

Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular

Juan Pablo Zagorodny



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Trabajando por un futuro productivo, inclusivo y sostenible



Financiado por la Unión Europea



cooperación alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

SERIE

MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

173

Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular

Juan Pablo Zagorodny



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Financiado por
la Unión Europea



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Juan Pablo Zagorodny, Consultor de la Unidad de Políticas para el Desarrollo Sostenible, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Contó con los aportes de Karina Martínez y José Javier Gómez García, ambos funcionarios de dicha División. Este estudio se elaboró en el marco del programa Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MINSUS), ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. También contó con el apoyo del programa EUROCLIMA+, financiado por la Unión Europea.

Se agradecen las contribuciones y comentarios de Silvana Martínez, del Ministerio de Ambiente del Uruguay, y de Emiliano Roselló, del Proyecto MOVÉS y el Ministerio de Industria, Energía y Minería del Uruguay. Se agradece, asimismo, a Beatriz Pulido Mönckeberg, Coordinadora de Comunicaciones del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, por su colaboración y sus comentarios al documento.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son del autor y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de las Naciones Unidas o las de los países que representan.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN: 1680-8886 (versión electrónica)
ISSN: 1564-4189 (versión impresa)
LC/TS.2023/36
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2023
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-01287

Esta publicación debe citarse como: J. P. Zagorodny, "Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular", *serie Medio Ambiente y Desarrollo*, N° 173 (LC/TS.2023/36), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	7
Introducción	9
I. Vehículos eléctricos, sus baterías y la necesidad de una gestión integral de su ciclo de vida	13
A. Evolución de los vehículos eléctricos y sus baterías	14
B. Descripción macro de las clases de vehículos eléctricos y sus baterías	17
C. El crecimiento de los mercados de vehículos eléctricos	20
1. Los volúmenes actuales y las perspectivas de mercados futuros	22
2. Evolución de los modelos disponibles de vehículos eléctricos	23
3. El impulso de los sectores institucionales	23
4. La situación en América Latina	24
D. Los tipos de baterías actuales en los vehículos eléctricos y sus características generales	30
1. Concepto de una batería secundaria o recargable	31
2. La batería de plomo-ácido	31
3. Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)	32
4. Baterías de litio	33
5. Supercapacitores	33
E. Componentes de una batería, las químicas más comunes y los detalles constructivos	35
1. Celdas de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)	37
2. Celdas de litio, sus componentes y químicas más comunes	38
3. Nivel de sistemas o <i>packs</i>	43
4. Sistemas de control (BMS)	44
F. Implicancias del crecimiento de la electromovilidad en la demanda de materiales	46
G. Los materiales y minerales presentes en baterías de litio con valor de reciclaje	48

H.	Las tecnologías futuras de las baterías de los vehículos eléctricos	52
I.	La cadena de fabricación de baterías de litio	56
II.	La importancia de la gestión integral de las baterías de litio en desuso: minería secundaria y economía circular	61
1.	El costo ambiental de la batería de litio impacta en la sostenibilidad de los vehículos eléctricos.....	64
III.	Los procesos de la gestión integral de las baterías	67
A.	El manejo de residuos de baterías de litio plantea riesgos de seguridad que deben prevenirse	69
B.	La vida útil y el ciclo de vida una batería: estado de carga y estado de salud	70
C.	El circuito de las baterías en desuso de los vehículos eléctricos.....	72
D.	El desmontaje final de una batería de litio de un vehículo eléctrico.....	75
E.	La segunda vida de las baterías, su reparación y reacondicionamiento	77
F.	Los procesos de reciclaje de los materiales de baterías según su tipo	87
1.	Desactivación	88
2.	Tratamiento pirometalúrgico	89
3.	Tratamiento mecánico	89
4.	Tratamientos hidrometalúrgicos	89
G.	El mercado del final de vida de las de litio y níquel-manganeso	98
1.	América Latina	99
IV.	La regulación de la gestión integral de baterías retiradas de vehículos eléctricos	103
A.	Las clasificaciones de los residuos de baterías	106
B.	Algunos ejemplos de situaciones regulatorias de baterías	107
1.	Estados Unidos de Norteamérica.....	107
2.	Unión Europea.....	109
3.	Lista europea de residuos	114
4.	España.....	115
5.	China, ¿incentivos al reciclaje de baterías necesarios?	115
6.	América Latina	120
7.	Chile	120
8.	Uruguay.....	121
9.	Colombia.....	122
C.	Los actores involucrados en el ciclo de vida de las baterías de vehículos eléctricos	123
D.	La responsabilidad extendida al productor/importador de las baterías	124
E.	La recolección de pilas y packs de litio sueltos, peligro de incendio en los contenedores	125
F.	Mecanismos de trazabilidad desde el origen	127
G.	Criterios de aceptación y clasificación de baterías en desuso	128
H.	Aprobación de instalaciones de procesamiento.....	128
V.	Conclusiones y recomendaciones para una gestión integral de baterías con una estrategia de economía circular	131
	Bibliografía	137
	Anexo	149
	Serie Medio Ambiente: números publicados	154

Cuadros

Cuadro 1	Conceptos básicos	18
Cuadro 2	Clases de vehículos eléctricos a batería y tamaños típicos de sus baterías	20
Cuadro 3	Cifras de avances de la electromovilidad en Chile a abril de 2022.....	25
Cuadro 4	Características de energía y potencia, por volumen y por peso, de distintas baterías a nivel de celdas y de supercapacitores.....	35
Cuadro 5	Descripción de los distintos niveles dentro de un sistema o pack de baterías	36
Cuadro 6	Tipos de baterías de litio por la química de sus cátodos y sus características.....	39
Cuadro 7	Variantes de celdas níquel-manganeso-cobalto y fórmula por la proporción de estos materiales en su cátodo	39
Cuadro 8	Características de packs de tres modelos de autos eléctricos de 2014.....	45
Cuadro 9	Proyección de aumento de demanda de materiales de baterías de litio según dos fuentes	48
Cuadro 10	Proporciones de litio en los compuestos producidos por la minería	50
Cuadro 11	Nuevas plantas de baterías anunciadas por fabricantes de vehículos eléctricos a octubre 2021.....	59
Cuadro 12	Cantidad de salmuera para extraer litio en salares de la Puna por un método de extracción directa	65
Cuadro 13	Parámetros, abreviaciones y conceptos básicos del uso y envejecimiento de una batería.....	70
Cuadro 14	Resumen de fortalezas y debilidades de la cadena de valor de las baterías, comparando Unión Europea y América Latina.....	100
Cuadro 15	Diferentes aspectos que influyen en la gestión de baterías usadas.....	105
Cuadro 16	Estándares y códigos nacionales para el tratamiento de residuos de vehículos eléctricos	118
Cuadro 17	Algunas medidas a considerar, agrupadas en ejes de gestión de baterías retiradas de vehículos eléctricos	134

Gráficos

Gráfico 1	Proyección estimada del volumen de baterías de vehículos eléctricos en desuso en Uruguay	27
Gráfico 2	Comparación de parámetros de celdas de baterías de litio, por la química de sus cátodos	42
Gráfico 3	Minerales en la batería de un vehículo eléctrico de pasajeros con un pack de baterías de litio de aproximadamente 50 kWh	48
Gráfico 4	Composición de un sistema o pack de baterías de un auto eléctrico de pasajeros	49
Gráfico 5	Cantidad promedio de cobre utilizada en vehículos, por tipo de vehículo	51
Gráfico 6	Baterías presentes y posibles baterías futuras, con su energía específica	53
Gráfico 7	Dominancia de China en la cadena de suministro de baterías al 2019	57

Recuadros

Recuadro 1	Inestabilidad térmica y riesgo de incendios en baterías de litio	75
Recuadro 2	Importante consideración sobre el uso de celdas no homogéneas para reensamblado de packs	84
Recuadro 3	Es importante no acumular baterías de litio sin su correcto aislamiento	129

Diagramas

Diagrama 1	El flujo de materiales, las baterías de los vehículos eléctricos y sus materiales en una economía circular	14
Diagrama 2	Esquemas de vehículos híbridos y eléctricos y el tipo de energía que utilizan	19
Diagrama 3	Componentes y funcionamiento de una celda de iones de litio	37
Diagrama 4	Esquema de la fabricación de celdas, incluyendo la fabricación de electrodos	56
Diagrama 5	Esquema de la fabricación de celdas, incluyendo la fabricación de electrodos.....	62
Diagrama 6	Circuito de packs o sistemas de baterías de 2 clases de vehículos eléctricos livianos y grandes	73
Diagrama 7	Circuito de packs hasta segunda vida y vuelta a tratamiento cuando finaliza la segunda vida	78
Diagrama 8	Funciones de la acumulación estacionaria de energía conectada a redes eléctricas	80
Diagrama 9	Factores a tener en cuenta al evaluar la viabilidad del reuso de baterías de litio usadas en aplicaciones de segunda vida	83
Diagrama 10	Ámbitos de la gestión de residuos que se relacionan con la gestión de las baterías de los vehículos eléctricos	105
Diagrama 11	Ejemplos de etiquetas de advertencia e identificación de tipos de baterías reciclables en Japón	126

Resumen

El rápido crecimiento del mercado de vehículos eléctricos es un fenómeno global e irreversible, y una estrategia clave de los gobiernos para cumplir con las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aprovechar la mayor eficiencia energética que ofrece la motorización eléctrica y mejorar la calidad del aire en los centros urbanos, entre otros objetivos. Al mismo tiempo, el creciente número de vehículos eléctricos presenta un desafío para la gestión de residuos de sus baterías. Por ello, este trabajo explora el estado actual de las técnicas que se aplican para la reutilización y reciclaje de baterías de la movilidad eléctrica, y los desafíos que ésta plantea. Se incluye una perspectiva de los mercados de vehículos eléctricos, de las baterías, y de los posibles usos de sus residuos y materiales a recuperar, así como una revisión del mercado de dichos materiales.

Existe evidencia de que las baterías en los vehículos eléctricos pueden durar largos períodos, según sus cuidados y el uso que le den los conductores. Al cabo de su primer uso, éstas pueden ser reutilizadas en aplicaciones menos exigentes, típicamente para acumulación estacionaria de energía. De no ser factible una segunda vida, el reciclaje de las baterías usadas puede presentar una oportunidad, al ser una valiosa fuente secundaria de materiales, siendo parte así de una estrategia de economía circular.

Además, se estudia la situación regulatoria actual al respecto de los residuos de baterías, en algunos países y regiones, donde tienden a enmarcarse en regulaciones previas sobre manejo de residuos en general, invocando el principio de responsabilidad extendida del productor y apuntando hacia la economía circular. Se concluye con algunas recomendaciones para la formulación de nuevas regulaciones y políticas sobre la gestión integral de estas baterías, particularmente enfocándose en la situación y desafíos concretos de América Latina.

Introducción

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar y reportar las posibilidades técnicas y regulatorias de la gestión de las baterías retiradas de la movilidad eléctrica cuando alcanzan el final de su vida útil, a los efectos de reutilizarlas en los circuitos productivos, en el marco de una estrategia de economía circular.

Promover la economía circular ayuda a alcanzar el desarrollo sostenible, en línea con la Agenda 2030, al propiciar avances en todas sus dimensiones: social, económica y ambiental. Sin embargo, para ello se requiere cambiar el actual modelo de producción y diseño de los productos, hacer sostenibles los patrones de consumo e impulsar mejoras en la prevención, la reutilización, el reciclado, la recuperación de energía y la disposición final de los residuos. Desde la perspectiva de diversos autores, la economía circular consiste en preservar el valor de los materiales y productos durante el mayor tiempo posible, evitando enviar de regreso a la naturaleza la mayor cantidad de desechos que sea posible y logrando que estos se reintegren al sistema productivo para su reutilización (CEPAL, 2020; De Miguel, 2021).

Comenzada la tercera década del siglo XXI, frente a la evidente urgencia que plantea el cambio climático y una creciente conciencia ambiental de la población en general, el mundo está asistiendo a una acelerada transición en las tecnologías y las formas de energía que se utilizan. En particular, en el sector del transporte, que invariablemente es uno de los sectores que más energía demanda y más contaminación provoca, se están dando las condiciones para una transformación radical. Con el objetivo de reducir las fuentes que emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes locales, como óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado, que afectan a la salud pública en las ciudades, se está desarrollando en el sector transporte una transición hacia el uso de vehículos eléctricos, como alternativa a los de combustión.

La gran mayoría de estos vehículos usan baterías de iones de litio (*lithium-ion battery* en inglés), como reserva de energía a bordo, gracias a su mayor densidad de energía, su larga vida útil, y sus altas capacidades de carga y descarga. Una parte menor de vehículos eléctricos, algunos de los llamados vehículos híbridos, utilizan todavía baterías de níquel e hidruro metálico, pero se espera que hacia 2030 prácticamente todos utilicen baterías de litio, incluso en formas más avanzadas que las actuales. Probablemente también se comience a usar baterías de nuevas tecnologías, similares a las de litio, pero

utilizando iones diferentes, como el de sodio. Aun así, las baterías de litio tendrán un largo reinado en las aplicaciones de movilidad más livianas, y coexistirán con las de sodio. En los capítulos del documento se dan detalles de cada una de estas tecnologías de baterías.

Actualmente, las baterías de litio se encuentran alimentando de energía a casi todos los objetos tecnológicos que nos rodean, desde teléfonos celulares, tabletas y notebooks, hasta bicicletas eléctricas, drones y robots. En particular las baterías de litio se encuentran en las nuevas formas de movilidad impulsada por motores eléctricos. La movilidad eléctrica representa la demanda predominante de este tipo de baterías a partir de 2019, muy por encima de todas las otras aplicaciones.

La creciente demanda de vehículos eléctricos supone desafíos para las cadenas de suministro de materias primas (minerales y materiales compuestos), en particular, pero no únicamente para la fabricación de sus baterías, y para la gestión de éstas, una vez terminada su vida útil, ya sea para su reutilización o segunda vida, o bien, para el reciclaje de sus materiales.

Algunas de las baterías que ya no tienen capacidad para la función original pueden ser reacondicionadas para cumplir una nueva función o segunda vida con demandas menos exigentes. En general la reutilización, siempre que sea factible, será más fácil de implementar, más flexible en cuanto a las condiciones de mercado, y más eficiente en cuanto a los recursos necesarios, que el reciclaje de los materiales de sus componentes. No obstante, algunos de los materiales que se pueden recuperar de las baterías, al final de la primera o de la segunda vida, son muy valiosos, y los grados de recuperación alcanzados con las nuevas tecnologías, cuando existe la combinación de los volúmenes suficientes de baterías usadas, los circuitos adecuados de recolección, y las políticas de incentivo adecuadas, pueden justificar la factibilidad de los emprendimientos. En algunos países como China y Japón, se han establecido sistemas de incentivos cruzados entre las agencias de protección ambiental y los productores, recolectores y tratadores de las baterías usadas, en forma escalonada y transitoria, para asegurar la puesta en marcha del sistema de gestión integral de las mismas.

Las distintas clases de vehículos eléctricos implican también distintas clases de baterías, y, por lo tanto, distintos procesos para su tratamiento ya sea reutilización o reciclaje, una vez terminada su primera vida útil. En los próximos capítulos se introducirán los tipos de vehículos eléctricos y los detalles de la química y la ingeniería de sus baterías, así como las distintas formas y posibilidades de disponer, revalorizar, o reciclar, esta clase de residuos y sus componentes materiales al final de su vida.

El presente trabajo considera la reutilización y reciclado de las baterías provenientes solamente de la movilidad eléctrica y se enfoca particularmente en los vehículos eléctricos a batería y los híbridos enchufables, es decir, en los vehículos que se pueden enchufar a un cargador externo, y que, por lo tanto, son los que tienen baterías más voluminosas e importantes para el funcionamiento de estos vehículos. Nótese que en la definición de vehículos eléctricos a batería se incluye también los vehículos livianos, y, de hecho, se resaltarán su relevancia en lo que hace al manejo de sus baterías usadas, por constituir una corriente de posibles residuos más dispersos y difíciles de recolectar, que la proveniente de vehículos eléctricos más grandes como autos, utilitarios, buses y camiones, etc.

Se mencionarán solo brevemente los casos de otras clases de vehículos eléctricos como los vehículos híbridos no-enchufables, y los vehículos a celda de combustible de hidrógeno. Las razones de esta elección radican en que estas 2 clases contienen baterías relativamente pequeñas, con tecnologías análogas, y según las proyecciones tendrán un mercado más limitado en el mediano y largo plazo que el de los vehículos eléctricos a batería y los híbridos enchufables.

