34015-2017:** Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Evaluación de la capacidad residual [34].
- **GB/T 38698.1-2020:** Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Parte 1: Empaquetado y transporte [35]
- **GB/T 33598.2-2020:** Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Parte 2: Requisitos para el reciclaje de materiales [36].
- **GB/T 34015.2-2020:** Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Uso escalonado, parte 2: remoción [37].

Si bien estos documentos se encuentran en idioma chino en su versión original, se encuentran disponibles comercialmente versiones traducidas al inglés.

### 5.3.2 Normativa

Dentro del proceso integral de gestión de ULIB, la etapa del reciclaje es particularmente dependiente del desarrollo de marcos normativos o regulatorios sólidos que establezcan objetivos de gestión adecuada de materiales a nivel de estados o regiones, y a partir de ellos, integrar a los actores de la cadena de valor y distribuir las responsabilidades

racionalmente entre ellos. Esta situación tiene raíz básicamente en la ecuación económica del reciclaje, que es en general deficitaria. En el caso de las ULIB, el componente más redituable del reciclaje es la recuperación de los metales del cátodo, especialmente el cobalto y el níquel. Por lo tanto, ante la ausencia de un marco normativo adecuado, el

sector del reciclaje se orientaría exclusivamente a la recuperación de estos metales, para lo cual los procesos pirometalúrgicos son los más efectivos.

Ante la necesidad de que la recuperación de materiales abarque también a otros componentes de las LIB, es fundamental entonces el establecimiento de un marco normativo integral de gestión de baterías. Por lo tanto, estas regulaciones suelen estar enfocadas en la cadena de valor completa, estableciendo objetivos sectoriales como ser (1) niveles de recuperación de baterías usadas, o cuotas de uso de materiales reciclados en las LIB nuevas, y (2) esquemas de REP, para distribuir las responsabilidades a lo largo de la cadena de valor.

Las principales referencias de marcos normativos son las surgidas en las regiones o países con mayor desarrollo de la manufactura y el consumo de LIB: China, Unión Europea y Norteamérica (Estados Unidos y Canadá). López Hernández et al. (2024) [5] y Zagorodny (2023) [1] brindan una exhaustiva descripción de la evolución y alcance del marco normativo para la gestión integral de baterías en dichas regiones.

Específicamente en cuanto a la actividad del reciclaje, estas regulaciones son entonces clave para el impulso y fortalecimiento del sector. En general, no establecen pautas técnicas específicas sobre las tecnologías a utilizar, quedando liberado al mercado la definición de la secuencia de tecnologías más apropiada en cada caso. Sin embargo, al fijar metas sectoriales y los mecanismos de compensación económica del sistema, determinan las condiciones marco para dicha selección.

A modo de ejemplo, se describe la propuesta regulatoria del Reglamento de la UE sobre baterías (Reglamento (UE) 2023/1542), sancionado en 2023 [38]. Establece, entre otros, requerimientos relacionados con extender la durabilidad de las LIB de nueva manufactura, niveles mínimos de contenido de material reciclado en las baterías nuevas, trazabilidad en la cadena de suministro; todas medidas con aplicación en la etapa de manufactura. También impone objetivos de recolección de LIB portátiles usadas (70% para 2030), y prohíbe su eliminación o

uso para procesos de aprovechamiento energético, sino que todas las baterías deben ser destinadas a reutilización o reciclaje. En cuanto a lineamientos que repercuten específicamente en la etapa de reciclaje de ULIB, pueden mencionarse [5]:

- **Eficiencia general del reciclaje para LIB:** la recuperación de materiales reutilizables, medida en base al peso medio del material reciclado, debe ser 65% para 2025 y 70% para 2030.
- **Objetivos de recuperación específicos para metales seleccionados:** a saber, el 90 % para el cobalto, el cobre, el plomo y el níquel, y el 50 % para el litio, a alcanzarse para 2027. Para 2031, los niveles de recuperación deberían alcanzar el 95 % para el cobalto, el cobre, el plomo y el níquel, y el 80 % para el litio.

Estas medidas brindan impulso al sector del reciclaje, aunque no establecen directivas sobre los lineamientos técnicos a utilizar para alcanzar los objetivos propuestos. La elección de la metodología técnica queda liberada a las empresas recicladoras. Adicionalmente, medidas innovadoras sobre la disponibilidad de información sobre las baterías tendrán un impacto favorable en la etapa de reciclaje:

- **Requerimientos de etiquetado e información:** a partir de 2027, las LIB de nueva manufactura deben proveer, mediante un código QR, acceso a información relevante en el proceso de reciclaje, como durabilidad, capacidad de carga, requerimientos para recolección, presencia de sustancias peligrosas y riesgos de seguridad. Además, deben contar con un BMS que almacene la información y datos necesarios para determinar el SOH y la duración esperada de la vida útil. Este sistema deberá ser accesible tanto para los propietarios de las baterías, como para operarios que en su nombre realicen tareas de mantenimiento, y procesamiento post-primer uso.
- **"Pasaporte" de baterías:** a partir de 2026, las LIB de nueva manufactura deben contar con un sistema de intercambio electrónico de información, que sirva de registro electrónico.

## 6. Aspectos de seguridad en la gestión de ULIB

### 6.1 Caracterización de los riesgos de las LIB

Las LIB son fabricadas bajo lineamientos que las hacen dispositivos seguros de operar en condiciones de uso típicas. Sin embargo, su contenido de sustancias reactivas y de carga eléctrica puede generar riesgos en determinadas condiciones. Es importante que quienes usan o manipulan LIB conozcan estos riesgos y las precauciones que deben seguirse para su uso seguro tanto durante su vida útil como durante su gestión posterior [39]. A continuación se describen los riesgos más característicos [40], [41]:

#### Riesgos de seguridad

- **Incendio y explosión:** la combinación del contenido de sustancias reactivas al contacto con el aire, agua o la humedad, la carga eléctrica y el uso en algunos casos de electrolitos inflamables, puede generar incendios y hasta explosiones bajo determinadas circunstancias de uso, almacenamiento o transporte.
- **Fuga térmica:** la exposición de la batería a altas temperaturas, o la descarga o transmisión de carga eléctrica indeseada entre componente internos de la batería mediante una reacción en cadena o "runaway" que genera aún más liberación de calor. Se produce por defectos de fabricación o condiciones de uso inadecuadas. La consecuencia principal de este evento es la degradación de la batería, pero también en casos en que la descarga se descontrola, puede originar incendios o explosiones.
- **Descarga eléctrica:** Las baterías no pueden ser apagadas, por lo tanto el contacto accidental con ambos polos de una batería cargada puede llevar a descargas eléctricas o electrocución. Este evento es especialmente relevante en

BEV o módulos de almacenamiento de mayor dimensión.

#### Riesgos de toxicidad

- **Liberación de sustancias:** ante un eventual daño de la estructura de la batería durante su manipulación, pueden liberarse electrolitos con efectos tóxicos ante contacto directo o inhalación de sus vapores para personas potencialmente expuestas. En caso de un incendio o explosión, pueden ocurrir reacciones químicas que generan nuevos tipos de gases tóxicos.

#### Riesgo ambiental

- **Vertido no controlado de sustancias:** las sustancias que componen las LIB pueden afectar la integridad ambiental si son descargadas sin control o tratamiento adecuado al ambiente. Este riesgo es más relevante ante la derivación de ULIB a canales no adecuados para su gestión óptima, como ser el de los residuos domiciliarios.

Tabla 4: Tipos de riesgos derivados de las LIB y actores potencialmente afectados.

Tipo de riesgo	Evento asociado	Actores potencialmente afectados
Seguridad	Explosión e incendios	Usuarios, operarios, instalaciones, medio ambiente.
Seguridad	Fuga térmica	Usuarios, equipo de la batería.
Seguridad	Descarga eléctrica	Usuarios, operarios, instalaciones.
Tóxico	Liberación de sustancias con efecto tóxico.	Usuarios, operarios.
Ambiental	Vertido no controlado de sustancias	Medio ambiente (suelo, cuerpos de agua, fauna). Población asociada al mismo.

Fuente: elaboración propia a partir de [40], [42].

En general, la gestión de riesgos se realiza implementando un protocolo de evaluación y control que consta típicamente de cuatro pasos [42]:

1. **Identificar los peligros:** son eventos con un potencial daño a la salud humana y el ambiente (p.e. incendio, explosión, derrame de sustancias). La identificación implica no sólo conocer los eventos, sino también qué situaciones los causan o activan.
2. **Evaluar los riesgos:** a partir de conocer la probabilidad efectiva de que el peligro cause daños.

3. **Implementar controles:** aplicar medidas de mitigación de los riesgos. Para seleccionarlas, debe buscarse un balance entre protección y fiabilidad, y que sean razonables y viables para la empresa.
4. **Verificar los controles:** comprobación periódica de que los controles se encuentran correctamente implementados.

En la gestión de LIB existen situaciones o acciones específicas que originan los peligros, que es clave conocer y evaluar para evitarlas y minimizar los riesgos. En la siguiente tabla se describen las situaciones más típicas.

Tabla 5: Situaciones causantes de peligro más frecuentes que afectan a las LIB.

Origen del peligro	Situación causante de peligro	Etapa de uso o de la gestión de LIB con mayor exposición
Externo	Cortocircuitos eléctricos	Situaciones en las que la batería no se encuentra correctamente ensamblada para su uso: desmontaje, transporte, almacenamiento, revisión de SOH, reacondicionamiento, reciclaje.
Externo	Inadecuada gestión de la carga eléctrica (inadecuado procedimiento de carga y/o descarga)	Vida útil primaria, vida útil secundaria, revisión de SOH.
Externo	Abuso mecánico (p. ej. golpes)	Desmontaje, transporte, almacenamiento, revisión de SOH.
Externo	Abuso térmico (p. ej. exposición a temperaturas inadecuadas)	En todo momento.
Interno	Defectos de fabricación	Vida útil primaria.

Fuente: [40].

Estos factores y los riesgos asociados están presentes durante todo el ciclo de vida de las baterías, por lo tanto el uso y gestión de LIB debe realizarse siguiendo los lineamientos necesarios para prevenirlos. Sin embargo, la gestión de ULIB implica la exposición de las baterías a situaciones de movi-

miento (recolección y transporte) y almacenamiento temporal (previo a su reutilización o reciclaje) en las cuales los factores de riesgo pueden presentarse con mayor frecuencia [5]. Estas situaciones y las medidas requeridas para prevenir los riesgos son descritas a continuación.

## 6.2 Normativa en materia de seguridad para ULIB

Debido a los riesgos descritos, existen diversas regulaciones destinadas a asegurar un manejo seguro de las ULIB, en especial durante la etapa de transporte, por su complejidad en cuanto a presencia de peligros y diversidad de potenciales afectados.

### 6.2.1 Regulaciones internacionales

Las siguientes regulaciones aplican al transporte transfronterizo de LIB y ULIB.

#### Organización de las Naciones Unidas

De acuerdo con las "Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas" de la Organización

de las Naciones Unidas (ONU) (conocido como el Libro Naranja), edición 23° de 2023 [43], las LIB (tanto nuevas como usadas) se consideran mercancías peligrosas clasificadas en la Clase 9: “Sustancias y objetos peligrosos varios, incluidas las sustancias

peligrosas para el medio ambiente”. La Tabla 6 describe las categorías ONU definidas para diferentes tipos de LIB o productos que las contienen.