También se analizarán razones técnicas y de mercado por las que será prioritario enfocarse en las baterías de litio y níquel-hidruro metálico, pese a que puede haber otras formas y dispositivos de acumulación o generación de energía (como supercapacitores, y celdas de hidrógeno) en los vehículos eléctricos, particularmente en híbridos y con celda de combustible.

Por otro lado, en este trabajo se resaltarán que también se debe tomar en cuenta los EV livianos y de movilidad personal, porque si bien contienen baterías más pequeñas, livianas y simples, su vida útil más corta y la mayor tasa de expansión de estos EV producirán un volumen muy apreciable de baterías en desuso provenientes de este sector, que usualmente no se considera parte de los residuos de la industria electrónica (Clerc, 2021). Existen razones para esperar que, dentro de la movilidad liviana, el uso de modos de micro movilidad como las bicicletas (e-bikes) y monopatines (e-scooters), individuales o en flotas compartidas, será ampliamente promovido, y sus cantidades crecerán en muchas ciudades modernas, contribuyendo a ahorrar viajes realizados con modos más pesados y menos eficientes (ITDP, 2019).

En este tema multidimensional convergen varias especialidades, que van desde la industria automotriz hasta los mercados que abastece la industria minera, pasando por la química y física de las baterías y de los procesos que requieren energía, la ingeniería ambiental, para el tratamiento de los residuos y de sus posibles impactos ambientales, hasta la formulación de políticas públicas y regulaciones para una correcta gestión integral de los residuos.

En el capítulo I se introducirán los mercados y características de los vehículos eléctricos para luego pasar a una minuciosa descripción de sus baterías, en sus detalles constructivos y sus componentes, hasta los detalles de sus químicas, incluyendo las perspectivas de las futuras tecnologías que ya se están estudiando y ensayando en laboratorios. Un tratamiento introductorio a la nomenclatura y conceptos eléctricos de las baterías, y sus equipos auxiliares, puede consultarse en el anexo 1. Se recomienda consultarlo cuando surjan dudas sobre las unidades y el funcionamiento eléctrico de las baterías. Para preparar la visión de la gestión integral de las baterías al final de su vida útil, se dará una breve introducción a los conceptos de economía circular.

En el capítulo II se darán detalles técnicos de los procesos que se están utilizando para la reutilización y el reciclaje de las baterías, para lo cual se revisarán los conceptos que atañen al ciclo de vida de las baterías, y los parámetros principales de su envejecimiento, el manejo seguro de las baterías de litio, y una perspectiva actual de los mercados de final de vida de las baterías.

En el capítulo III se abordarán ejemplos de normativas y regulaciones de la gestión de las baterías de distintos países y regiones, en donde resalta el caso de la Unión Europea, con su particular impulso hacia un esquema de economía circular y neutralidad en carbono. Las conclusiones se incluyen en el capítulo IV listando un conjunto de recomendaciones y aspectos esenciales para tener en cuenta de cara a la formulación de nuevas normativas, para los países de América Latina.

El balance ecológico y económico, y la determinación de las capacidades necesarias a desarrollar, para una circularidad de los residuos de las baterías de litio dependerá en gran medida de la previsión o preparación de las baterías en origen para ser reutilizadas, de las nuevas tecnologías para la recuperación de sus materiales, como también de las políticas y normativas que se implementen para la gestión integral de las baterías retiradas de los vehículos eléctricos.

Para abordar la complejidad de esta problemática se sugiere como posible metodología revisar qué es lo que se está haciendo en los países más avanzados en la implementación de la movilidad eléctrica, que ya se encontraron con la necesidad de hacer frente al creciente flujo de baterías usadas, e intentar extraer de ello las conclusiones sobre qué medidas funcionan y fueron exitosas, y qué errores se pueden evitar, al momento de desarrollar políticas y capacidades para la gestión de estas baterías.

I. Vehículos eléctricos, sus baterías y la necesidad de una gestión integral de su ciclo de vida

A medida que los vehículos eléctricos se multipliquen en las calles de las ciudades de todo el mundo, más y más baterías de estos vehículos alcanzarán eventualmente el final de su vida útil, y habrá que disponer de éstas de una manera ambientalmente responsable y que tenga sentido económico. En particular se procurará, de ser posible, reutilizarlas en aplicaciones de menor exigencia, en lo que se llama su segunda vida, o, en caso contrario, se tratará de desarmarlas y recuperar lo que se pueda reciclar, para aprovechar al máximo posible sus materiales constituyentes.

Si bien algunas empresas en distintos países avanzados ya están reutilizando o reciclando estas baterías, o se están preparando para un escenario de mayor afluencia de las baterías como residuos de la electromovilidad, en otros países todavía las infraestructuras de recolección y procesamiento de tales residuos no están siendo desplegadas, en particular en América Latina, y el conocimiento necesario no se encuentra fácilmente accesible. Este documento pretende ser una guía para formular las acciones necesarias para aproximarse a un estado de economía circular en la disposición, reutilización y reciclaje según corresponda, de las baterías retiradas de la movilidad eléctrica, y de las condiciones para la disposición final de los materiales recuperados.

Las distintas clases de vehículos eléctricos, de pasajeros y de carga, desde bicicletas y motocicletas o scooters, hasta autobuses y camiones, pasando por los autos estándar de uso urbano, tendrán distintas capacidades y características en sus baterías y sus volúmenes, tonelajes y composiciones al final de su primera vida útil plantearán desafíos muy distintos al recolector, al integrador de segunda vida y al reciclador.

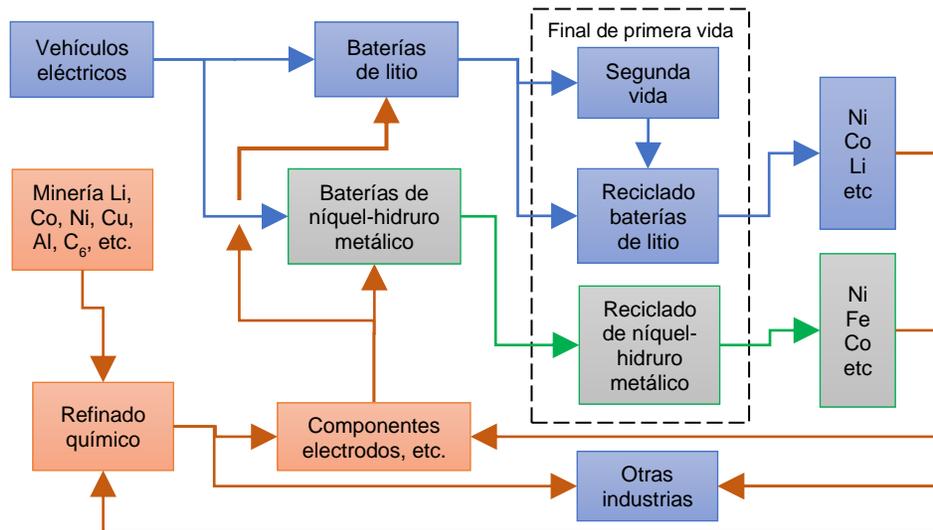
La inmensa mayoría de las baterías de la movilidad eléctrica actualmente son baterías de iones de litio, debido a sus mejores prestaciones. Las baterías de litio no solamente se encuentran en los vehículos eléctricos actuales, sino que han hecho posible la existencia de los dispositivos electrónicos portátiles, como las notebooks y los teléfonos celulares, y precisamente son sus características de alta densidad de energía y bajo costo las que han hecho que estos dispositivos sean universalmente

accesibles. En este sentido se puede decir que las baterías de litio son una tecnología habilitante de otras tecnologías, que no existirían sin ellas. Consideraciones análogas pueden aplicarse al desarrollo inminente de la movilidad eléctrica, donde nuevas generaciones de baterías de litio, más poderosas y económicas, están impulsando la revolución del transporte limpio y sustentable.

Durante el desarrollo de la electrónica de consumo portátil en las dos décadas pasadas, este sector fue la demanda principal de baterías de litio, y, a la vez, la fuente principal de residuos que las contienen. Hasta cerca de 2015, no mucho se ha hecho por individualizar a este tipo de residuo en pos de una economía circular, dentro del esquema general de residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), más que considerarlas residuos peligrosos como cualquier otro tipo de baterías (Clerc, 2021).

Debido a la gran cantidad de información que existe para llegar a comprender las tareas y desafíos involucrados en la gestión integral y ambientalmente sostenible de las baterías usadas de la electromovilidad, se intenta ir de lo general a lo particular. En el diagrama 1, que sirve como imagen de la distribución de los capítulos de este documento, se muestra el flujo de materiales que se debería tener en cuenta al momento de diseñar la regulación de base para los sistemas de gestión de las baterías al final de su vida útil en una economía circular.

Diagrama 1
El flujo de materiales, de las baterías de los vehículos eléctricos en una economía circular



Fuente: Elaboración propia.

Nota: C₆ = grafito.

A. Evolución de los vehículos eléctricos y sus baterías

Si bien los vehículos eléctricos aparecieron por primera vez a principios del siglo XX, debido a su corta autonomía con baterías de plomo-ácido, no pudieron competir con los vehículos a combustión de gasolina o diésel, derivados del petróleo, que se mantuvo barato durante casi todo ese siglo. Recién con el desarrollo de las baterías de litio y su aplicación a los vehículos eléctricos, estos pudieron empezar a competir, primero solo en vehículos de alta gama como el Tesla Roadster, alrededor del 2010 a 2012. Un intento anterior de la General Motors con el EV1 tuvo que ser abandonado, por no resultar competitivo.

Entre 2015 y 2020, el mundo comenzó a ver nuevos modelos de vehículos eléctricos más competitivos como resultado de nuevas baterías de litio más poderosas y económicas. Recién a partir de 2018-2019 los vehículos eléctricos pasaron a ser la demanda principal de baterías de litio (Bloomberg 2021.a). La rápida expansión de los vehículos eléctricos provocará que la demanda global de baterías de litio supere los 2.000 GWh al año hacia 2030, lo que representa un incremento de 9,45 veces la demanda de 2021 (Bloomberg, 2021.b). Por otro lado, se espera que la capacidad de producción de baterías supere los 2.500 GWh en 2025, según la Asociación de Energía Limpia (CEA, 2021). En consecuencia, se espera que en pocos años los vehículos eléctricos pasen a ser la mayor fuente de residuos de baterías agotadas, con volúmenes que multiplicarán varias veces a los volúmenes provenientes de la industria electrónica y del almacenamiento de energía.

Otro factor que ha potenciado la demanda de las baterías de litio es la notoria reducción de su precio. Según Bloomberg, por primera vez en 2021 las baterías de litio han tenido precios tan bajos (132 dólares/kWh a nivel sistema)¹, cuando en 2010 su precio promedio era aproximadamente 1.100 dólares/kWh, lo que representa una reducción del 89% en el precio durante la década 2010-2020 (Bloomberg NEF, 2021.c). Por primera vez también se han visto precios mínimos del orden de 100 dólares/kWh en el caso de baterías para buses eléctricos en China, si bien el promedio ponderado por volumen se mantuvo en aproximadamente 105 dólares/kWh.

Desde que estas baterías salieron al mercado en 1991, la caída de su precio fue de más de 30 veces (Castelvecchi, 2021) en 20 años. Naturalmente los precios fluctúan mes a mes, y en 2021 hubo subidas de precios ocasionadas por los efectos tardíos de la pandemia de COVID-19, la crisis de logística marítima en todo el mundo provocó a su vez congestión y colapso de las cadenas de suministro de materiales, que empujaron los precios de los insumos hacia arriba e impactando en el precio de las baterías (Bloomberg NEF, 2021.c). Estas fluctuaciones son transitorias, y se espera que el precio vuelva a su tendencia anterior conforme se normalicen las vías comerciales.

La autonomía de muchos vehículos eléctricos se ha incrementado desde 2012 hasta 2021, manteniendo el valor total del vehículo o incluso disminuyéndolo. Por ejemplo, la autonomía de un Nissan Leaf entre 2010 y 2012 era de unos 200 a 220 km, con una batería de 24 kWh; en 2015 era de 280 km con una batería de 30 kWh; en 2017 subió a 400 km con una batería de 40 kWh, y en 2019 se pudo alcanzar unos 570 km con una batería de 62 kWh. Esto ha sido producto de mejoras continuas, tanto en los materiales de las baterías como en la ingeniería de los sistemas (Nissan, 2019).

Las baterías de litio tienen una vida útil estimada en 8 a 10 años en los vehículos eléctricos grandes como autos y buses eléctricos, y es usual que los fabricantes de dichos vehículos garanticen sus baterías por períodos de similar duración². A partir de allí, las baterías agotadas pueden tener todavía una capacidad remanente suficiente para ser usadas en una segunda vida en otras aplicaciones de menor exigencia, como en almacenamiento de energía estacionaria. Por lo tanto, el mercado del final de vida de las baterías de litio está desfasado en esa misma cantidad de años respecto al propio mercado de los vehículos eléctricos.

Las baterías son valiosas y contienen materiales reciclables, pero debido a ciertos factores transitorios, de tipo técnico, económico y político, hoy en día en los mercados de Europa y Estados Unidos se recicla una relativamente pequeña proporción, que se estima en el orden del 5% del volumen total de baterías de litio usadas de vehículos eléctricos (Jacoby, 2019), mientras que en China la proporción es algo mayor, pero estimada en torno al 10% en 2019 (Li, 2021)³. Entre las razones

¹ La nomenclatura de unidades de energía y electricidad se encuentra en el Anexo 1.

² Sin embargo, estas duraciones y garantías típicas son bastante distintas en vehículos livianos como bicicletas y motos eléctricas, en los que las baterías de litio suelen durar aproximadamente 4 a 6 años, dependiendo de la exigencia, y suelen no tener garantías extendidas.

³ Debido a una gran componente de reciclado informal de baterías de litio (al igual que sucede con las baterías de plomo-ácido), que impide tener registros, los números de China solo pueden ser estimados (Li, 2021).

identificadas, se encuentran, por ejemplo, barreras económicas, restricciones técnicas, problemas logísticos, y deficiencias regulatorias (Edel, 2019). Evidentemente, estas causas y barreras son transitorias: existen mientras el mundo se adapta a la situación emergente del rápido despliegue de los vehículos eléctricos, y son más cuestiones de tipo regulatorio y de mercado, que de falta de tecnologías o de inmadurez tecnológica.

La escala de la inminente situación problemática de las baterías en desuso, sumada a las incertidumbres e inestabilidades de las cadenas de suministros de materiales para la movilidad eléctrica, están impulsando la búsqueda de estrategias rentables y ambientalmente sostenibles para su reutilización y reciclaje.

Luego de su primera vida, las baterías disponen todavía de al menos un 70% de su capacidad inicial, por lo que una opción, es su reutilización en nuevas aplicaciones de menor exigencia, en lo que se llama la segunda vida. Esta opción, impulsada principalmente por empresas automotrices y startups del sector energético, se está implementando en proyectos piloto de acumulación estacionaria de energía, tanto a nivel residencial como a gran escala, ya sea para prestar servicios en redes de distribución o para acumulación de energía solar o eólica. Si bien estos proyectos están aportando los primeros datos, dado que las baterías de vehículos eléctricos presentan una gran variabilidad, todavía no está clara la factibilidad general de esta opción. Estimaciones de distintos estudios indican que es una opción ciertamente prioritaria al reciclaje, que de todos modos deberá hacerse al final de la segunda vida.

En los siguientes apartados se describe la caracterización general de cómo se generarán las baterías en desuso desde los mercados de vehículos eléctricos, y la estimación de los volúmenes y pesos esperables de un dado mercado de baterías en desuso. Luego se explicarán sus componentes y materiales, así como los procesos que se están utilizando y estudiando para su reutilización y reciclaje.

Conviene distinguir aquí la reutilización, en condiciones controladas, de la reparación. Reutilizar en este contexto implica retirar la batería original del vehículo eléctrico, y se puede seguir usando el conjunto o partes de la batería que tengan celdas homogéneas que sean todavía funcionales, en una nueva aplicación, usualmente con menor exigencia que la original. Esto en general, se podrá hacer de manera viable cuando existan grandes volúmenes de baterías homogéneas, básicamente por la complejidad y el consecuente costo de la mano de obra.

En contraste, intentar reparar una batería de litio usada, reemplazando algunas de sus celdas que estén agotadas o arruinadas por celdas nuevas, si bien es una práctica común, no se recomienda, debido a que las celdas nuevas no trabajarán de forma pareja con las usadas, lo que representa un riesgo de seguridad en caso de que el sistema de control no puede manejar esa situación, lo que ocurre a menudo en vehículos livianos y económicos.

Bajo ciertas condiciones, una reparación o restauración (*refurbishing*) se pueden hacer, en caso de contar con celdas homogéneas, y en particular, si estaban unidas por conexiones atornilladas –no soldadas, ni pegadas–, de modo que su separación no sea difícil y no las dañe. Además, debe existir cierta trazabilidad de estas baterías. Por otro lado, es una práctica común con las baterías de níquel-hidruro metálico de los vehículos eléctricos híbridos y enchufables, dado que sus baterías son más estándar y unidas por puentes atornillados. De aquí la importancia que se le está dando al diseño de las baterías, concebidas desde el inicio para ser más fácilmente desarmadas, y eventualmente recicladas.

B. Descripción macro de las clases de vehículos eléctricos y sus baterías

Se debe distinguir qué clases de vehículos eléctricos e híbridos existen y están en circulación, y cómo son sus baterías, en sus características externas como el peso y el volumen, relevantes a un posterior tratamiento de estas como objetos a reutilizar o reciclar.

Hay varias clases de vehículos que utilizan motores eléctricos, parcial o totalmente, para su tracción. El cuadro 1 muestra algunos de los conceptos básicos usados en este documento, los que ayudaran a una mejor comprensión de las diferentes clases de baterías de los distintos tipos de vehículos eléctricos y los factores a tomar en cuenta para calcular o estimar las corrientes de baterías en desuso en cada circunstancia concreta. En general todos los vehículos eléctricos livianos, de dos y tres ruedas, tienen únicamente un motor eléctrico, y a veces dos para su tracción. En el caso de los vehículos eléctricos más pesados, desde autos hasta camiones, pueden estar impulsados únicamente por motores eléctricos, o por una combinación de motores eléctricos y un motor de combustión interna. Por tanto, conviene distinguir que los vehículos eléctricos puros, son los que solo tienen tracción por uno o varios motores eléctricos, que podrían ser vehículos a batería, o cuyos motores se alimentan de electricidad generada en una celda de combustible (vehículo con celda de combustible)⁴.

Los vehículos eléctricos híbridos, son los que pueden tener uno o varios motores eléctricos, combinados con un motor de combustión, para impulsar al vehículo en forma alternativa o conjunta, de acuerdo con la situación de movimiento, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia. De los vehículos híbridos hay dos tipos: los híbridos enchufables (PHEV, *plug-in hybrid electric vehicle* en inglés), que pueden obtener parte de su energía de la carga eléctrica por redes y parte de su carga de combustible, y están los híbridos no-enchufables, o simplemente híbridos (HEV, *hybrid electric vehicle* en inglés), que obtienen su energía de su carga de combustible (véase el diagrama 2).

Los vehículos con celda de combustible usualmente utilizan hidrógeno para generar electricidad y con ésta se alimenta al motor eléctrico. Este documento se enfoca solamente en los vehículos de batería eléctrica y los eléctricos híbridos enchufables, que son los que tienen las baterías más grandes y que se conectan a las redes. Como se verá en la próxima sección, todo indica que a largo plazo estos dos tipos de vehículos serán los que se impongan mayormente en los mercados, por menores costos, mayor eficiencia, y conveniencia de la infraestructura de recarga.

Actualmente no hay claridad sobre el desarrollo comercial a corto o mediano plazo de los vehículos con celda de combustible, excepto para vehículos pesados como utilitarios, colectivos, ómnibus y camiones, por cuestiones como la densidad de energía, el costo de los equipos de hidrógeno y del combustible en sí mismo, así como por las dificultades en el despliegue de la infraestructura de su recarga, que es centralizada. No obstante, existe en muchos países un renovado interés y políticas estratégicas en torno al desarrollo de economías del hidrógeno. Más allá de las incertidumbres actuales, las baterías auxiliares contenidas en los vehículos con celda de combustible son similares, aunque mucho más pequeñas, que las de los batería eléctrica y los eléctricos híbridos enchufables.

⁴ Una celda de combustible es un reactor electroquímico que se alimenta de hidrógeno o algún otro combustible (como metano, amoníaco o etanol) para generar electricidad. En cierta forma la celda de combustible es como una batería que provee electricidad, pero para ello utiliza un combustible, que está acumulado afuera del reactor, en un tanque externo. Todos los vehículos con celda de combustible requieren a su vez de una batería relativamente pequeña, que usualmente es de níquel-hidruro metálico o de litio, debido a que 1) los tiempos de puesta en marcha de las celdas de combustible impiden que reaccione inmediatamente, y 2) como no se puede revertir su funcionamiento, la energía recuperada del frenado regenerativo debe guardarse en otro dispositivo, como una batería o un supercapacitor.

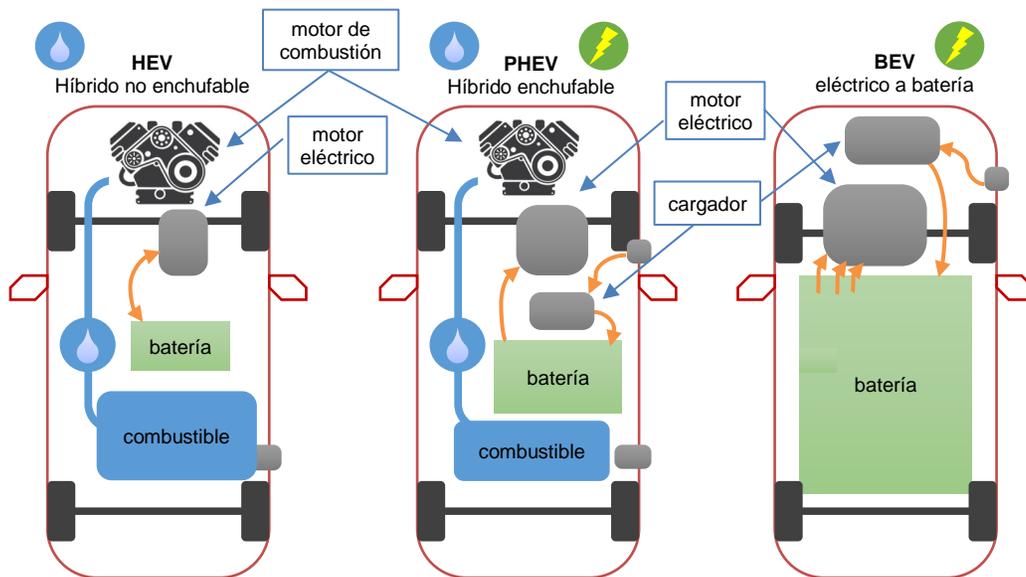
Cuadro 1
Conceptos básicos

Abreviación en inglés	Concepto en español e inglés	Explicación
EV	Vehículo eléctrico <i>Electric vehicle</i>	Todo vehículo impulsado por uno o varios motores eléctricos, independientemente de su reserva de energía a bordo. Incluye vehículos livianos (monopatines o e-scooters, bicicletas eléctricas o e-bikes, motocicletas eléctricas, triciclos (e-trikes) y cuatriciclos de reparto de carga, pequeños autos eléctricos o city-cars, etc., vehículos de pasajeros como colectivos eléctricos o e-buses, camionetas y utilitarios de reparto de carga, camiones de carga, etc. Todos ellos puedan generar residuos de baterías en un entorno urbano. No se incluyen en este trabajo trenes eléctricos, aviones eléctricos, ni barcos eléctricos.
ICE	Vehículo con motor de combustión interna <i>Internal combustion engine vehicle</i>	Este tipo de motores queman combustibles para producir fuerza motriz, y están presentes actualmente en casi todos los vehículos convencionales.
BEV	Vehículo de batería eléctrica <i>Battery electric vehicle</i>	Es el tipo cuya energía se guarda en una batería, casi universalmente ésta es un conjunto o sistema de baterías elementales con celdas de iones de litio.
HEV	Vehículo eléctrico híbrido <i>Hybrid electric vehicle</i>	Dispone para su propulsión tanto del motor de combustión convencional como de un motor eléctrico, éste último usualmente tiene un rol de ahorro de combustible a velocidades bajas y distancias cortas, por lo que dispone de una batería mucho más pequeña que la de un vehículo de batería eléctrica.
PHEV	Vehículo eléctrico híbrido enchufable <i>Plug-in hybrid electric vehicle</i>	Es el tipo de vehículo que se puede enchufar a la red de energía eléctrica para cargar su batería. Suele tener un rango en modo eléctrico mayor al que tiene el vehículo eléctrico híbrido en modo eléctrico puro, por consiguiente, su batería es algo más grande pero menor a la de un vehículo de batería eléctrica. Suele usarse también para almacenar la energía del frenado (freno regenerativo).
FCEV	Vehículo con celda de combustible. <i>Fuel cell electric vehicle</i>	La celda es un reactor electroquímico que genera electricidad a partir de combustibles. Estos vehículos no tienen una batería grande para almacenar la energía, sino un tanque de combustible, que luego se usará en la celda para dar electricidad al motor. Suelen tener también una batería pequeña auxiliar, por cuestiones técnicas del tiempo de puesta en marcha de la celda, y para almacenar la energía del frenado (freno regenerativo).
LIB	Batería de iones de litio <i>Lithium-ion battery</i>	Comúnmente baterías de litio, puede referirse a una batería elemental (celda) o a un conjunto o sistema de baterías con sus sistemas auxiliares (electrónica de control, estructuras, carcasas, refrigeración, etc.)
Ni-MH	Batería de níquel-hidruro metálico <i>Nickel metal hydride battery</i>	Es una batería que tienen algunos vehículos eléctrico híbrido y los del tipo con celda de combustible, principalmente provenientes de Japón, y está siendo reemplazada por batería de iones de litio.
EOL	Final de vida <i>End-of-Life</i>	Aplicado a las baterías usadas que ya no tienen la capacidad suficiente (por degradación paulatina), o no pueden cumplir su función de diseño original (por accidente o rotura) y, por tanto, alcanzan el final de su vida útil. Si hubiera posibilidad de reutilizarlas en una segunda vida, el final de vida se considera el final de su primera vida.
BMS	Sistema controlador electrónico de una batería o sistema de baterías <i>Battery Management System</i>	Usualmente compuesto por una o más placas de circuitos integrados, además de sensores, cables, conectores, y puede tener software de control.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de vehículos eléctricos livianos, como bicicletas, motos y autos eléctricos pequeños (como city-cars), no se espera que sean impulsados en general por hidrógeno, ya que estos nichos se han resuelto de manera eficiente con baterías. Como se mencionó antes, por las complejidades del hidrogeno, no es una opción práctica o viable para vehículos eléctricos livianos.

Diagrama 2
Esquemas de vehículos híbridos y eléctricos y el tipo de energía que utilizan



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Notar los tamaños relativos de los distintos componentes en cada caso.

Para el estudio y la formulación de políticas de gestión de las baterías de los vehículos eléctricos, es conveniente clasificar los vehículos, en cuanto a los distintos modos de movilidad: movilidad urbana, micro movilidad, movilidad colectiva, transporte de carga, tanto liviana (utilitarios) como pesada (camiones). Esto permite también clasificar los tamaños y los pesos de sus baterías, sean éstas de litio, de níquel-hidruro metálico, o de tecnologías que aparezcan en el futuro, a partir de su consumo específico de energía. Para poner en contexto los tamaños y pesos de las baterías, se resumen algunas configuraciones actuales de los vehículos eléctricos en el cuadro 2. De estos datos se pueden estimar los volúmenes y pesos involucrados en el cálculo de los volúmenes de las baterías retiradas de estos vehículos, para su eventual tratamiento al final de su vida útil.

Una instalación que se proponga reciclar baterías de vehículos eléctricos en desuso probablemente no se restringirá exclusivamente a las baterías de autos de pasajeros, sino también aceptará las baterías motocicletas y bicicletas eléctricas, así como de buses y camiones, y para ello podrá necesitar tener líneas de proceso distintas para cada clase de baterías.

En el caso de los vehículos livianos, si bien sus baterías son mucho más pequeñas, las cantidades de estos vehículos son mayores y sus vidas útiles son más cortas, por lo que tendrán un importante efecto en la situación de los residuos de baterías en desuso. Por otro lado, el desmontaje y reciclaje de las baterías de vehículos livianos resulta en general más sencillo y menos riesgoso que en el caso de baterías de autos eléctricos más pesados. El desmontaje y reacondicionamiento para segunda vida o reciclaje de baterías de vehículos livianos y pesados son desafíos completamente distintos, por lo que en este estudio se propone separar su tratamiento en dos clases, lo que dará lugar a distintas técnicas o procesos para su gestión.

Cuadro 2
Clases de vehículos eléctricos a batería y tamaños típicos de sus baterías

Tipo de vehículo eléctrico	Potencia del motor eléctrico (en kW)	Energía de la batería (en kWh)	Tipo de batería	Peso de la batería (en kg)	Volumen de la batería (en litros)
Bicicleta eléctrica o monopatín (e-scooter) (BEV)	0,25 – 1,0	0,5 – 1,5	Litio	2,3 a 8	0,75 – 2,5
Motocicleta eléctrica (tipo motoneta ejemplo Vespa), o trike (BEV)	0,8 – 5	1,5 – 5	Litio / Pb-ácido	10 a 25	3 – 10
Micro auto eléctrico (tipo <i>city car</i> categoría L6/L7) (BEV)	5 – 15	5 – 20	Litio / Pb-ácido	30 a 100	20 – 40
Auto eléctrico (gama media) (BEV)	20 – 60	30 – 50	Litio	200 – 320	70 – 130
Auto eléctrico (gama alta) (BEV)	90 – 220	75 – 100	Litio	450 – 550	180 – 220
Auto híbrido no enchufable (HEV)	30 – 80	1,5 – 10	Níquel-hidruro metálico	50 – 235	20 – 140
Auto híbrido enchufable (PHEV)	50 – 80	10– 15	Níquel-hidruro metálico o litio	200 – 350	120 – 220
Utilitario o pick-up híbrida enchufable (PHEV)	150 – 250	80 –150	Litio, supercapacitor	450 – 600	250 – 450
e-Bus (colectivo) (BEV), 50-70 pasajeros	180 – 350	250 – 500	Litio (litio-hierro-fosfato)	1 200 – 3 000	2 500 – 6 500

Fuente: Estimaciones propias con datos de mercado. Micro-Auto eléctrico: Sero Electric o Renault Twizy, Auto eléctrica gama media: Nissan Leaf 2021, Auto Eléctrico gama alta: Tesla Model S o Porsche Taycan. Bus: de (Sustainable bus, 2021).

Nota: Algunos buses/colectivos pueden ser vehículo eléctrico híbrido y contener supercapacitores, pero aquí se consignan solo buses de batería eléctrica (BEV). Sobre las unidades eléctricas puede consultarse el anexo 1.

En cada país que se desee implementar una política de gestión de las baterías en desuso, tendrá que evaluarse localmente las corrientes posibles de estas baterías, en función del tipo de vehículos eléctricos que se encuentren en circulación (livianos y pesados, de pasajeros, BVE/PHEV, buses, etc.), el tamaño respectivo de cada una de las flotas locales, y la edad promedio de esos vehículos.

C. El crecimiento de los mercados de vehículos eléctricos

El mercado de los vehículos eléctricos en los últimos años entró en una expansión vertiginosa en todo el mundo, aunque esta expansión es más ostensible en los países más industrializados. Este movimiento en los últimos años responde, a nivel global, al descenso de los precios de sus baterías, y a la vez, al incremento de su autonomía y velocidad de carga. A nivel local, en cada país o región, algunos de los factores de los que depende esta expansión y que pueden aumentar sus ventas localmente son: (1) el ritmo de despliegue de infraestructura de recarga, y (2) las medidas concretas de promoción, como el conjunto de incentivos fiscales y regulatorios que se implemente, incluyendo directivas que restrinjan las emisiones de los vehículos a combustión convencionales.

A pesar de la crisis provocada por la pandemia del COVID en 2020 los vehículos eléctricos resistieron la contracción de la demanda y los contratiempos encontrados en la industria de automóviles, como problemas de logística, falta de componentes, etc. (Irlle, 2022). Debido a nuevas regulaciones y a la pandemia, las ventas globales de vehículos eléctricos de 2019 y 2020 estuvieron por debajo de la trayectoria de largo plazo, pero en 2021 se recuperó la tendencia alcista. Si bien el crecimiento interanual parece extremo, el volumen de 2021 sigue siendo relativamente modesto, pero con una tendencia que se acelera.

La Agencia Internacional de Energía indica que las ventas globales de vehículos eléctricos en 2020 se habían elevado un 40% por encima de las ventas de 2019, pese a los efectos nocivos de la pandemia de COVID-19. En 2020 se sumaron unos 3 millones nuevos de vehículos eléctricos en el mundo, por lo

que en total en ese año hubo más de 10 millones de unidades. En 2020 Europa tuvo un año récord en la adopción de vehículos eléctricos, superando momentáneamente a China como el mercado de vehículos eléctricos más grande del mundo. Sin embargo, en 2021 en China resurgieron estos vehículos con más ímpetu, volviendo a ser el mercado más grande. La recuperación del mercado de vehículos eléctricos tomó forma en el segundo semestre de 2020 con rápidos aumentos en los volúmenes comercializados y especialmente en Europa, estuvo impulsada por productos atractivos, amplios fondos de recuperación verde, y el exigente mandato de 95 g de CO₂ por km, para el período 2021-2024 (IEA, 2021).