Tabla 6: Situaciones causantes de peligro más frecuentes que afectan a las LIB.

Nº de Id. ONU	Producto	Clase de peligro
UN 3480	Baterías de iones de litio, incluidas las de polímero de iones de litio.	9
UN 3481	Baterías de iones de litio embaladas con equipos que incluyen baterías de polímero de iones de litio.	9
UN 3090	Baterías de metal de litio, incluidas las baterías de aleación de litio.	9
UN 3091	Baterías de metal de litio embaladas con equipos que incluyen baterías de aleación de litio.	9

La inclusión de las LIB en la clasificación ONU conlleva la obligatoriedad de procedimientos específicos previo a su transporte, como ser su testeo de acuerdo a lo dispuesto en el Manual ONU de pruebas y criterios (véase apartado 4.4.2), y embalaje y etiquetado según protocolos específicos (Figura 10).

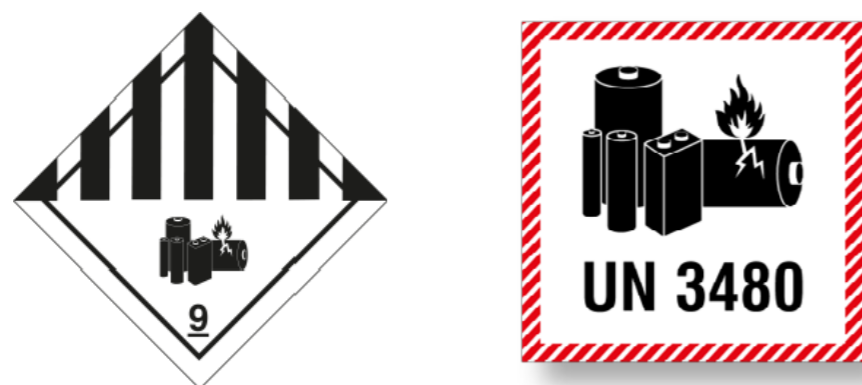


Figura 10: Etiquetado según ONU para transporte internacional de LIB [44].

Estas regulaciones están diseñadas en principio para baterías de primer uso, pero al no distinguir taxativamente entre estas y las ULIB, ambos tipos de baterías son alcanzadas. La evaluación del Manual de pruebas y criterios es la instancia que define específicamente si el producto reúne las condiciones de seguridad para su transporte.

Convenio de Basilea

Este tratado internacional regula los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, imponiendo el requerimiento del consentimiento informado previo al movimiento transfronterizo de las sustancias reguladas. Las

ULIB no figuran de manera explícita en los anexos I al VIII del Convenio, aunque algunas sustancias que las componen figuran en los anexos I y II. El convenio ha elaborado unas guías técnicas para el transporte transfronterizo de WEEE, la que incluye lineamientos para la identificación de baterías usadas o para reciclaje. Si las baterías han sido evaluadas según estos lineamientos, pueden ser

exceptuadas de los requerimientos normales de un residuo peligroso [5].

Actualmente (noviembre de 2024), el Convenio se encuentra en proceso de edición de una guía técnica para la gestión ambientalmente adecuada de baterías usadas que no sean de plomo-ácido [45].

## 6.2.2 Regulaciones regionales y nacionales

### Unión Europea

En la Unión Europea (UE), la Directiva sobre Baterías (2006/66/CE) fue una de las regulaciones pioneras sobre recolección, reciclaje y eliminación de baterías agotadas, incluyendo las LIB. Más recientemente, esta regulación ha sido actualizada y un nuevo Reglamento de la UE sobre Baterías ha sido sancionado en 2023. Si bien la regulación provee un marco de gestión muy amplio de las LIB, proponiendo por ejemplo objetivos de recolección, incorporación de materiales reciclados en baterías nuevas y la implementación de esquemas de REP, también incluye lineamientos técnicos sobre cuestiones de seguridad en la manipulación de baterías.

ADR (Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera): Proporciona directrices específicas para el transporte de LIB usadas.

### Estados Unidos

Regulaciones de Residuos Universales de la EPA: Estas regulaciones simplifican la gestión de residuos generados ampliamente, incluyendo baterías.

Proporcionan directrices específicas para la recolección, almacenamiento y transporte de baterías usadas.

Regulaciones del Departamento de Transporte (DoT): El DoT tiene requisitos específicos para el embalaje y envío de LIB usadas, considerándolas como materiales peligrosos. Para el transporte de ULIB, existen prohibiciones explícitas por vía aérea cuando éstas se encuentran al final de su vida útil [44].

### Colombia

En cuanto a las regulaciones colombianas, el Decreto 1079 de 2015 (Dto. Único del sector transporte) adopta las directrices de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) 1692:2013 (clasificación, marcado, etiquetado y rotulado de las mercancías peligrosas y de los vehículos), NTC 4435:2010 (hojas de datos de seguridad), NTC 4532:2010 (tarjetas de emergencia para transporte) y la NTC 3972:1996 (requisitos para el transporte de mercancías peligrosas, Clase 9) para el transporte terrestre de mercancías peligrosas por carretera.

## 6.2.3 Directrices específicas de la industria

### Directrices de PHMSA (Administración de Seguridad de Tuberías y Materiales Peligrosos)

En EE.UU., PHMSA proporciona directrices específicas para el transporte seguro de baterías de litio usadas, dañadas o retiradas para reciclaje o eliminación. Directrices de PRBA (Asociación de Baterías Recargables). Esta asociación de la industria proporciona mejores prácticas para la recolección, transporte y reciclaje de LIB usadas [44].

### Estándares IEC (International Electrotechnical Commission)

La norma IEC 62485 (parte 5) se aplica la instalación de una o más LIB estacionarias que tengan un voltaje de CC agregado máximo de 1500 V [46]. Brinda lineamientos sobre aspectos de seguridad asociados con la instalación, uso, inspección y mantenimiento y eliminación de baterías de iones de litio utilizadas en aplicaciones estacionarias.