En 2021 los principales mercados con la mayor cantidad de ventas de vehículos eléctricos fueron China, Europa, y Estados Unidos, y las disparidades con los otros mercados fueron muy grandes. China incorporó más de 2 millones de vehículos eléctricos, esto es más de los incorporaron los mercados del resto del mundo juntos (IEA 2021).

Otro análisis como el de Irle (2022) concuerda en que el aumento de las ventas globales de vehículos eléctricos (batería eléctrica y eléctrico híbrido enchufable) ha ido en aumento, alcanzando 6,75 millones de unidades en 2021, un 108 % más que en 2020. Este volumen incluye vehículos de pasajeros, camiones ligeros y vehículos comerciales ligeros. En 2021, la participación total de los vehículos eléctricos en las ventas globales fue del 8,3% en comparación con el 4,2% en 2020. El 71% de las ventas totales de los vehículos eléctricos fue del tipo a batería eléctrica, mientras que el 29% fue del tipo eléctrico híbrido enchufable. Se puede observar que después de la desaceleración del mercado en 2020 como consecuencia de la pandemia de COVID-19, las ventas globales de vehículos eléctricos volvieron a la normalidad en 2021. Para el año 2022, se espera que las ventas de este tipo de autos vuelvan a un crecimiento más normal y alcancen alrededor de 9,5 millones de unidades, asumiendo que se resolverán los problemas restantes de suministros y logística que se vieron en 2021 (Irle, 2022).

Todo indica que en 2022 se venderán en Europa más vehículos eléctricos (BEV+PHEV) que, a diésel, lo que ya ocurrió en marzo de 2022 y durante varios meses del final de 2021 (JATO, 2022.c). Las marcas europeas están respondiendo al desafío que les planteó el rápido crecimiento de Tesla, y estarán dándole una fuerte competencia a la marca americana. A la vez, marcas de japonesas y coreanas, productoras de vehículos eléctricos que empiezan a introducirlos con más presencia en el espacio de la Unión Europea (JATO, 2022.a; JATO, 2022.b).

Los principales fabricantes automotrices están acelerando la conversión de sus capacidades de producción de vehículos eléctricos. Por ejemplo, el grupo VW es el que mayor volumen vende en el mundo y está haciendo importantes esfuerzos para la electrificación de todos sus modelos (VW Newsroom, 2021). Otros ejemplos son Tesla Motors, que en 2021 tuvo 936.000 entregas por lo que lideró el ranking global de autos eléctricos con 436.000 más que en 2020, siendo la automotriz con mayor capitalización bursátil de la historia (Irle, 2022) y en 2021 se aseguró un puesto en el top 20 de los autos más vendidos en los Estados Unidos (JATO, 2022.a). El auto más económico de la firma (Model-3) alcanzó las 501.000 unidades y se convirtió en el segundo auto de tamaño mediano más vendido después del Toyota Camry, a nivel global. A este ranking le siguieron, el Grupo Volkswagen que se mantuvo en el segundo puesto y BYD en el puesto número 3 que entregó casi 600.000 unidades (sin autobuses), esto es 400.000 más que en 2020 (Irle, 2022).

Principalmente los vehículos eléctricos mayormente vendidos son autos de pasajeros y colectivos de uso urbano, debido al todavía relativamente limitado rango en kilómetros que permiten las baterías. Casi todas las automotrices principales están abocadas al desarrollo y la fabricación de autos eléctricos de uso urbano. También se están comenzando a comercializar vehículos eléctricos en el sector de utilitarios y pick-ups, y conforme se desarrollan nuevas baterías con mayor capacidad y menor precio para el transporte pesado de larga distancia, como camiones y colectivos, también estos comenzarán a llegar.

1. Los volúmenes actuales y las perspectivas de mercados futuros

En el mundo la cantidad actual de vehículos eléctricos de pasajeros circulando en las calles es de más de 12 millones, y se está expandiendo rápidamente la electrificación a los otros segmentos del transporte (Bloomberg NEF, 2021.a). Asimismo, hay más de 1 millón de vehículos eléctricos comerciales (incluyendo buses, camionetas o *vans*, utilitarios de reparto, y camiones) y hay más de 260 millones de *mopeds*, *scooters*, motocicletas y triciclos eléctricos. Nuevas tendencias como la conducción autónoma, la demanda de carga, la infraestructura de recarga inteligente, y los nuevos materiales de las baterías están acelerando la electromovilidad.

Según Bloomberg NEF (2021.a) la cantidad de vehículos eléctricos livianos es 20 veces mayor a los de pasajeros, y es previsible que esta tendencia se mantenga dada la distancia de precios entre ellos. Esta diferencia en la cantidad tendrá una incidencia importante en la disponibilidad y la gestión de sus baterías al final de su vida útil, sobre todo en países de menores ingresos medios.

Las perspectivas de adopción de vehículos eléctricos están tornándose bien claras, debido a una combinación de mayor apoyo de las políticas de incentivos, nuevas mejoras en la densidad de baterías y su costo, mayor despliegue de infraestructura de recarga, y mayores compromisos de los fabricantes.

Las ventas de vehículos eléctricos de pasajeros se incrementarán de 3,1 millones en 2020 a 14 millones en 2025. Globalmente eso representará el 16% del total de las ventas de vehículos de pasajeros en 2025, pero en algunos países se alcanzarán porcentajes más altos. En Alemania, por ejemplo, estos vehículos representarán cerca del 40% del total de ventas para 2025, mientras que, en China, serán el 25% del total de ventas (Bloomberg NEF, 2021.a). Se prevé que China y Europa sigan siendo los mercados dominantes hacia 2025, impulsados principalmente por las regulaciones de emisiones de CO₂ para vehículo en Europa. En tanto en China, será por las regulaciones de economía de combustibles y el sistema de créditos de vehículos "de nuevas energías". En Estados Unidos, los cambios de políticas comenzarán a incrementar la adopción de vehículos eléctricos a partir de 2022 en tanto nuevos modelos de producción local llegan al mercado, particularmente en el sector de pick-ups.

La fragmentación del mercado global de autos hacia 2025, con la electrificación mucho más avanzada en China, Europa y algunos mercados más pequeños, presentará desafíos a los fabricantes que tienen portafolios globales. Los niveles más bajos de adopción de electromovilidad en las economías emergentes reducen la tasa promedio de adopción global, en tanto los fabricantes concentran sus esfuerzos en los mercados con las regulaciones más exigentes y favorables a los vehículos eléctricos.

En cuanto a los vehículos híbridos enchufables, las ventas aumentan en Europa en el corto plazo para alcanzar los objetivos de emisiones de CO₂, pero luego caen en la medida que los precios de las baterías siguen cayendo y se prefieren los vehículos eléctricos a batería. Sin embargo, continuarán las ventas de híbridos no enchufables hacia 2040, eventualmente sobrepasando también a los vehículos de combustión interna convencionales (Bloomberg NEF, 2021.a).

A menudo los pocos vehículos híbridos enchufables actuales no son cargados con electricidad de las redes, sino que, por comodidad o practicidad, se apoyan en la carga de combustible. Es plausible que muchos dueños de estos vehículos, en especial si viven en edificios de departamentos o condominios verticales, o sin cocheras podrían no tener disponible la infraestructura de carga cercana o en sus hogares. La opción de poder cargar combustible, y su mayor autonomía, es una de las razones de preferencia de los vehículos híbridos enchufables. Por tanto, las actuales políticas favorables a los vehículos híbridos enchufables podrían cambiar pronto, sobre todo considerando la diferencia de precios entre combustibles y electricidad, generalmente favorable a la carga eléctrica.

Consideraciones análogas se pueden hacer sobre los vehículos a celdas de combustible, que dependen para su recarga de hidrógeno únicamente de surtidores públicos, no siendo viable una

instalación de hidrógeno domiciliaria. Esta característica, así como la centralización y mayor precio de la infraestructura de recarga del hidrógeno, junto a los precios relativamente altos de los vehículos a celdas de combustible, afectan la preferencia de los usuarios potenciales en el corto y mediano plazo. No se prevé su desarrollo en forma apreciable en los escenarios considerados (Bloomberg NEF, 2021.a.)

2. Evolución de los modelos disponibles de vehículos eléctricos

Los modelos disponibles de vehículos eléctricos de pasajeros y los que están proyectando fabricar las automotrices también dan una clara idea de cómo evoluciona el mercado. Por ejemplo, hacia 2025 habrá en la Unión Europea más de 330 modelos distintos de vehículos eléctricos, distribuidos entre más de 160 modelos de vehículos eléctricos a batería, más de 140 modelos de híbridos enchufables, y unos 14 modelos con celdas de combustible (Transport & Environment 2019).

La disponibilidad de los distintos modelos permite prever que los vehículos híbridos enchufables y los vehículos a celdas de combustible no ganarán una participación significativa a largo plazo en otros mercados aparte de Europa y Japón, y la gran mayoría de las ventas globales de vehículos eléctricos hacia 2030, y en adelante, serán más probablemente de vehículos a baterías.

La combinación de recuperación gradual de las ventas de vehículos durante el período de la pandemia del COVID-19, y una rápida adopción de la electromovilidad significa que las ventas de vehículos de pasajeros a combustión alcanzaron su pico en 2017, y ahora están en permanente declive. Los 12 millones de vehículos eléctricos de pasajeros que circulan en las calles representan el 1% de la flota global, pero se incrementarán a 54 millones hacia 2025 (Transport & Environment 2019). Particularmente en el sector de 2 y 3 ruedas (motos y triciclos), se verán aumentos significativos en todos los mercados, luego de que el propio mercado de China se sature en tres a cuatro años. Este será el sector de mayor crecimiento dentro de los vehículos eléctricos.

Todas las automotrices del mundo se están ajustando a las nuevas disposiciones de cuidado ambiental cada vez más restrictivas en vistas de la urgencia del cambio climático, y son varias las que anunciaron la electrificación de todos sus modelos, en plazos más cortos o largos, pero casi todas estarán produciendo una gran parte de sus flotas en versión eléctrica entre 2025 y 2040. Unas cuantas incluso (entre ellas VW) anunciaron que no fabricarán más vehículos a combustión a partir de 2030, lo que resulta una situación muy disruptiva en el mercado automotriz, por ende, también en el mercado de combustibles derivados del petróleo.

3. El impulso de los sectores institucionales

La electromovilidad está creciendo no solamente por las fuerzas del mercado. Hay gobiernos, actores institucionales y consorcios público-privados activamente involucrados en su expansión, como es el caso de la Agencia Internacional de Energía que creó la Iniciativa de Vehículos Eléctricos (*Electric Vehicles Initiative*). Por su parte, el avance y el desarrollo de las baterías, consideradas la pieza fundamental de la transición energética tanto en movilidad como en aplicaciones estacionarias, están siendo promovidos por iniciativas y consorcios como la Alianza Global de Baterías⁵ (*Global Battery Alliance*), y la Alianza Europea de Baterías⁶ (*European Battery Alliance*), entre otras muchas instituciones y programas.

Como hecho notable, recientemente se estableció una colaboración entre la Comisión Europea y el Departamento de Energía de Estados Unidos de Norteamérica, representados por la Alianza Europea de Baterías y el consorcio Li-Bridge, respectivamente, para el desarrollo de cadenas de suministro de baterías (European Commission, 2022). Li-Bridge es una alianza público-privada de Estados Unidos de Norteamérica, comprometida con acelerar el desarrollo de una cadena de suministro nacional, sólida y segura, para baterías de litio. El Laboratorio Nacional de Argonne (*Argonne National Laboratory*) lidera

⁵ Más información en <https://www.globalbattery.org/>.

⁶ Más información en <https://www.eba250.com/>.

la coordinación de Li-Bridge sirviendo como facilitador entre la industria privada y el Consorcio Federal para Baterías Avanzadas, que publicó el “Plan Nacional para Baterías de Litio, 2021 – 2030”. Este Plan tiene como objetivo poner a los Estados Unidos de Norteamérica en el camino hacia la competitividad de largo plazo en la cadena de valor global de las baterías.

La reciente Cumbre del Clima en Glasgow (COP-26) marcó un punto de inflexión de la industria automotriz, donde unos 100 gobiernos de países, ciudades, estados subnacionales, y fabricantes automotrices se comprometieron a no producir más vehículos a combustión hacia 2040 (ONU, 2021). La situación de transición es bastante evidente y traerá aparejado nuevas maneras de concebir la movilidad, y nuevas responsabilidades asociadas a la gestión de los residuos que produzca.

Una importante labor de difusión y promoción de los vehículos eléctricos y sus industrias asociadas al nivel del público y los usuarios es llevada adelante por las asociaciones civiles y organizaciones no gubernamentales locales en cada país. Siguiendo ejemplos de asociaciones europeas pioneras⁷, también en América Latina muchos países tienen sus asociaciones locales de promoción de estos vehículos, que incluso han sido nucleadas en la Asociación Latinoamericana de Movilidad Sostenible (ALAMOS), conformada entre otras por AAVEA (Argentina), ABRAVEi (Brasil), ANDEMOS (Colombia), AVEC A.G. (Chile), AEDIVE (Perú), AUDER (Uruguay) (PNUMA, 2020; PNUMA 2021)⁸. Estas asociaciones cumplen un rol importante en cuanto a informar y amplificar la voz de la sociedad civil que reclama los cambios en movilidad (TN, 2022), y en muchos casos contribuyen a impulsar la adopción de estándares a nivel regional (por ejemplo, para los cargadores, conectores, categorías de EV, etc.). Tienen asimismo una labor importante a la hora de asesorar a gobiernos y entidades privadas en las particularidades de los mercados locales de la electromovilidad. En algunos países existen también cámaras de fabricantes de vehículos eléctricos, que agrupan al sector comercial e industrial, e intentan apuntalar su desarrollo.

4. La situación en América Latina

América Latina está aun relativamente atrasada en la implementación de electromovilidad, siendo Chile, Colombia, Perú, Brasil y Uruguay, los países que muestran algunos avances, sobre todo en la electrificación de sus flotas de transporte público, que naturalmente debería ser prioritario.

El informe de 2020 del Programa MOVE⁹ sobre movilidad eléctrica en Latinoamérica y el Caribe incluye una reseña de las recientes actividades de la movilidad eléctrica en la región, en relación con la acción climática que se expresa en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC)¹⁰. Dicho informe destaca que la formulación de estrategias nacionales de movilidad eléctrica se ha convertido en una tendencia regional. Chile, Colombia, Costa Rica, Panamá, y República Dominicana han publicado políticas nacionales en electromovilidad, mientras están en proceso de desarrollo de planes o estrategias México, Guatemala, Honduras, Paraguay, Nicaragua, El Salvador, Ecuador y Argentina. En Perú, las asociaciones civiles han impulsado la creación de una estrategia nacional. Mientras que en Uruguay se destaca que, si bien no tiene un documento único que dirija la política de movilidad eléctrica, tiene un gran avance en la materia, al menos hasta 2021.

Se identifica potencial para unificar criterios regionales en las estrategias de movilidad eléctrica para atender las necesidades comunes que permitan la homogenización. Esto tendría aplicación en aspectos de normativa asociada a los vehículos eléctricos, y la infraestructura y servicios de recarga. La

⁷ Como la Asociación Noruega de Vehículos Eléctricos, (<https://elbil.no/english/>).

⁸ Algunas asociaciones tienen su página web, y/o sitios en redes sociales que suelen estar más actualizados. AAVEA en Argentina, (www.aavea.org), ABRAVEi en Brasil, (<https://www.abravei.org/es>), ANDEMOS en Colombia (<https://www.andemos.org/>), AVEC en Chile, (<https://www.avec.cl/>), AEDIVE en Perú, (<https://aedive.es/>), AUDER en Uruguay (<https://www.auder.org.uy/>).

⁹ Más información en <http://movelatam.org>.

¹⁰ Al menos 27 de los 33 países de la región han priorizado el sector transporte como un elemento central para alcanzar sus metas en reducción de emisiones en la primera edición de sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (PNUMA, 2021).

legislación que incentiva la entrada (importación) y/o el uso de vehículos eléctricos a nivel nacional existe en todos los países de América Latina y el Caribe con estímulos como ampliaciones de cuotas arancelarias, y reducción o eliminación de impuestos (PNUMA, 2021).

Por otro lado, México, Brasil, Uruguay, Chile y Argentina, han implementado regulaciones orientadas a promover la eficiencia energética de la flota de vehículos. En cuanto a las iniciativas regionales, la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) ha propuesto la medición de las emisiones de CO₂ y costo de combustibles (PNUMA, 2021).

Otro tema crucial que destaca PNUMA (2021) es la interoperabilidad de la recarga de los vehículos eléctricos, lo que establece las bases para un escalamiento posterior, a nivel nacional y regional. Chile, Perú y Paraguay han avanzado en el estudio de normativas para establecer los estándares sobre dimensiones, dominios y zonas de la interoperabilidad. Además, a nivel subnacional se han desarrollado compendios regulatorios en zonas de alto valor ecológico y/o turístico. Con lo que se evitan impactos negativos en los ecosistemas y facilitan su uso como estrategia de difusión y convencimiento de la tecnología.

a) Electromovilidad en Chile

En febrero de 2022 el Gobierno de Chile aprobó la nueva Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2021) a través de la Resolución 8 Exenta¹¹. Se rige por 4 ejes estratégicos y con metas de cero emisiones al 2035 para el 100% de los nuevos vehículos que se incorporen en el transporte público urbano (buses, taxis y colectivos), y también para las ventas de vehículos livianos y medianos. Como meta al 2045 se espera que el 100% de las ventas de vehículos para el transporte de pasajeros interurbano y transporte terrestre de carga sean cero emisiones. Se espera que para alcanzar la neutralidad de carbono al 2050, la electromovilidad será responsable del 20% de la reducción relacionada al sector de energía.

Según la Plataforma de Electromovilidad de Chile, los avances en el país al mes de abril de 2022 incluyen lo que se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3
Cifras de avances de la electromovilidad en Chile a abril de 2022
(En número de unidades)

Electrolíneas		Parque vehicular	
Meta	Avance	Meta	Avance
150	349	2430	26 camiones 41 buses interurbanos 873 buses urbanos 2311 ligeros y medianos 3251 en total

Fuente: Plataforma de Electromovilidad de Chile <https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?page=2>.

Mediante una comunicación con el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, se ha podido conocer que se está preparando una nueva regulación que contempla el reciclaje de las baterías de la electromovilidad.

Por otro lado, en diciembre de 2021 se lanzó la "Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible"¹², impulsada desde el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, realizada en el marco del Proyecto EUROCLIMA+, con apoyo de GIZ y la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), y algo más enfocada en los aspectos estructurales y sociales del transporte urbano (Toborelli 2021.a y 2021.b).

¹¹ Más información en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1173033>.

¹² Más información en <https://www.subtrans.gob.cl/wp-content/uploads/2021/12/documento-ENMS-2-1.pdf>.

b) Electromovilidad en Uruguay

Otro de los países más avanzados en movilidad eléctrica en América Latina es Uruguay. La Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) recopila detalles sobre la movilidad eléctrica en el país en su portal dedicado a movilidad eléctrica¹³.

El Programa “MOVÉS: Hacia un sistema de movilidad urbana eficiente y sostenible en Uruguay”¹⁴ promueve un sistema de movilidad sostenible, bajo en carbono eficiente e inclusivo, basado en la mejora de las capacidades institucionales, el desarrollo de una regulación adecuada, la aplicación de tecnologías innovadoras y la promoción de un cambio cultural. Este Proyecto es financiado por el Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF) y ejecutado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), en asociación con el Ministerio de Ambiente (MA) y el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT), y con la colaboración de la Agencia Uruguaya de Cooperación Internacional (AUCI) (MOVES, 2022). Tiene como objetivo implementar acciones concretas con 3 componentes claves, tales como marco regulatorio y fiscal, demostración tecnológica y cambio cultural.

Dentro de las iniciativas concretadas en el marco del Programa MOVÉ figuran las siguientes:

- i) Pruebas tecnológicas: Esto incluye pruebas de vehículos eléctricos en instituciones públicas, organismos y empresas. Incentivos para la compra de ómnibus eléctricos y apoyo a fabricantes locales de vehículos eléctricos livianos.
- ii) Incentivos para la promoción y recambio a vehículos sostenibles: Se considera un Plan Flota Verde para empresas, una Mesa de Movilidad Eléctrica y un estudio de esquemas fiscales e incentivos en la movilidad y el transporte.
- iii) Movilidad Urbana Sostenible y Cambio Cultural: Que contempla una guía para la Planificación de la Movilidad Urbana Sostenible, un reporte de indicadores de calidad del sistema de transporte público y un estudio comparativo del nivel de ruido de ómnibus.
- iv) Regulación y Normativa: Que incluye normativa de etiquetado vehicular, normativa de conectores vehiculares y reglamentación de baterías

Por otro lado, el Programa SUBITE 2021-2022 beneficia con subsidios, descuentos y bonificaciones, a la adquisición de hasta 1000 motos eléctricas y 100 triciclos de carga en la región norte del país: Artigas, Paysandú, Rivera, Salto y Tacuarembó (Programa Subite, 2022).

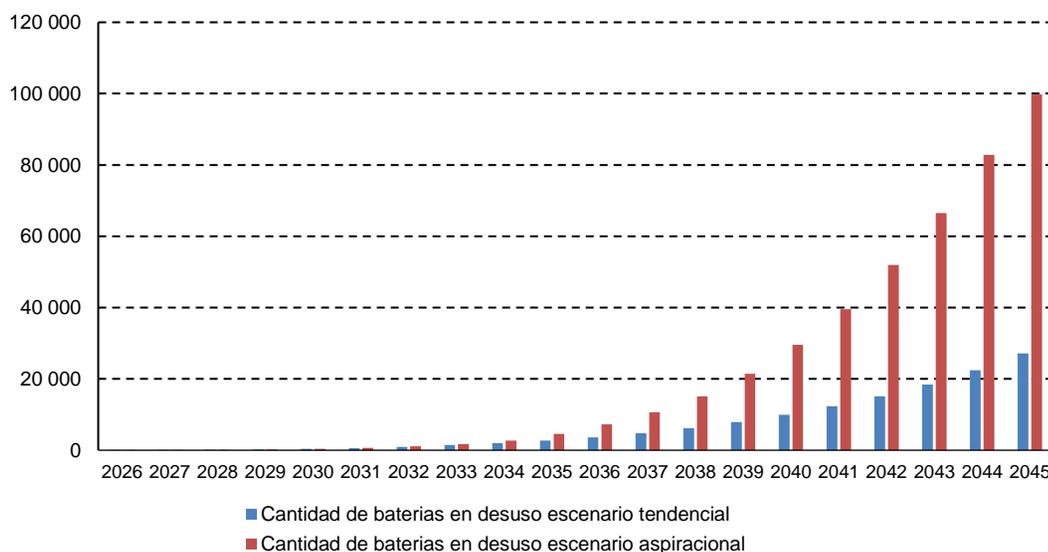
Dentro de la Estrategia Climática de Largo Plazo de Uruguay (MINAMB, 2021.b) presentada en diciembre de 2021 se hicieron proyecciones del crecimiento de electromovilidad en 2 escenarios, uno tendencial y otro aspiracional. El escenario aspiracional resulta ambicioso en la consecución de las metas climáticas, pero construido con el conocimiento de las tecnologías maduras a la fecha. Pero dados los avances tecnológicos futuros, serán necesarias revisiones y ajustes para adecuar la reducción de emisiones. Cabe decir, que este escenario si bien es ambicioso, aún habría emisiones residuales no despreciables a 2050.

De estas proyecciones se puede estimar un volumen de baterías en desuso provenientes de la movilidad eléctrica en Uruguay como se muestra en el gráfico 1, que se movería entre unas 43 toneladas hacia 2026 y unas 25.000 a 100.000 toneladas hacia 2045, dependiendo del escenario considerado.

¹³ Más información en <https://movilidad.ute.com.uy/>.

¹⁴ Más información en <https://moves.gub.uy/>.

Gráfico 1
Proyección estimada del volumen de baterías de vehículos eléctricos en desuso en Uruguay
 (en Ton/año)



Fuente: Emiliano Roselló (Programa MOVES) y Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, con datos de Rafael Lavagna de Planificación, Estadística y Balance de la DNE, usados para la confección de la Estrategia Nacional Climática de Largo Plazo, presentada en diciembre, 2021 por el Ministerio de Medio Ambiente de Uruguay, citada en el texto (MINAMB, 2021.b).

Entre todos los desarrollos de movilidad eléctrica en Uruguay, se destaca la reciente implementación de ómnibus eléctricos, que comenzó con un programa piloto con 32 buses eléctricos en Montevideo y Canelones, que al 30 de noviembre de 2021 habían recorrido más de 1.500.000 km. Además, evitaron el consumo de más de 615.000 litros de Gasoil (asumiendo un consumo promedio de 2,5 Litros/km), y la emisión de unas 800 ton de CO₂, entre otros gases contaminantes. El consumo promedio de energía de esos buses fue de 1,11 kWh/km, y sus baterías fueron usadas en promedio entre el 50% y 60% en recorridos promedio entre 150 y 225 km, según el Primer Informe Operativo Anual, de 2021¹⁵.

La inteligencia notable de este programa consistió en brindar un subsidio a los operadores de líneas de ómnibus, en el marco de un instrumento de promoción impulsado por 4 ministerios involucrados (el transporte público es transversal a todos ellos): el Ministerio de Medio Ambiente (MA), Economía y Finanzas (MEF), Industria, Energía y Minería (MIEM) y Transporte y Obras Públicas (MTO), e implementado a través de una comisión técnica con integrantes de los cuatro ministerios.

Dentro de las condiciones establecidas para el otorgamiento del subsidio, los operadores debieron realizar un monitoreo del funcionamiento de las unidades, analizando recorridos y energía utilizada, y brindando dicha información a la comisión técnica. El resultado es un reporte (Gobierno de Uruguay, 2021) que contiene información de vital importancia para la siguiente etapa de implementación, tanto sobre el correcto desempeño técnico de las unidades como de los ahorros en combustible equivalente conseguidos.

El instrumento de promoción obtuvo amplio respaldo parlamentario al ser aprobado por la totalidad de senadores presentes y casi la totalidad de diputados, lo que habilitó su implementación por

¹⁵ Más información en <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/omnibus-electricos-evitaron-consumo-615000-litros-combustible-durante-primer>.

el Poder Ejecutivo, en coordinación con los gobiernos departamentales hasta sustituir un 4% de la flota a nivel nacional, unos 140 ómnibus.

El subsidio constituyó un importante aporte para los operadores, ya que les permite modernizar su flota sin incrementar subsidios dedicados a cada ómnibus. Desde el punto de vista económico, el subsidio total que recibe un ómnibus diésel en su vida útil a través del fideicomiso de administración, comúnmente llamado el “fideicomiso del boleto”, es equivalente al subsidio a la compra de un ómnibus eléctrico. Por lo tanto, mejora la utilización de los mismos recursos y a la vez se aprovecha energía renovable y limpia producida en Uruguay.

Las baterías de estos ómnibus eléctricos (LiFePO₄ y LTO) tienen una duración estimada en 10 a 12 años a 60.000 km/año (Sustainable Bus, 2021). Algunos de los buses de bajas emisiones de Uruguay son también híbridos, que utilizan supercapacitores para su mayor eficiencia energética (Transporte Carretero, 2020).

En cuanto a los vehículos eléctricos de pasajeros más vendidos en Uruguay, en los 5 primeros puestos en ventas en 2021 figuran todos los híbridos (HEV), por ejemplo, están el Mitsubishi Swift Hybrid y el Toyota Corolla Cross Hybrid. Entre los 5 puestos siguientes solamente hay 2 eléctricos a batería (BEV) y en el 6to lugar figura el BYD e2; en el noveno lugar el Hyundai Kona electric, el resto son todos vehículos eléctricos híbridos o híbridos enchufables (Barcia, 2022).

c) Electromovilidad en Colombia

Colombia exhibe el mayor desarrollo de vehículos eléctricos e híbridos, sobre todo en el espacio del transporte público, contando al presente con flotas operativas de buses y taxis eléctricos (Gobierno de Colombia, 2019), entre muchas otras formas de movilidad eléctrica. El sector transporte en Colombia representa el 36% del consumo de energía y emite 25% de sus gases de efecto invernadero (PNUMA, 2020). Sumado a esto, es responsable del 80% de las emisiones de material particulado en las ciudades, teniendo graves efectos sobre la salud de la ciudadanía. Desde hace muchos años son conocidos los problemas del aire en Bogotá causados por la contaminación del tránsito (Rojas, 2007), situación que pudo haber impulsado políticas públicas para contrarrestar estos efectos. Dada la matriz energética relativamente limpia que tiene el país, la movilidad eléctrica se presenta como una gran oportunidad para reducir los impactos negativos que el sector tiene sobre el país y su población (PNUMA, 2020).

La Ley 1955 instruye el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (Gobierno de Colombia, 2018; UNESCO, 2019), que decreta un marco regulatorio amplio para fomentar la transición hacia la movilidad de cero y bajas emisiones. Esta ley abarca la definición de movilidad de cero y bajas emisiones, las fuentes de financiamiento para los sistemas de transporte público y los planes de movilidad sostenible. Este plan se alinea con otras políticas como la Política de Crecimiento Verde (CONPES 3934)¹⁶ que propone disminuir la intensidad energética en 22%, las emisiones de gases de efecto invernadero en 20% y tener 600.000 vehículos eléctricos circulando para 2030. También la “Política para el Mejoramiento de Calidad de Aire” (CONPES 3943) propone incorporar vehículos con tecnologías limpias y promover mecanismos como etiquetas informativas, incentivos tributarios y sistemas para descarte de vehículos de combustión interna (PNUMA 2020).

En julio de 2019, Colombia emitió la Ley N. 1964¹⁷ para brindar incentivos a los propietarios de vehículos eléctricos en tarifas del impuesto vehicular, reducciones en el Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT) y exenciones en las medidas de restricción de circulación “pico y placa”.

¹⁶ Los CONPES son documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social, del Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. Ver (CONPES 3934, 2018) y (CONPES 3943, 2018) en la Bibliografía.

¹⁷ Más información en <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636>.

Entre los objetivos de esta ley, se establece que para 2035 todos los vehículos del Sistema de Transporte Masivo sean eléctricos o cero emisiones.

En agosto de 2019 se lanzó la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, realizada en el marco de un proyecto con el apoyo del Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas y EUROCLIMA+ (Gobierno de Colombia, 2019). Algunas de las medidas adoptadas comprenden:

- Reducción arancelaria de vehículos de cero y bajas emisiones: esta medida se ha gestionado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (MADS) desde el año 2008. La reducción arancelaria acogida mediante Decreto 1116 de 2017 expedido por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, la cual permite la importación de vehículos eléctricos e híbridos con 0% y 5% de arancel respectivamente, para un total 52.800 unidades vehiculares entre los años 2017 y 2027. Este contingente hasta 2019 fue el de mayor proyección en lo que respecta a tecnologías vehiculares de cero y bajas emisiones. Antes de finalizar 2018, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable realizó una nueva solicitud de reducción arancelaria permanente para vehículos eléctricos y dedicados a gas natural a 0% y 5% respectivamente, la cual fue aprobada mediante Decreto 2051 de 2019 del Ministerio de Comercio (Gobierno de Colombia, 2019).
- Incentivos tributarios: la reforma tributaria realizada en el año 2016 trajo consigo incentivos para el transporte eléctrico, ya que incluyó dentro de los bienes gravados con tarifa del 5% del IVA a vehículos para el transporte de diez o más personas, taxis, transporte de mercancías, motocicletas y bicicletas, cargadores, entre otros. Así mismo, el Estatuto Tributario ha permitido generar otros mecanismos para el acceso a estos incentivos. Los incentivos tributarios de exclusión de IVA y descuento de renta se han desarrollado a través de los Decretos 1564 de 2017, 2205 de 2017 y 2143 de 2017 y las Resoluciones del Ministerio de Ambiente 1988 y 2000 de 2017, y la Res. UPME 463 de 2018 (Gobierno de Colombia, 2019; PNUMA, 2020).
- Movilidad eléctrica en Bogotá y Medellín: Mediante el Decreto 677 de 2011 la Administración Distrital expresó la necesidad de desarrollar políticas de movilidad eléctrica. Bogotá es la primera ciudad del país en implementar y experimentar este tipo de vehículos para transporte público. Como parte de las estrategias de cuidado con el medio ambiente, plasmadas en el Plan de Desarrollo de la Administración de la Bogotá Humana y en consorcio con las empresas BYD, Consorcio Express y Coobus, se presentaron a la ciudad de Bogotá cincuenta taxis eléctricos y una flota de buses de tipología eléctrica e híbrida. Con el apoyo de universidades como la Universidad de la Salle y la Universidad Pontificia Bolivariana financiadas por Colciencias. Los vehículos pertenecen a la marca china Geely, y tienen un rendimiento de 100 a 150 kilómetros en Bogotá, que es una ciudad muy alta y con pendientes. Los entes participantes son: CODENSA, Fundación Clinton, Organización C4o, IDR, Praco Didacol, BYD y las empresas de taxis. Según CODENSA, la vida útil de los vehículos tipo híbrido alcanza unos quince años, mientras que para los buses eléctricos es de veinte años. Las empresas CODENSA y EMGESA han fomentado el uso de vehículos eléctricos tanto para transporte privado como para transporte público, con el fin de disminuir las emisiones de gases con efecto invernadero y de la misma forma el consumo de combustibles fósiles. Hay otro proyecto que pertenece al Programa de Movilidad Cero. CODENSA y EMGESA posee una flota de 48 bicicletas eléctricas, siendo la más grande del país. Las bicicletas eléctricas son de tecnología IZIP, con baterías de litio que aseguran alta eficiencia y rendimiento en el sistema.
- Por su parte, el Municipio de Medellín financió la adquisición de 64 buses eléctricos en el Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA). A noviembre de 2019 iniciaron operaciones 17 de las 64 unidades adquiridas en una de las rutas de transporte público (MOVE,

2019.a). La ciudad de Bogotá abrió una licitación para la compra de 594 buses eléctricos como parte de la sustitución de flota de su sistema de transporte público. A noviembre de 2019, se anunció la adjudicación de 379 buses eléctricos a través de un proceso abreviado de selección en líneas alimentadoras y zonales. Esto convierte a Bogotá y Medellín, en pioneras en el uso del mecanismo de licitación para la adquisición de buses eléctricos en la región. A esto se suman 104 buses eléctricos que consisten en adiciones contractuales con concesionarios de la Fase III de Transmilenio, para un total de 483 buses eléctricos. Por su parte, la empresa ENEL Codensa está encargada del diseño, construcción y aprovisionamiento de la infraestructura de recarga de 379 de estos buses (PNUMA, 2020).