## 6.3. Medidas de prevención de riesgos

### 6.3.1 Recolección y transporte

Dada la variedad de tipos de LIB y de canales de gestión de las mismas, las operaciones de transporte pueden presentar diversas situaciones causantes de peligro que requieren medidas de prevención específicas.

En el caso de las baterías provenientes de AEE, el proceso de recolección puede iniciarse en sitios específicos designados para que los usuarios depositen las ULIB (o “puntos verdes”, por ejemplo). En este caso, una vez dispuestas, las baterías son almacenadas transitoriamente hasta cada instancia de recogida. Para ello deben seguirse las pautas indicadas en el apartado 6.3.3 (Almacenamiento) a continuación.

En el caso de las baterías provenientes de EV, se presenta además el paso de su desmontaje del vehículo. Este procedimiento, al intervenir elementos con carga eléctrica de alto voltaje, debe ser realizado bajo condiciones específicas y exclusivamente por operarios calificados.

Para el transporte de ULIB, las medidas de precaución recomendadas son:

- Recubrir el suelo y paredes del vehículo con material dieléctrico, por ejemplo una lámina plástica

- Apilar los embalajes con residuos de baterías de litio en estibas ignífugas para facilitar la carga y descarga del vehículo y prevenir la generación de llama en caso de accidentes que afecten la integridad física de la batería.
- Nunca dismantelar o separar las partes de las baterías, como ser cubiertas o sistemas de control o BMS. Estos componentes son clave para mantener la integridad de la batería y para facilitar el proceso de diagnóstico y asignación de segunda vida.

## 6.3.2 Embalaje

El embalaje comprende las medidas transitorias de protección de las ULIB, destinadas a prevenir el contacto con agua o humedad, el contacto entre sí y el impacto físico [42]. En general:

- Se deben proteger y aislar eléctricamente los terminales de las baterías, para evitar cortocircuitos. Para ello se puede utilizar cinta aislante o empaquetado individual. El empaquetamiento debe también proteger a las baterías de posibles impactos y prevenir el movimiento durante el transporte.

- Colocar material de amortiguación dieléctrico e incombustible (p.e. arena, vermiculita) para rellenar el espacio vacío entre las celdas o baterías en el embalaje.
- El material de embalaje debe ser dieléctrico (cartón, madera, plástico), con resistencia física y mecánica correspondiente con el volumen de residuo. No usar embalajes ni elementos de sujeción metálicos.
- Nunca empaquetar residuos de baterías junto con otros tipos de residuos.

### 6.3.3 Almacenamiento

El almacenamiento es una instancia inevitable del procesamiento de ULIB luego del fin de su vida útil primaria, por parte de los SRyG por ejemplo. Las medidas recomendadas para minimizar los riesgos de seguridad en esta etapa son [13]:

- **Identificación:** señalizar y etiquetar adecuadamente a las ULIB indicando claramente su tipo, capacidad.
- **Separación adecuada:** colocar las ULIB de manera aislada de otras corrientes de residuos, idealmente en contenedores dedicados. Los contenedores deben ser resistentes y contar con tapas para evitar fugas y derrames. Deben estar también correctamente etiquetados con la señalización correspondiente para los residuos peligrosos.
- **Manipulación adecuada:** debe realizarse minimizando la posibilidad de golpes y caídas. Al apilarlas, debe evitarse el riesgo de aplastamiento. Además, deben protegerse los terminales de las baterías para evitar cortocircuitos o descargas eléctricas no controladas.
- **Condiciones ambientales adecuadas:** debe controlarse la temperatura, ventilación, exposición

a humedad para mantenerlas en valores adecuados. Debe evitarse la cercanía a procesos con llamas o calor excesivo, o vibraciones.

- **Clasificación:** las baterías deben clasificarse por tipo (según su química). No solo poseen riesgos diferenciados, sino que las medidas de contención (extinción del fuego en caso de incendio, por ejemplo) también pueden variar.
- **Prevenir la acumulación excesiva:** implementando un control periódico de la cantidad de ULIB almacenada y procedimientos que garanticen la entrega frecuente a gestores autorizados.

### 6.3.4 Reciclaje

Hasta tanto sean desmanteladas, las ULIB que ingresan en procesos de reciclaje presentan los mismos riesgos que durante su etapa útil.

Las baterías que son sometidas a tratamientos térmicos de reciclaje pierden su potencial de peligro al eliminar las sustancias (o combinación de ellas) que lo causan, asumiendo que la eliminación se realiza en condiciones de atmósfera controlada.

En cambio, el procesamiento mecánico (desmantelamiento manual o trituración) implica obligadamente la liberación de estas sustancias. Para prevenir los riesgos asociados, algunas de las medidas necesarias son:

- **Descarga completa:** la descarga profunda elimina el riesgo de descarga eléctrica e incendios por cortocircuitos. Puede realizarse mediante instrumentos o bien soluciones salinas (ver el apartado 5.1.1). El riesgo eléctrico por cargas residuales es mitigado además por el desmantelamiento de las baterías desde packs de más energía hacia niveles inferiores de almacenamiento (celdas) y se remueven los conectores entre ellos.
- **Procesamiento en condiciones inertes:** si la descarga y la trituración se realizan en una cámara de argón, o bien al vacío, se elimina el riesgo de incendio y explosión [5].

## 6.4 Gestión de incidentes producidos por LIB y ULIB

En paralelo con el creciente uso de LIB, se han incrementado los reportes de incidentes que involucran incendios y explosiones de las baterías. Terazono et al. (2024) [47] analizaron casos de incendios en plantas de tratamiento de residuos en Japón, concluyendo que la mayoría de las igniciones y otros incidentes se produjeron en la etapa de trituración y de transporte, con algunos incidentes en la fase de almacenamiento de residuos. En un estudio sobre la efectividad de diferentes medidas para la desactivación de incendios con LIB, Schraiber et al. (2023) presentan ejemplos de casos de incendios de sistemas de almacenamiento de energía (ESS) domiciliarios [48].

El personal de respuesta a incidentes con LIB debe encontrarse apropiadamente entrenado en los peligros específicos de este tipo de eventos, que involucran importantes riesgos a la salud y generan emisiones gaseosas perjudiciales al ambiente. Un incendio de LIB pueden generar fluoruro de hidrógeno en estado gaseoso, que es tóxico para las personas; a su vez, el agua utilizada para apagar

los incendios de LIB puede generar ácido fluorhídrico, que contamina el ambiente y puede afectar la calidad del agua. Considerando que el riesgo de incendio o explosión ya ha sido mitigado, puede existir además el riesgo de descargas eléctricas. Todos estos factores deben ser contemplados en el entrenamiento del personal [4].

Existen abundantes recursos bibliográficos que detallan las acciones concretas y en particular las preparaciones necesarias en materia de entrenamiento disponibilidad de equipamiento que son necesarias para el manejo de estos incidentes y su tratamiento en detalle excede el alcance de este documento. Se presentan a continuación ejemplos que pueden servir de orientación para una investigación más detallada.

#### Protocolos de actuación

Recharge, la asociación europea que nuclea a la industria de las LIB, ha desarrollado un manual de entrenamiento y rescate dirigido a las brigadas de

incendios que actúan en estos eventos. Describe los lineamientos básicos de acción ante un incendio de LIB en una instalación de almacenamiento [49]. El estudio “Consideraciones para la respuesta del servicio de bomberos a incidentes con sistemas residenciales de almacenamiento de energía en baterías” [48], es propuesto por el servicio de administración de incendios de Estados Unidos como el material de consulta más actualizado sobre la actuación ante incendios que involucran LIB de ESS domiciliarios [50]

#### Estándares técnicos

El estándar NFPA 855 de la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association, NFPA) establece requerimientos para la protección ante incendios en ESSs en función de la tecnología de las baterías, la ubicación, el tamaño y la separación entre instalaciones, así como de los sistemas de control y extinción de incendios existentes [51]. Estas indicaciones pueden eventualmente considerarse válidas también para las instalaciones de almacenamiento y reciclaje de

ULIB [4]. Entre las consideraciones adicionales que aborda la NFPA 855 se incluyen la ventilación, la detección, la señalización, los listados y las operaciones de emergencia en respuesta a incidentes en ESS.

El estándar ANSI/CAN/UL 9540A (ANSI) [52] aborda específicamente los riesgos de seguridad contra incendios en un ESS con LIB. Los datos obtenidos a partir de la metodología de ensayo descripta, se utilizan para identificar la mejor protección contra incendios para el sistema evaluado [4].

#### Guías ante emergencias de los fabricantes de equipos con LIB.

Los fabricantes originales (OEM) de EV elaboran manuales en donde se describen los procedimientos de actuación ante incidentes con las LIB utilizadas en los vehículos. La Asociación Nacional de Protección contra Incendios de Estados Unidos (NFPA) ha recopilado estos manuales, que son un recurso importante de información para la preparación de planes de emergencia [4].

## 7. Discusión

A partir de la información documental recolectada y de las observaciones recolectadas durante las visitas en Colombia, se enumeran algunos desafíos a los que se enfrenta el sector de la gestión de ULIB a nivel global y que aplican especialmente a la situación colombiana, en cuanto a los aspectos técnicos de la reutilización y el reciclaje. Para potenciar el desarrollo de la actividad, estos desafíos requerirán el diseño conjunto de soluciones.

#### Etapas de diagnóstico y reutilización:

**Variedad de químicas, diseños y estados de salud:** el proceso de evaluación debe ser adaptado individualmente a cada ULIB o lote de ULIB que se recibe para tratar, lo cual acarrea importantes costos de mano de obra y técnicos por la amplia disponibi-

lidad de equipos que resulta necesaria. Una de las causas principales de este problema es la falta de estandarización en la fabricación de LIB y la falta de previsión en su diseño de la posibilidad de una segunda vida de la batería.

**Acceso a la información del BMS:** el sistema electrónico de gestión de la batería se encuentra en casi todos los casos bloqueado para su acceso por terceros y cuando no está bloqueado, requiere complejos sistemas de interpretación de la información. El acceso a la información del BMS es clave para facilitar el diagnóstico de las ULIB.

**Provisión de nuevos BMS para las baterías reacondicionadas:** son todavía escasos los proveedores disponibles localmente para equipos nuevos,

aunque se anticipa un crecimiento del mercado. Si bien la manufactura local enfrenta desafíos por la complejidad del producto, se están desarrollando localmente componentes (p.e. Universidad de Antioquía).

**Certificación u homologación:** la evaluación o testeo de ULIB reacondicionadas por parte de empresas dedicadas a la valorización de baterías, se encuentra con el desafío (además de los mencionados arriba) de demostrar la calidad de los productos obtenidos mediante certificados o constataciones. Esto puede obedecer a causas como el carácter artesanal del trabajo, la falta de estándares técnicos que permitan respaldar el proceso y la escasa implementación de regulaciones en la materia. La falta de certificaciones u homologaciones conlleva un menor atractivo para los clientes de las baterías de segunda vida, y una barrera para el desarrollo del mercado.