- Resolución 186 de 2012. Previamente, en términos de antecedentes, esta resolución establecía la eliminación del IVA aplicada a tecnologías limpias (vehículos híbridos, eléctricos y dedicados a GN), IVA del 16% al 0%. Para los vehículos eléctricos una reducción del IVA del 16% al 5%, posteriormente, por la reforma tributaria, la Ley 1607 de 2012, expresa que el IVA pasa del 5% al 0%. Además, para los vehículos eléctricos y las estaciones de recarga (lenta y rápida) una reducción de arancel de 35% al 0%, y para vehículos híbridos enchufable una reducción de arancel de 35% al 5%. También, las resoluciones 586 (UPME), 778 (MADS) y 779 (MADS) de 2012, establecieron los requisitos y procedimientos para acceder a beneficios como la exclusión del IVA para vehículos de tecnologías limpias (eléctricos e híbridos). Estas normativas han sido actualizadas en años recientes.

En noviembre de 2019, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo expidió el Decreto 2051 que liberaliza la importación de vehículos totalmente eléctricos (sin límite de unidades como previamente lo establecía el Decreto 116 de 2017) y marca una tarifa de arancel del 0% y la reducción del 35% al 5% del gravamen arancelario para la importación de automóviles a gas natural sin límite de unidades. Otras normativas de importancia en la promoción de la movilidad eléctrica en Colombia han sido: (i) la Ley 1819/2016, que decreta que los vehículos eléctricos y los híbridos deben contar con una tarifa preferencial en el IVA de un 5%, y (ii) el Decreto 1116/2017, que establece aranceles temporales de importación de vehículos híbridos para un máximo de 26.400 unidades entre 2017 y 2027.

Recientemente, en noviembre de 2021, el Ministerio de Minas y Energía de Colombia reglamentó los incentivos establecidos en el artículo 49 de la Ley 2099 de 2021, denominada "Ley de Transición Energética", en relación con el no pago de la contribución prevista en el artículo 47 de la Ley 143 de 1994 y del artículo 89.1 de la Ley 142 de 1994, sobre el consumo de energía eléctrica destinado a la carga de vehículos o sistemas eléctricos masivos de pasajeros.

Evidentemente, la interacción entre todas las leyes y resoluciones que afectan al transporte, y en particular el transporte público, y la importación de vehículos, puede ser algo compleja. Para una discusión actualizada sobre el marco normativo completo en Colombia véase por ejemplo a Rincón Jaramillo (2022).

El mercado de los vehículos eléctricos de pasajeros se está dinamizando en Colombia. A finales de 2021 el sector ya contaba con 1.712 vehículos eléctricos a batería y 1.296 híbridos enchufables, liderando la región norte de América Latina en vehículos de bajas emisiones (Pettigrew, 2022).

D. Los tipos de baterías actuales en los vehículos eléctricos y sus características generales

En este apartado se distinguen las baterías de litio que están presentes en la mayoría de los vehículos eléctricos de otras clases de baterías como níquel-hidruro metálico y de los supercapacitores, estudiando las características de cada uno.

El tamaño de los mercados de cada tipo de batería, en un determinado país o región, afectará la cantidad de material reciclable y/o residuo que podría aportar llegado el final de su vida útil¹⁸. Para este estudio se considerarán principalmente baterías de litio y de níquel-hidruro metálico, por ser las baterías más frecuentes en la movilidad eléctrica, y las que estarán disponibles en mayor volumen como baterías en desuso provenientes de este sector.

1. Concepto de una batería secundaria o recargable

Una batería es un reactor electroquímico, básicamente un recipiente o cavidad donde se llevan a cabo reacciones químicas mediadas por la emisión o absorción de energía eléctrica. Este reactor puede ser elemental con una sola celda, o constar de muchas celdas elementales. En cada celda se realiza la reacción química, que puede ser:

- i) Irreversible en las baterías primarias (baterías no-recargables que se usan solamente 1 vez), y
- ii) Reversible en las baterías secundarias (baterías recargables).

A continuación, se hará referencia siempre a las baterías secundarias, que se descargan al extraer electricidad, y se recargan al suministrarles electricidad, formando un ciclo de carga/descarga, que suele tener muy alta eficiencia (del orden del 95% o más) si la carga y la descarga se realizan a ritmos no muy rápidos. Lo anterior dependerá de las características de la batería, para que no se genere calor en dichos procesos.

La nomenclatura de batería es de alguna manera confusa en el uso popular, porque se refiere tanto a un conjunto de celdas elementales (llamadas pilas o baterías en forma indistinta), así como a una batería elemental (llamada celda en electroquímica). No obstante, las definiciones de celda y batería son precisas en los cuerpos normativos.

Históricamente la palabra pila o batería se refería únicamente a un conjunto de celdas conectadas entre sí para sumar tensión. De este modo, las celdas conectadas en serie suman voltajes, mientras que las celdas conectadas en paralelo suman corrientes. Los conectores entre bornes de celdas, llamados "puentes", pueden ser conductores de níquel o cobre soldados, o bien, piezas de metal atornilladas, si las celdas tienen bornes a tornillo.

En el caso de las baterías de litio o de níquel-hidruro metálico de un vehículo eléctrico a menudo se refiere al sistema total. Esto incluye las celdas interconectadas, más los componentes electrónicos de control, monitoreo, y protecciones de varias clases (eléctricas, mecánicas, y térmicas), junto con las carcasas y conectores externos. Todo el sistema se suele llamar *pack* (o paquete).

2. La batería de plomo-ácido

El ejemplo más común de batería es la del arranque del motor de un auto, que es de plomo-ácido de 12 Voltios, y está compuesta de 6 celdas en serie de 2 Voltios cada una. Cada celda tiene 2 grupos de placas o electrodos, un grupo de placas de plomo (negativo, o ánodo) y el otro grupo de óxido de plomo (el positivo o cátodo), además de un electrolito que es una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido al 30% en agua. En este caso, la batería funciona intercambiando los iones $SO_4(2-)$ entre las placas y el electrolito, según si el proceso es la carga o la descarga.

La batería de plomo ácido es una tecnología muy madura que tiene su nicho principal aun en el arranque de vehículos, en el sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) y energía de respaldo, y en

¹⁸ Como se analizará más adelante en este estudio, será completamente distinto el impacto de una batería de un vehículo eléctrico pequeño, como puede ser una bicicleta eléctrica o un monopatín (scooter), que el impacto de una batería de un vehículo eléctrico más grande o incluso un bus o colectivo eléctrico.

acumulación de energías renovables en sistemas relativamente pequeños. Tiene una energía específica demasiado baja (aproximadamente 40 – 50 Wh/kg) para ser usada en aplicaciones móviles o portátiles. No obstante, se usan estas baterías a menudo en algunos vehículos eléctricos de movilidad personal (scooters, triciclos, pequeños city-cars de 1 o 2 plazas) que son de bajo costo, sobre todo en China, India, y América Latina, donde hay multitud de modelos de este tipo de movilidad.

El plomo constituye prácticamente todo su peso en estas baterías y se recicla con un alto grado de recuperación, porque los circuitos de recolección y reciclaje están bien establecidos en casi todo el mundo. Es un material valioso y relativamente fácil de reciclar.

El plomo es una sustancia tóxica que no debe dejarse filtrar hacia el ambiente. El electrolito contiene 30% de ácido sulfúrico en agua, por lo que para su neutralización se lo suele mezclar con cal o alguna otra sustancia de acción básica, y para su reutilización se puede intentar separarlo del agua mediante métodos térmicos (Ballantyne, 2018). Sin embargo, los riesgos para la salud en los ambientes de reciclaje por el contacto con el plomo y ácidos son motivos de mucha preocupación (WHO, 2017).

3. Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)

Las baterías de níquel-hidruro metálico contienen celdas alcalinas, esto es que tienen un electrolito de una solución alcalina y son reciclables. Se trata del mismo tipo de química que tienen las baterías recargables tipo AA o AAA, solo que en los vehículos eléctricos tienen formatos de celdas más grandes. La celda elemental (o pila) de Ni-MH tiene 1,2 V nominales en cualquier formato, y es necesario construir arreglos de numerosas celdas en serie para llegar a los sistemas de alta tensión que usan los vehículos eléctricos.

Estas baterías están presentes usualmente en los vehículos eléctricos híbridos, tanto los enchufables como los no-enchufables, sobre todo de origen japonés. No todos estos tipos de vehículos eléctricos tienen baterías de níquel-hidruro metálico, por ejemplo, los de Volkswagen tienen batería de litio. La batería de níquel-hidruro metálico en dichos vehículos es usada solamente para los arranques y pequeños trayectos a baja velocidad, y para recuperar la energía de los frenos regenerativos. Esto le permite a un vehículo que es básicamente a combustión, aumentar su eficiencia, al tener un sistema que aprovecha en mayor grado la energía química del combustible.

Las baterías de níquel-hidruro metálico tienen una alta densidad de potencia pico (> 1.000 Watt/kg), que les permite altas razones de descarga, lo que las hace apropiadas para su uso en autos eléctricos no-enchufables. En cuanto a su densidad de energía (250 Wh/Litro) y energía específica (90 - 100 Wh/kg) son valores que están en 1/4 de los valores estándar de las baterías de litio.

En los autos eléctricos no-enchufables, la batería de níquel-hidruro metálico es relativamente más pequeña, de capacidad limitada (usualmente menos de 1,5 kWh en los autos sedán estándar), por tanto, de bajo precio total, en relación con una batería de litio más grande. Sin embargo, el precio de las baterías de litio ya es inferior al precio de las de níquel-hidruro metálico a igual capacidad, lo que indica que empiezan a disputar este nicho también. Esto se evidencia en la decisión de Toyota de incluir baterías de litio en algunas versiones nuevas de sus híbridos, desde 2021.

Entre los ejemplos más conocidos está la línea de vehículos híbridos no enchufables de Toyota, como el modelo Prius, uno de los primeros lanzados al mercado. Por ejemplo, se estima que el precio promedio de módulos de níquel-hidruro metálico de reemplazo procedentes de China para el Toyota Prius (HEV), es del orden de 500 dólares/kWh, un valor que triplica el precio de celdas de iones de litio. Esto permite prever que su uso en el mercado sea finalmente desplazado por baterías de litio, más económicas y poderosas, o cualquier tecnología superadora que venga después de ellas.

Los materiales contenidos dentro de las celdas de níquel-hidruro metálico son valiosos y pueden ser reciclados, obteniéndose altas proporciones de metales como níquel, cobalto y hierro, con métodos metalúrgicos simples, que se verán en el capítulo II.

Como las baterías de níquel-hidruro metálico están desde hace años muy presentes en la industria electrónica, existen instalaciones que las reutilizan y reciclan, habiendo una multitud de trabajos académicos de donde se puede obtener los métodos y procesos. Véase por ejemplo el de Sheng-Lun et al (2016).

4. Baterías de litio

Popularmente se llama batería de litio a lo que debería llamarse baterías de iones de litio (*lithium-ion battery*, por su nombre en inglés). En este tipo de baterías hay un intercambio entre sus electrodos, a través del electrolito, que es el ion positivo del elemento litio, es decir, el ion Li^+ . Este ion positivo es básicamente el átomo de litio (que es muy liviano, pues tiene solo 3 protones y 3 neutrones en su núcleo), al que le falta 1 de sus 3 electrones. Esta aclaración es importante, porque el nombre popular batería de litio da la idea errónea de que esta clase de baterías está compuesta principalmente por litio, pero éste es un componente minoritario, debido justamente a su escaso peso, en comparación con otros materiales presentes en estas baterías, y representa menos del 5% de la masa total de una celda.

Las celdas de las baterías de litio vienen en varios formatos. Las celdas pueden ser cilíndricas, tipo *pouch* (o sachet, o prismática pequeña), y prismáticas grandes¹⁹. Estas últimas suelen ser de LiFePO_4 (LFP). En este tipo de baterías los electrodos están hechos de láminas finas de unos 30 – 90 micrones de metal (conductores de electricidad), recubiertas por los materiales activos que realizan la reacción que involucra el intercambio de iones de Li (Li^+) a través del electrolito. El electrolito más común hoy en día está compuesto por sales, como hexafluoruro de litio y fósforo (LiPF_6), disueltas en solventes orgánicos, como etil-metil-carbonato (EMC) y dimetil-carbonato (DMC). Compárese con las baterías usuales de plomo-ácido, en cuyo caso lo que se intercambia entre los electrodos y el electrolito es el ion sulfato (SO_4^{2-}).

Las celdas de las baterías de litio pueden llegar a una muy alta energía específica (> 200 Wh/kg) y densidad de energía (> 500 Wh/litro) a nivel de celdas, lo que las hace ideales para su uso en movilidad eléctrica, tanto liviana como pesada, y aplicaciones portátiles como celulares y notebooks. Al formar sistemas con más componentes, las densidades de energía se reducen, en proporción al tamaño y complejidad del sistema o pack.

Un típico pack de baterías de litio de bicicleta puede alcanzar altos valores de densidad de energía, al no tener demasiados sistemas adicionales a las propias celdas y un pequeño circuito controlador electrónico.

5. Supercapacitores

En algunos vehículos eléctricos puede darse el caso que se encuentre otro tipo de acumuladores de energía, que se conocen como supercapacitores (SC) o ultracapacitores (UC). Un capacitor o condensador es un dispositivo que almacena energía en forma de campos eléctricos entre dos electrodos, a través de un material de alta constante dieléctrica. Como tal, se puede cargar y descargar en forma muy rápida y con muy alta potencia, aunque no guardan tanta energía como una batería electroquímica dado su peso y volumen. Otra de las características más atractivas de los supercapacitores es que poseen una vida útil muy larga, estimada en más de 50.000 ciclos, con lo cual prácticamente no se conoce el final de su vida útil (mucho antes terminará la vida útil de su aplicación).

Los capacitores eléctricos de doble capa (EDLC), comúnmente conocidos como supercapacitores, se basan en una doble capa dieléctrica que es un aislante que se puede polarizar. Estos supercapacitores se pueden fabricar con electrolitos solubles en agua y no solubles en agua, lo que afecta la densidad de energía y el peso. También se pueden construir en un diseño cilíndrico o

¹⁹ Las celdas tipo pouch (aunque más chicas) están presentes también en tablets y electrónica portátil. Las notebooks suelen tener cartuchos con 6 a 9 celdas cilíndricas; las celdas prismáticas (también más chicas) están presentes en muchos teléfonos celulares, de a 1 sola celda por teléfono.

prismático, como la de la batería de un teléfono celular. En la fabricación cilíndrica, las celdas de electrodos se depositan en láminas y se enrollan en un cilindro, con una carcasa. Los diseños cilíndricos son más comunes, pero están evolucionando más diseños prismáticos para que puedan sustituir a las baterías de iones de litio en productos de electrónica de consumo.