**Costos del proceso y financiamiento:** este ítem forma parte del diseño de un plan de gestión de ULIB que deben ser concebido o propuesto a nivel de las autoridades sectoriales, con el fin de ordenar el flujo de baterías de una manera conveniente para el conjunto de la sociedad. Actualmente, el costo de evaluación y reacondicionamiento de las ULIB es asumido por las empresas de reciclaje. Al considerar además el costo de compra de las baterías, puede presentarse el caso de que la batería reacondicionada sea más cara que una nueva, si no se realiza una adecuada estructuración de los costos que promueva el reutilización. Una adecuada implementación de esquemas de REP es la solución de primera mano para esta dificultad.

#### Reciclaje:

**Viabilidad económica:** el desarrollo del sector de reciclaje ha estado en gran parte sustentado por el beneficio económico de la venta de materiales recuperados, en particular los metales del CAM (Co, Mn, Ni) y en menor medida el Cu y Fe. Ante la posibilidad de un crecimiento del uso de materiales menos rentables (como los usados en las LIB tipo NFP) la ecuación económica del sector podría perjudicarse, lo cual debe ser compensado con un esquema

integral como la REP, que recompense a las empresas también por los beneficios ambientales logrados con el reciclaje.

**Variedad de químicas y modelos:** en vista de la complejidad técnica que implica el proceso de reciclaje de ULIB, uno de los desafíos principales que enfrenta el sector es la gran variedad de tipos (químicas) y modelos de LIB utilizados por los fabricantes de vehículos y otras aplicaciones. Esto repercute no sólo en la calidad y composición de los productos esperados del reciclaje, sino también en la necesidad de ajustes continuos de los procesos para adaptarlos a los tipos de ULIB disponibles para reciclar[1]. Especialmente en el caso de las BEV, esta situación genera un fuerte estímulo a la vinculación por ejemplo mediante convenios a largo plazo entre las plantas de reciclaje y los OEM de vehículos, lo que permite prever con anticipación las características de los productos que deberán ser reciclados.

Adicional a lo anterior, en el caso específico de Colombia se resaltan los siguientes desafíos:

**Bajo flujo de ULIB disponibles para procesamiento:** actualmente, y dado el temprano estado de maduración de la movilidad eléctrica, la cantidad de ULIB disponibles para el diagnóstico y reciclaje es todavía bajo. Esto plantea la dificultad de lograr un pronto desarrollo de las capacidades de procesamiento (ante el crecimiento de los flujos esperados de baterías) con recursos económicos escasos.

Existen **espacios no cubiertos en la legislación actual sobre gestión de ULIB** o que presentan vacíos, lo cual puede ralentizar el desarrollo del sector. Un ejemplo es la clasificación de ULIB como residuo peligroso, en contraste con la regulación internacional y la situación de las baterías nuevas. Otra cuestión que requiere una pronta acción es la introducción de incentivos y priorización del tratamiento local de las ULIB, y de esta manera desincentivar su exportación al exterior para su tratamiento.

**Ausencia de lineamientos técnicos que valoricen el trabajo de diagnóstico y reparación de ULIB:** Las empresas no cuentan actualmente con esquemas

que permitan respaldar la calidad de las baterías revisadas y preparadas para una segunda vida mediante, por ejemplo una certificación de cali-

dad mediante estándares o lineamientos técnicos que sean reconocidos localmente. Esto dificulta su comercialización en el mercado local.

## 8. Referencias bibliográficas

- [1] J. P. Zagorodny, **Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular**, vol. N° 173 (LC/TS.2023/36). in serie Medio Ambiente y Desarrollo, vol. N° 173 (LC/TS.2023/36). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/7b764541-d263-484a-83ebefe11d0a2df6>
- [2] H. Heimer et al., **Recycling of Lithium-Ion Batteries 2023**, 2nd ed. PEM of RWTH Aachen University, 2023.
- [3] European Commission. Directorate General for Research and Innovation, **Categorisation system for the circular economy: a sector agnostic categorisation system for activities substantially contributing to the circular economy**. LU: Publications Office, 2020. Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/172128>
- [4] M. Kelleher, Y. Oyedirán, and A. Pollock, "Circularity and Recycling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles – Standardization and Safety Requirements," Canadian Standards Association (CSA), Toronto, ON, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Circularity-and-Recycling-of-Lithium-Ion-Batteries-for-Electric-Vehicles.pdf>
- [5] V. López Hernández et al., "Reciclaje y reúso de baterías de litio en América Latina y el Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales," Inter-American Development Bank, Feb. 2024. doi: 10.18235/0005660.
- [6] C. Helbig and M. Hillenbrand, "Principles of a Circular Economy for Batteries," in **Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis**, in The Materials Research Society Series. , Springer International Publishing, 2024, pp. 13–25. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-48359-2>
- [7] IEA, **Batteries and Secure Energy Transitions**. in World Energy Outlook 2023. IEA Publications, 2024. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- [8] IEA, "Global Critical Minerals Outlook 2024," International Energy Agency, Paris, 2024. Accessed: Jun. 08, 2024. [Online]. Available: <https://origin.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

- [9] A. Alessia, "Challenges for sustainable lithium supply: A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 300, 2021, doi: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126954.
- [10] S. Wu, N. Kaden, and K. Dröder, "A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling," *Batteries*, vol. 9, no. 6, p. 297, May 2023, doi: 10.3390/batteries9060297.
- [11] L. F. Quintero and G. Hernandez, "Cadena de valor de las baterías de litio," Departamento Nacional de Planeación (DNP), 573, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/573.pdf>
- [12] S. Passerini, L. Barelli, M. Baumann, J. Peters, and M. Weil, Eds., **Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis**. in The Materials Research Society Series. Cham: Springer International Publishing, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-48359-2.
- [13] Secretaría Distrital de Ambiente, **Guía sobre la gestión adecuada de las baterías de litio**. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2024. [Online]. Available: [https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/7025375/Guia+de+baterias+actualizada+-+24+julio+2024\\_compressed.pdf/3f1ace77-1467-4145-a6b0-72f43725eb62](https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/7025375/Guia+de+baterias+actualizada+-+24+julio+2024_compressed.pdf/3f1ace77-1467-4145-a6b0-72f43725eb62)
- [14] S. Al-Asheh, A. Aidan, T. Allawi, F. Hammoud, H. Al Ali, and M. Al Khamiri, "Treatment and recycling of spent lithium-based batteries: a review," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, no. 26, pp. 76–95, 2024, doi: 10.1007/s10163-023-01842-1.
- [15] TechSci Research, "Manufacturing Lithium-Ion Batteries," TechSci Research. Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.techsciresearch.com/blog/manufacturing-lithium-ion-batteries/29.html>
- [16] I. Buchmann, "BU-205: Types of Lithium-ion," Battery University. Accessed: Sep. 13, 2024. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithiumion>
- [17] P. A. Christensen, W. Mroziak, and M. S. Wise, "A Study on the Safety of Second-life Batteries in Battery Energy Storage Systems," Office for Product Safety and Standards, Birmingham, UK, Jan. 2023.
- [18] M. Bianchi and M. Cordella, "Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade," *Ecol. Econ.*, vol. 203, p. 107607, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ecolecon.2022.107607.
- [19] R. Santana, **Propuesta de marco regulatorio para baterías fuera de uso provenientes de la electromovilidad: requisitos de ingreso, reciclaje y utilización en segunda vida para almacenamiento estacionario de energía**. in Documentos de Proyectos, no. (LC/TS.2024/57). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.
- [20] P. M. Tembo, C. Dyer, and V. Subramanian, "Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure," *NPG Asia Mater.*, vol. 16, no. 1, p. 43, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41427-024-00562-8.

- [21] A. Tankou, G. Bieker, and D. Hall, "Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches," The International Council on Clean Transportation ICCT, Washington, DC, Feb. 2023.
- [22] J. Zhu et al., "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries," *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 2, no. 8, p. 100537, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.
- [23] X. Bustamante, A. Orfanos, R. Tedesco, and M. Zill, "The positive side of batteries: The role of standards in supporting sustainability requirements," Environmental Coalition on Standards (ECOS), Brussels, May 2020. [Online]. Available: [www.ecostandard.org](http://www.ecostandard.org)
- [24] A. Manhart, F. Adjei, V. Hernández López, and Y. Baron, "Measures Catalogue for Improving the Circularity of Batteries Used in E-Buses," Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, Apr. 2023.
- [25] V. Ruiz, **Standards for the performance and durability assessment of electric vehicle batteries: possible performance criteria for an Ecodesign Regulation.**, vol. EUR 29371 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/24743>
- [26] ANSI/CAN/UL, **Evaluation for Repurposing or Remanufacturing Batteries**, 1974:2023, 2023. [Online]. Available: <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=UL1974>
- [27] IEC, **Repurposing of secondary batteries - Part 1: General requirements**, International Standard IEC 63330-1:2024, Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66561>
- [28] **UN, UN Manual of Tests and Criteria Rev. 8 (2023)**, 8th ed. New York: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2023. Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/un-manual-tests-and-criteria-rev8-2023>
- [29] H. Pinegar and Y. R. Smith, "Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries, Part I: Commercial Processes," *J. Sustain. Metall.*, no. 5, pp. 402–416, 2019, doi: 10.1007/s40831-019-00235-9.
- [30] X. Yu et al., "Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries' Recycling: A Perspective," *Glob. Chall.*, vol. 6, no. 12, p. 2200099, Dec. 2022, doi: 10.1002/gch2.202200099.
- [31] G. Harper et al., "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 75–86, Nov. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- [32] SAE, **Technical Information Report on Automotive Battery Recycling**, SAE J2974, Nov. 02, 2019. [Online]. Available: [https://www.sae.org/standards/content/j2974\\_201902/](https://www.sae.org/standards/content/j2974_201902/)
- [33] Standardization Administration of China (SAC), **Recycling of traction battery used in electric vehicle - Dismantling specification**, GB/T 33598-2017, Dec. 05, 2017. [Online]. Available: <https://www.codeofchina.com/standard/GBT33598-2017.html>

- [34] Standardization Administration of China (SAC), **Recycling of traction battery used in electric vehicle - Test of residual capacity**, GB/T 34015-2017, Dec. 07, 2017. [Online]. Available: <https://www.chinesestandard.us/ja/products/gbt34015-2017>
- [35] Standardization Administration of China (SAC), **Recycling of traction batteries used in electric vehicle - Management Specification. Part 1: Packing and Transporting**, GB/T 368698.1-2020, Mar. 31, 2020. [Online]. Available: <https://www.chinesestandard.us/products/GBT368698-1-2020>
- [36] Standardization Administration of China (SAC), **Recycling of traction batteries used in electric vehicle - Management Specification. Part 2: Materials Recycling Requirements**, GB/T 368698.2-2020, Mar. 31, 2020. [Online]. Available: <https://www.chinesestandard.us/ja/products/gbt33598-2-2020>
- [37] Standardization Administration of China (SAC), **Recycling of traction batteries used in electric vehicle - Echelon use - Part 2: Removing requirements**, GB/T 34015.2-2020, Mar. 31, 2020. [Online]. Available: <https://www.chinesestandard.us/products/GBT34015-2-2020>
- [38] Parlamento Europeo, **Reglamento (UE) 2023/1542 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**. 2023. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>
- [39] GDV German Insurance Association, **Lithium Batteries**, VdS 3103en : 2019-06 (03), 2019.
- [40] Environmental Protection Agency of Ireland, **Guidance on the Safe Storage of Lithium-Ion Batteries at Waste Handling Facilities**. County Wexford, Ireland, 2023.
- [41] I. Sanchís Chilet and F. Lleches Barber, "Guía para el uso y almacenamiento seguro de baterías de litio," *Ind. Quím.*, no. 106, Sep. 2022.
- [42] EPA Victoria, **Guía de almacenamiento y gestión de pilas y baterías usadas**. Melbourne: Environment Protection Authority Victoria (EPA Victoria), 2021.
- [43] UN, **Recommendations on the transport of dangerous goods (Volume I)**, 23rd revised edition. New York and Geneva: United Nations Publications, 2023. Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: [https://unece.org/sites/default/files/2023-08/ST-SG-AC10-1r23e\\_Vol1\\_WEB.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2023-08/ST-SG-AC10-1r23e_Vol1_WEB.pdf)
- [44] PHMSA, "Lithium Battery Guide for Shippers," Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, PHH50-0186-0921, Sep. 2021.
- [45] Secretariat of the Basel Convention, "Second meeting of the small intersessional working group on waste batteries technical guidelines," Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal. Accessed: Nov. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.basel.int/Implementation/Wastebatteries/Meetings/WasteBatteriesSIWG2Nov2024/tabid/10037/Default.aspx>