También existe el supercapacitor híbrido, que es un dispositivo que tiene las características combinadas de un capacitor (muy alta potencia de carga/descarga, pero baja capacidad de energía) y de una batería (más alta densidad de energía, pero baja densidad de potencia). El resultado es un dispositivo que permite recibir y entregar grandes picos de corriente, por tiempos más largos en segundos, en lugar de los escasos milisegundos típicos de un simple capacitor.

Los supercapacitores son usados en las aplicaciones de electrónica de potencia, como en la conversión de potencia en las turbinas eólicas y en los *inverters* para energía solar. La misma clase de electrónica de potencia, que incluye a los supercapacitor como elemento de *buffer*, se puede encontrar en los controladores de potencia de algunos vehículos eléctricos.

En los vehículos eléctricos, al menos en modelos más antiguos o pesados, los supercapacitores son usados como dispositivos complementarios a las baterías, y cumplen una función importante en los momentos de arranque y de frenado, en los que se producen las mayores ráfagas de corriente y potencias pico. Sobre todo, son usados en vehículos pesados de transporte público, que tienen paradas continuas, como en los buses y trenes subterráneos como el metro. Un ejemplo son los colectivos híbridos de Yutong que se implementaron en Uruguay (Transporte Carretero, 2020).

En los híbridos puede encontrarse supercapacitores que gestionan y amortiguan las corrientes pico entre el motor/generador y las baterías. Así, los supercapacitores suelen estar presentes en paralelo a las baterías, para admitir y entregar de nuevo los picos de corriente, ayudando a preservar la vida útil de las baterías. Sin embargo, debido a su mayor costo, actualmente los supercapacitores tienden a ser reemplazados en vehículos eléctricos por baterías de litio que ya son capaces de realizar las funciones de potencia, a un costo significativamente menor. Existen otros dispositivos comunes, como el transistor bipolar de puerta aislada (conocido por la sigla IGBT, del inglés *Insulated Gate Bipolar Transistor*), realizando las funciones dentro de la electrónica de potencia.

Las desventajas de los supercapacitores radican en que son más pesados, voluminosos y caros que una batería de litio, a igualdad de energía. Por otro lado, las ventajas de los supercapacitores incluyen que tienen una densidad de potencia mayor, y también una vida útil mucho más larga, por lo cual también son preferidos en aplicaciones pesadas, en las que hay constantemente cambios de régimen (paradas y frenadas). Una aplicación típica, fuera de vehículos eléctricos estándar, son los sistemas regenerativos en ascensores, y en las grúas de contenedores de los puertos.

Por todo lo dicho, no se prevé que los supercapacitores vayan a constituir un residuo significativo de la industria de la movilidad eléctrica en el corto ni mediano plazo. Al ser componentes típicos de la industria electrónica, su tratamiento al final de vida es en principio clasificable dentro de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Sin embargo, habrá que consultar la legislación específica en cada jurisdicción. Algunas de las marcas más conocidas son Maxwell, Bosch, PowerStor, Callergy, Loxus, Murata Manufacturing, Panasonic, Skeleton Technologies, entre otros.

En resumen, se muestra en el cuadro 4 las características comparadas de las baterías y el supercapacitor descritos anteriormente, en términos de densidad de energía, energía y potencia específica, las cuales inmediatamente permiten estimar los pesos y volúmenes de conjuntos o lotes de baterías, conociendo solamente sus capacidades en kWh. En la sección D se explorarán más detalles de las celdas. Para una revisión de las clases de baterías actuales en electromovilidad, se puede consultar a Miao et al (2019).

Cuadro 4
Características de energía y potencia, por volumen y por peso, de distintas baterías a nivel de celdas y de supercapacitores

Tipo de batería o acumulador	Potencia específica constante (en W/kg)	Energía específica (en Wh/kg)	Densidad de energía (en Wh/Litro)
Batería de plomo-ácido	5-10	40-50	80-90
Batería de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)	100-500	90-100	250-300
Batería de óxido de litio níquel manganeso y cobalto (NMC)	200-500	200-250	450-500
Batería de litio-ferro fosfato (LFP)	200-400	150-170	20-300
Supercapacitor	> 5 000	6-10	8-10

Fuente: Elaboración propia en base a especificaciones de baterías usadas en experiencia propia.

E. Componentes de una batería, las químicas más comunes y los detalles constructivos

En esta sección se introducen los componentes y los materiales que forman parte de las baterías de los vehículos eléctricos. En particular, se describen las partes de las baterías de litio, pero también las de níquel-hidruro metálico, y se revisan conceptos previos importantes sobre las arquitecturas de las baterías, y las nomenclaturas de sus componentes. Para poder entender los usos y las posibilidades de re-uso de estas baterías en términos de sus vidas útiles, es necesario conocer las partes constituyentes y los materiales de que están compuestas cada una de esas partes.

La acumulación de energía en un vehículo eléctrico tiene diversos niveles de complejidad, desde el simple y pequeño conjunto o pack de baterías elementales o celdas que tiene un auto liviano (por ejemplo, bicicletas, monopatines, scooters, *mopeds*, etc.), hasta el complejo sistema de baterías que tiene un auto eléctrico de pasajeros, y vehículos más grandes y pesados.

Obviamente, cuanto más pesado es el vehículo eléctrico, más potencia y capacidad tiene su batería, y mayor cantidad de sistemas auxiliares se requieren para el manejo de esa potencia, para su control y para el enfriamiento o calefacción, y por lo tanto más operaciones se requieren para su desmontaje.

En el corto plazo, la cantidad de vehículos eléctricos de porte liviano, como bicicletas eléctricas (e-bikes), monopatines o scooters, motocicletas, triciclos y cuadríciclos, city-car de tipo L6/L7 (estilo el Sero Electric o el Renault Twizy)²⁰, y muchas variantes de micro movilidad y movilidad personal, construidas en forma artesanal o personalizada, podrían multiplicar por cientos de veces a la cantidad de packs originados de autos eléctricos. Por eso, habrá que prestar atención a la generación de packs en desuso de estas clases de vehículos livianos, por cuanto pueden constituir un residuo informalmente tratado y acumulado en forma irregular en los puntos de venta, y en los talleres de fabricación y reparaciones.

Los sistemas o packs incluyen la electrónica de control y monitoreo de la batería, llamada BMS (*Battery Management System*), que contiene, entre otros, los sensores de temperatura, tensiones de celdas, corrientes, y circuitos con capacidad de interrumpir corrientes. Todos estos sistemas tienen además carcasas estancas (usualmente a prueba de agua y polvo), y pueden contener estructuras internas para su resistencia mecánica, térmica, y también protecciones contra golpes y vibraciones. Finalmente, los sistemas o packs de baterías más grandes, además de las celdas y BMS, pueden contener subsistemas de refrigeración y calefacción.

²⁰ Categorías L6/L7 siguen la definición de categorías de vehículos de Europa (EAFO), vehículos de no más de 450 kg.

Siempre se debe tener presente la distinción entre el nivel de celdas del nivel de sistema al referirse a una batería de litio o una batería de níquel-hidruro metálico. En las baterías más grandes y complejas pueden existir niveles intermedios, que pueden llamarse secciones y módulos. Estas distinciones pueden aplicarse tanto a baterías de litio como a las de níquel-hidruro metálico.

Cuadro 5
Descripción de los distintos niveles dentro de un sistema o pack de baterías

Celdas	En el caso de níquel-hidruro metálico, típicamente una celda tiene 1,2 V nominal. Una celda de litio en cambio puede tener 3,2 V (LiFePO4) o 3,7 V (NMC) nominales. En general, las conexiones entre celdas se hacen con soldadura de conductores de níquel, pero también hay celdas con bornes a tornillo, que permiten un fácil desmontaje.
Módulos	Varias celdas conectadas entre sí (a menudo mediante conectores de níquel soldados), en paralelo y forman un módulo sumando corrientes, que luego se pondrá en serie con otros módulos sumando tensiones. Pueden contener carcasas o elementos estructurales, cables y conectores.
Secciones	Varios módulos pueden formar una sección, la cual puede estar en una zona determinada del vehículo, por ejemplo, adelante, o atrás, o bajo uno de los asientos, y pueden contener carcasas o elementos estructurales, cables y conectores.
Packs o sistemas	El conjunto de secciones, módulos, celdas, más las estructuras de soporte, carcasas, y sistemas electrónicos de control (BMS), conectores, interruptores, y sistemas de refrigeración y calefacción.

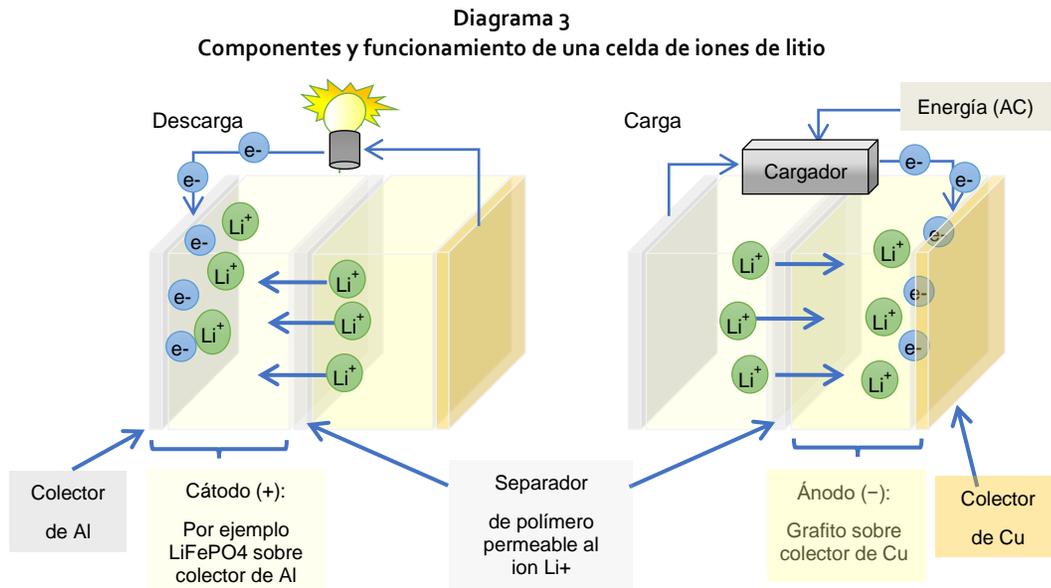
Fuente: Elaboración propia.

Las celdas de las baterías son ejemplos de celdas electroquímicas donde se efectúan reacciones químicas relacionadas con el consumo o liberación de energía eléctrica, ya sea en forma irreversible (batería primaria, o descartable), o en forma reversible (batería secundaria o recargable).

Las celdas electroquímicas tienen usualmente 4 componentes básicos (véase diagrama 3):

- i) un electrodo positivo (cátodo, hacia donde van los cationes, o iones positivos, en la descarga).
- ii) un electrodo negativo (ánodo, hacia donde van los aniones, o iones negativos, en la descarga).
- iii) un elemento separador, en general un sólido poroso o permeable a ciertos iones, que impide el contacto eléctrico entre los electrodos, pero es permeable a los iones que transportan carga de un electrodo al otro. A veces el separador sólido poroso hace la función de electrolito, pero en general se agrega un electrolito líquido.
- iv) una solución (líquido, o gel, o sólido) llamada electrolito²¹ que actúa como reservorio y medio de transporte de los iones en disolución que reaccionarán con los electrodos.

²¹ El separador cumple 2 funciones: impedir que los electrodos se toquen (cortocircuito), y dejar pasar los iones que circulan en el interior de la celda. Usualmente el electrolito es líquido, pero puede ser un gel o material gelificado. Si el electrolito es sólido, como el que contiene la nueva generación de baterías de litio de estado sólido en desarrollo, el mismo electrolito actúa como separador.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los iones Li^+ atraviesan el electrolito (líquido) y el separador (polímero) al tiempo que los electrones circulan por el circuito externo, realizando trabajo eléctrico en la aplicación (en la Descarga), o son forzados por el cargador en la dirección opuesta, ingresando energía en la batería (en la Carga).

En este contexto, como se aprecia en el diagrama:

- descargar una batería es extraer la energía eléctrica desprendida de la reacción química (espontánea) a través de un circuito eléctrico externo en donde se realiza trabajo. En este proceso el potencial eléctrico entre los electrodos va disminuyendo, a medida que tanto los iones (internos) como los electrones (por el circuito externo), van desde el ánodo hacia el cátodo, hasta un cierto nivel en que se detiene la reacción, o se detiene la descarga en forma deliberada para no dañar la celda; y
- cargar (o recargar) una batería es entregarle energía eléctrica para realizar la reacción química en la dirección inversa, forzada, para almacenar mayor potencial químico, que a su vez va generando una diferencia de potencial eléctrico (voltaje o tensión, medida en Volts) creciente entre los electrodos. Durante la carga tanto los iones (internos) como los electrones (por el circuito externo) regresan del cátodo hacia el ánodo.

Las celdas²² son las baterías elementales que, formando arreglos en serie y en paralelo, componen los sistemas (o packs), de mayor tensión y corriente, llegando hasta los de alta tensión y altas corrientes característicos de un auto eléctrico. A continuación, se verán detalles de los tipos de celdas más usados, por un lado, en níquel-hidruro metálico y por otro en litio.

1. Celdas de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)

Las celdas de los vehículos híbridos que tienen baterías más chicas son de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), cuya química es la misma de las pilas recargables de uso doméstico, tipo AA y AAA. Estas baterías se componen de un electrodo positivo de $\text{NiO}(\text{OH})$ (hidróxido de óxido de níquel) y un electrodo negativo formado por alguna aleación, que suele contener elementos de tierras raras y otros metales, usualmente del tipo AB_5 o AB_2 : $\text{AB}_5 = \text{REE}$ (Nd, La, Ce, Pr), en combinación con otros metales

²² En inglés *cell*, traducido correctamente como *celda*, a veces es mal traducido (sobre todo en traducciones automáticas) como *célula*, que es el término usado en biología, y se debe evitar.

(Al, Co, Mn, Ni), y AB₂ = (Ti o V), en combinación con (Zr, Ni), modificado con (Cr, Co, Fe, Mn) (Sheng-Lun et al., 2016).

Sheng-Lun et al (2016) analiza una típica celda de níquel-hidruro metálico tipo AAA de 1,2V, que pesa 10,9 gramos e indica que los componentes metálicos forman más del 60% de la masa de la batería. Los contenidos de metales valiosos de ser recuperados son aproximadamente Ni (17,9%), Fe (15,4%), Co (4,41%) y REE (17,3%). La mayor parte del hierro se encuentra en los componentes de acero como el colector y el terminal del cátodo, y la grilla de metal del ánodo, mientras que el Ni (>90%) y el Co (>90%) se encuentran en los materiales activos del ánodo y el cátodo (polvos metálicos). Cerca de 1,88 gramos de tierras raras (Ce, La, Y) pueden obtenerse de 1 sola celda típica de 10,9 gramos (Sheng-Lun et al., 2016).

En el mismo trabajo se analiza el peso de los componentes de la celda, de los que destacan el polvo de metal del cátodo (33,2%), el polvo de metal del ánodo (29,3 %) y colector de acero del cátodo (20,7 %). En cuanto al contenido total de elementos, destacan el Ni (17,9 %), Fe (15,4 %), La (12,1 %), Ce (5,16%) y Co (4,41 %), con porcentajes en peso. En el mismo trabajo se pasa revista a los métodos conocidos para su recuperación (Sheng-Lun et al., 2016).

2. Celdas de litio, sus componentes y químicas más comunes

Una celda de litio es un tipo particular de celda electroquímica, en el que los electrodos están fabricados con delgadas láminas de metales (cobre en el ánodo, aluminio en el cátodo), recubiertas por finas capas de materiales activos, donde se realiza la reacción que involucra al litio.

Una batería de iones de litio genera electricidad a través de reacciones químicas de litio que se producen en los materiales activos del cátodo y el ánodo. Cuando la celda se está descargando, el ion de litio se desprende del ánodo, pasa por el separador, y va a insertarse en el material activo que recubre el cátodo. Cuando la batería se recarga, ocurre el proceso opuesto.

Dado que el litio es inestable en forma de elemento, en el cátodo se usan combinaciones de litio con oxígeno y otros materiales (como Ni, Co, Mn, FePO₄, etc.). El óxido de litio con otros materiales que se usa como material activo en el cátodo es lo que dará nombre específico a la batería de litio. Por ejemplo, las baterías de litio más comunes: NMC es un tipo de batería que tiene un cátodo con óxido de níquel, manganeso y cobalto (Li (NiCoMn)O₂). LFP es otro tipo de batería que tiene un cátodo de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄). Estos dos tipos de baterías de litio son los más comunes en el mercado actualmente.