- [46] IEC, **Safety requirements for secondary batteries and battery installations - Part 5: Safe operation of stationary lithium ion batteries**, International Standard IEC 62485-5:2020, Nov. 25, 2020. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/29086>
- [47] A. Terazono, M. Oguchi, H. Akiyama, H. Tomozawa, T. Hagiwara, and J. Nakayama, "Ignition and fire-related incidents caused by lithium-ion batteries in waste treatment facilities in Japan and counter measures," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 202, p. 107398, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107398.
- [48] A. Schraiber, A. Barowy, B. Gaudet, and V. Kimmerly, "Considerations for Fire Service Response to Residential Battery Energy Storage System Incidents," UL Fire Safety Research Institute, Apr. 2023 [Online]. Available: [https://www.iaff.org/wp-content/uploads/IAFF\\_DOE\\_ResidentialESSConsiderations\\_Final.pdf](https://www.iaff.org/wp-content/uploads/IAFF_DOE_ResidentialESSConsiderations_Final.pdf)
- [49] RECHARGE, "Rescue and training manual for lithium-ion batteries in storage." RECHARGE aisbl & The International Association of Fire and Rescue Services (CTIF), May 12, 2014. Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <http://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2020/03/RESCUE-AND-TRAINING-MANUAL-LITHIUMBATTERY-IN-STORAGE-2014-12-05.pdf>
- [50] US Fire Administration, "Responding to Fires that Include Energy Storage Systems Using Lithium-ion Battery Technology are a New and Evolving Hazard," Lithium-Ion Batteries. Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.usfa.fema.gov/blog/responding-to-fires-that-include-energy-storage-systems-are-a-new-and-evolving-hazard/>
- [51] NFPA, **Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems**, NFPA 855, 2023. Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/codes-andstandards/nfpa-855-standard-development/855>
- [52] ANSI/CAN/UL, **Standard for Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems**, UL 9540A, 2019. Accessed: Nov. 15, 2024. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/standards/ul/ul9540aed2019>
- [53] M. Bielewski et al., **Analysis of sustainability criteria for lithium-ion batteries including related standards and regulations**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/811476>

## Anexo 1: Recopilación de estándares técnicos internacionales

La siguiente tabla enumera los estándares técnicos mencionados a lo largo del presente documento. Se trata de una selección orientativa y no debe considerarse como una lista exhaustiva de los estándares existentes en la materia. Las fuentes de información han sido los estudios de [1], [4], [23], [53] e información propia.

Organización	Denominación	Título	Referencia
<b>1. Testeo y diagnóstico de ULIB</b>			
ANSI/CAN	UL 1974:2023	Estándar para la evaluación y reutilización de baterías	[26]
IEC	IEC 63330-1:2024	Requisitos generales para el reutilización de baterías secundarias	[27]
<b>2. Reciclaje de ULIB</b>			
SAE	SAE J2974	Informe técnico sobre el reciclaje de baterías de vehículos	[32]
SAC (China)	GB/T 33598-2017	Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Especificación para desmantelamiento	[33]
SAC (China)	GB/T 34015-2017	Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Evaluación de la capacidad residual	[34]
SAC (China)	GB/T 38698.1-2020	Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Parte 1: Empaquetado y transporteww	[35]
SAC (China)	GB/T 33598.2-2020	Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Parte 2: Requisitos para el reciclaje de materiales	[36]
SAC (China)	GB/T 34015.2-2020	Reciclaje de baterías para tracción de vehículos eléctricos - Uso escalonado, parte 2: remoción	[37]
<b>3. Aspectos de seguridad en el manejo de ULIB</b>			
IEC	IEC 62485	Requisitos de seguridad para baterías secundarias e instalaciones de baterías. Parte 5: Funcionamiento seguro de baterías estacionarias de ion litio.	[46]
NFPA	NFPA 855	Norma para la instalación de sistemas estacionarios de almacenamiento de energía	[51]
ANSI/CAN	UL 9540A	Estándar sobre el método de ensayo para evaluar la propagación de incendios por fuga térmica en sistemas de almacenamiento de energía en baterías	[52]

Referencias:

- **ANSI:** American National Standards Institute. Algunos estándares producidos en conjunto entre ANSI y la CAS (Canadian Association of Standards) son denominados "ANSI/CAN".
- **IEC:** International Electrotechnical Commission (Global)
- **SAE:** SAE International (EE.UU.)
- **SAC:** Standardisation Administration of China (China)
- **NFPA:** National Fire Protection Association (EE.UU.)



Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Registered offices  
Bonn and Eschborn

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36  
53113 Bonn, Germany  
T +49 228 44 60-0  
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 - 5  
65760 Eschborn, Germany  
T +49 61 96 79-0  
F +49 61 96 79-11 15

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)