Existen empresas que solamente fabrican el cátodo y el ánodo y el separador y los venden en rollos para que otras ensamblen baterías. El hecho de que todas las celdas de las baterías de litio estén construidas con esta estructura laminar podría apuntar a que es posible hasta cierto punto estandarizar ciertos procesos en el desarmado para su reciclaje. Sin embargo, en la práctica la existencia de múltiples formatos y químicas de celdas implica tener que elegir, en cada lote de celdas a procesar, entre variantes de los procesos, como se verá en el capítulo II. En internet se pueden encontrar numerosos videos en los que muestran cómo se abren celdas de baterías de litio y se muestran sus partes y materiales. Posteriormente se comentará sobre los recaudos y peligros asociados al manejo de estas celdas.

Cuadro 6
Tipos de baterías de litio por la química de sus cátodos y sus características

Celda	Litio oxido de cobalto (LCO)	Litio ferro-fosfato (LFP)	Óxido de manganeso y litio (LMO)	Níquel-cobalto-aluminio (NCA)	Níquel-manganeso-cobalto (NMC _(xyz))
Material del Cátodo	LiCoO ₂	LiFePO ₄	LiMn ₂ O ₄	Li(Ni,Co,Al)O ₂	LiNi _x Mn _y Co _z O ₂
Estructura tipo	Capas	Olivina	Espinela	Capas	Capas
Año introducción al mercado	1991	1996	1996	1999	2008
Presencia en mercado y características.	Obsoleta, primeros celulares y notebooks.	Creciente, buses y vehículo eléctrico pesados, y en storage.	Poco frecuente, menguante.	Estable, algunos vehículos eléctricos la usan.	La más común hoy en vehículo eléctrico y electrónica, descenso en porcentaje de Co y precio.

Fuente: Elaboración propia con datos de Harper et al (2019).

a) Celdas de litio (NMC) o litio con óxidos de níquel, manganeso y cobalto (LiNiMnCoO₂)

Las celdas de litio (NMC) son las más comunes en el mercado de movilidad eléctrica, tanto en vehículos livianos como en vehículos estándar de pasajeros (autos) y de mayor porte también. El material activo del cátodo contiene un óxido mixto de níquel, cobalto y manganeso (fórmula del material del cátodo: Li (Ni_xMn_yCo_{1-x-y})O₂). Su tensión de celda nominal es en promedio 3,75 Volts, pueden estar cargadas hasta 3,9 Volts y algunas incluso hasta 4,1 Volts, y descargadas hasta unos 2,5 Volts. Este voltaje les otorga una alta densidad de energía, lo que las hace muy livianas, aunque en algunos casos no han sido tan estables o seguras.

Nuevas variantes de las celdas de litio con mejores características de seguridad están llegando al mercado de los vehículos eléctricos y también son usadas en almacenamiento estacionario de energía (ESS), aunque en menor proporción que las de litio-hierro-fosfato. En todas las celdas NMC que contienen cobalto, los fabricantes están haciendo esfuerzos de desarrollo, para reducir este componente caro y problemático, incrementando el contenido de níquel. En el caso de estas celdas, distintas proporciones de cobalto y de níquel; y manganeso dan lugar a la convención de nombres que se muestra en el cuadro 7, y un material nuevo que se está imponiendo en el mercado por sus mejores características es NMC811.

Cuadro 7
Variantes de celdas níquel-manganeso-cobalto y fórmula por la proporción de estos materiales en su cátodo
(En porcentajes del total)

Tipo de celdas níquel-manganeso- cobalto (NMC)	Li(Ni _x Mn _y Co _{1-x-y})O ₂		
	Ni (x)	Mn (y)	Co (1-x-y)
NMC111	0,33	0,33	0,33
NMC532	0,5	0,3	0,2
NMC622	0,6	0,2	0,2
NMC811	0,8	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia; para ver la nomenclatura véase por ejemplo Miao et al. (2019).

La vida útil típica de las celdas NMC se cuenta entre los 1.500 a 2.500 ciclos, a profundidad de descarga del orden del 80%, a razones de descarga²³ de 1C o menor —y en un tiempo no menor de 1 hora— y de carga de 0,5 C o menor y en no menos de 2 horas. Cargas o descargas más rápidas (por ejemplo, 2C, 4C, etc.) tienen el efecto de esforzar más sus materiales, y de allí que las celdas duren menos ciclos.

La combinación de níquel y manganeso mejora las fortalezas de cada uno, lo que convierte a NMC en el sistema de iones de litio más exitoso y adecuado para sistemas de propulsión de vehículos eléctricos. Estas baterías tienen una gran demanda actualmente, dada la alta energía específica y excelentes características térmicas. Las celdas de NMC han sido utilizadas por muchos fabricantes de autos eléctricos, incluidos el Nissan Leaf, el Chevy Volt y el BMW i3.

b) Celdas de litio-hierro-fosfato (LFP) o fosfato de hierro y litio (LiFePO₄)

A diferencia de las celdas de litio con níquel-manganeso-cobalto, las celdas de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) tienen cátodos con menor energía específica solo 150-170 Wh/kg y son más pesadas y con igual energía. Además, las celdas LiFePO₄ tienen menor densidad de energía con 250-350 Wh/L y ocupan mayor volumen. Sin embargo, son celdas muy estables, más seguras, y ofrecen una larga vida útil de ciclos. Su tensión de celda nominal es en promedio 3,2 Volts y pueden estar cargadas hasta 3,65 V y descargadas hasta unos 2,0 V o 2,5 V.

Las celdas de litio-hierro-fosfato son más comunes en los vehículos eléctricos más pesados, incluyendo utilitarios, buses, aunque algunos autos también las están incorporando. Un ejemplo es el Tesla Model 3 de la versión que se fabrica en Shangai, China, pero Tesla evalúa usar estas celdas en otros modelos (Wayland 2021). Estas son decisiones estratégicas de cada fabricante, relacionadas a precios y facilidad de abastecimiento.

Para los fabricantes, la ventaja principal de las celdas de litio-hierro-fosfato es que sus cátodos no contienen cobalto. Otras ventajas de estas celdas son su mayor estabilidad térmica, ya que pueden operar entre -30° C y +60° C y seguridad, junto a una mayor vida útil en ciclos (Miao, 2019). A cambio de eso, su densidad de energía y su energía específica son menores, lo que resulta en baterías más voluminosas y pesadas.

La vida útil típica de este tipo de celdas es de entre los 3.000 a 4.000 ciclos, a profundidad de descarga del orden del 80%, a razones de descarga de 1C (en no menos de 1 hora) y de carga de 0,5C (en no menos de 2 horas). Pero estas celdas típicamente pueden dar hasta 4C, una relación de 4x entre la corriente y la capacidad, véase anexo 1. Se usan también cada vez más en acumulación estacionaria.

Por otro lado, estas celdas exhiben una autodescarga más alta que otras baterías de iones de litio, lo que puede causar problemas de equilibrio con envejecimiento. Esto puede mitigarse mediante el uso de electrónica de control sofisticada, con un aumento de costo del pack. También la humedad parece limitar significativamente la vida útil de estas baterías (Miao, 2019).

c) Celdas de litio (NCA) o litio con óxido de níquel, aluminio y cobalto (LiNiAlCoO₂)

Las celdas de litio que incorporan aluminio en la formulación de sus cátodos, conteniendo óxidos de níquel, aluminio y cobalto (LiNiAlCoO₂), son conocidas como NCA. Éstas tienen alta energía específica de 200 a 250 Wh/kg, pero rinden una menor cantidad de ciclos. Están presentes en el mercado de movilidad eléctrica, principalmente en vehículos de alta gama como ciertos modelos de Tesla Motors.

²³ Para revisar la nomenclatura de "xC" (10C, 20C, etc) o el concepto de razones de descarga, consúltese el anexo 1.

La combinación de óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio ha sido ensayada como material de cátodo desde 1999, sobre todo para aplicaciones especiales. Comparte similitudes con NMC al ofrecer alta energía y potencia específicas, la tasa a la que la batería puede entregar energía y una larga vida útil (Hannan, 2018).

Las celdas de litio NCA no son tan seguras como las de otras químicas mencionadas anteriormente y, como tal, se requiere emplear medidas especiales de monitoreo de seguridad para su uso en vehículos eléctricos y otras aplicaciones. Estas celdas también son más costosas de fabricar, lo que limita su viabilidad para su uso en otras aplicaciones (Atwell, 2018). Hasta ahora, Tesla es el único fabricante conocido que las utiliza, y la empresa afirma que su batería NCA en producción tiene incluso menos cobalto que la NMC811 (Bower, 2018), que tiene 10% de este material en el cátodo.

De hecho, las baterías NCA utilizadas en el Tesla Model 3 y el primer Model S en 2012 siempre tuvieron muy bajo contenido de cobalto en sus cátodos, en el orden del 15 %, y de acuerdo con Benchmark Mineral Intelligence, Tesla estuvo trabajando con Panasonic para reducirlo aún más: Entre 2010-2012 los primeros modelos Tesla Roadster y Tesla S tenían unos 11 kg de cobalto por vehículo, hacia 2016-2018, los modelos S y X ya tenían 7 kg de cobalto por vehículo. Después de 2018, el Model 3 tiene 4,5 kg de cobalto por vehículo (Bower, 2018). Esto también podría deberse a diferencias entre las capacidades relativas de los packs de cada uno de esos modelos.

d) Celdas con ánodo de litio titanato (LTO) o litio con óxido de titanio (LiTi₅O₁₂)

Las celdas con ánodos de litio-titanato (LTO), se conocen desde la década de los 80's, y traen un cambio revolucionario en el ánodo, en el que se reemplaza el grafito usual con nano-cristales de titanato de litio (LiTi₅O₁₂), y el material forma una estructura de espinela.

Esto les da a los ánodos una relación de área de superficie a volumen más grande que en el caso del ánodo de carbono, lo que permite que los electrones entren y salgan del ánodo muy rápidamente, lo que la convierte en una de las baterías de carga más rápida en la categoría de iones de litio.

El contraelectrodo puede ser óxido de manganeso de litio o NMC. El titanato de litio tipo espinela se ha considerado como un material de electrodo muy útil debido al cambio de volumen cero durante la litación, lo que lleva a una vida útil operativa extremadamente larga para el electrodo, junto con la seguridad mejorada debido a una meseta de carga y descarga extremadamente plana a aproximadamente 1,55 V frente a Li/Li⁺ (Miao, 2019). Este material tiene baja conductividad electrónica y su coeficiente de difusión de Li⁺ puede resultar en un rendimiento deficiente a altos niveles potencia. Esto se puede mejorar mediante la reducción de las longitudes de caminos de transporte de iones de litio a través de una nano estructuración adecuada, el dopaje, el recubrimiento de superficies y la formación de compuestos con mejores conductores electrónicos, como materiales de carbono (Miao, 2019).

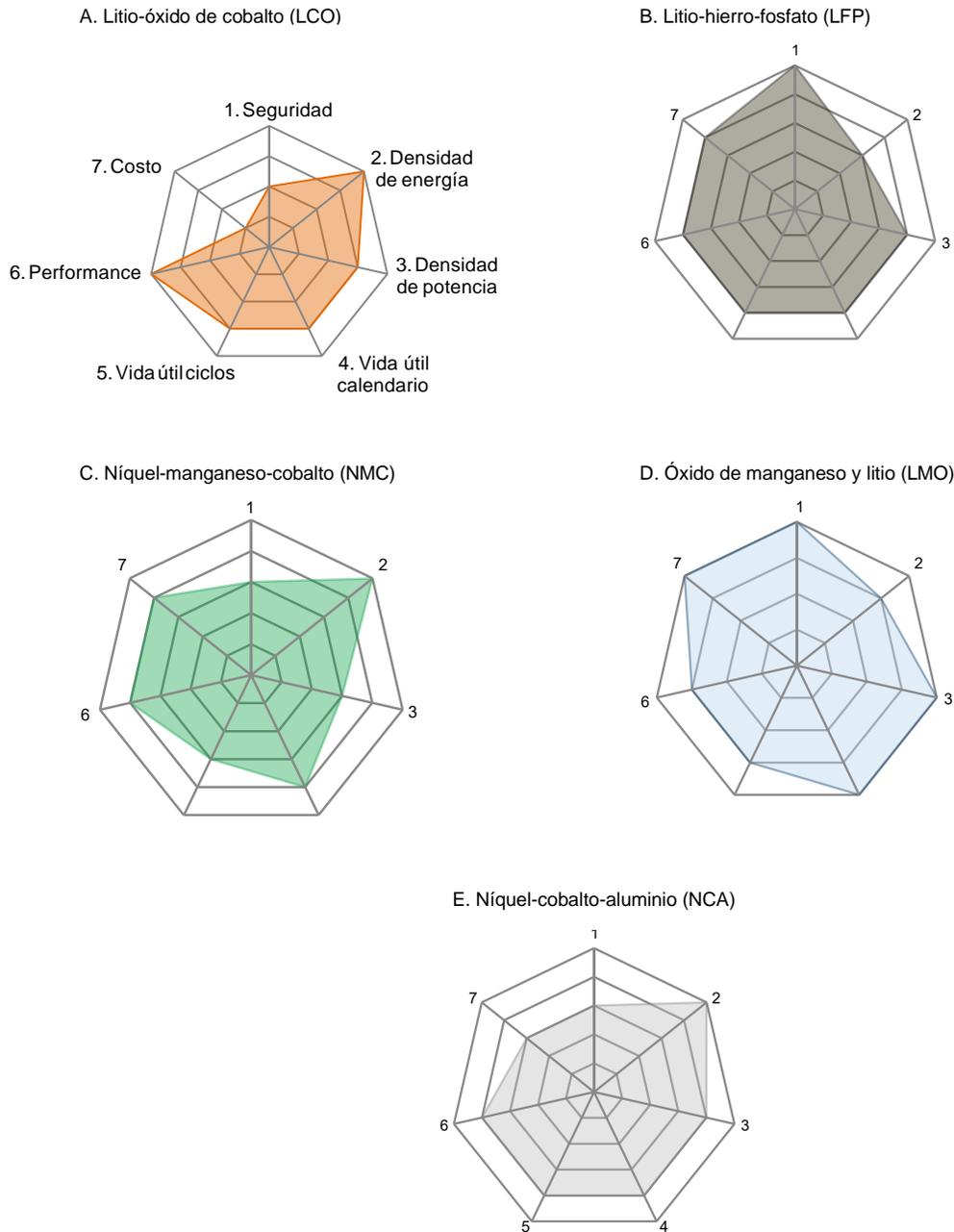
Por el cambio del material del ánodo, las celdas con ánodos de litio-titanato son capaces de altas descargas, del orden de 20C a 40C sin problemas térmicos, y tienen vidas útiles muy superiores a las de litio. En contraste tienen menor densidad de energía, ya que su tensión de celda es de 2,3 V, es bastante menor que en otras tecnologías de litio convencionales (Miao, 2019).

Dicho esto, las celdas con ánodos de litio-titanato son una de las plataformas más seguras con respecto a las tolerancias térmicas, lo que las hace una opción muy segura para su uso en toda clase de vehículos eléctricos, con posibilidades en las industrias militar y aeroespacial (Atwell, 2018), así como en aplicaciones marinas, toda vez que una alta descarga y una gran resistencia de las celdas sea requerida. Están presentes en el mercado de movilidad eléctrica, principalmente en vehículos de alta gama y colectivos, más por su potencia específica que por su densidad de energía. Estas baterías se usan en ciertas versiones japonesas del vehículo eléctrico i-Mi vehículo eléctrico de Mitsubishi, y Honda las usa en su vehículo eléctrico Fit EV. También se utilizan en el concepto de autobús eléctrico Tosa. Debido a su alto nivel de seguridad, las baterías de titanato de litio se utilizan también en dispositivos médicos móviles (Miao, 2019).

Resumen de celdas de iones de litio

En resumen, se puede apreciar que las celdas de litio de diferentes cátodos y ánodos tienen algunas características diferenciales, y sobre todo hay que tener en cuenta que tienen distintas tensiones características (nominal, carga y descarga), al momento de construir un pack con ellas. En el gráfico 2 se comparan las celdas de distintas químicas y sus 7 propiedades.

Gráfico 2
Comparación de parámetros de celdas de baterías de litio, por la química de sus cátodos



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Harper et al, (2019) y Miao, (2019).

Hay muchas opciones de materiales para los electrodos positivos y negativos, el electrolito y el separador. Las limitaciones tecnológicas de los diversos materiales están impulsadas por su función, como se explica a continuación.

Las baterías deben funcionar sometidas a exigencias de un entorno climático amplio, que probablemente se extienda, por ejemplo, desde -20°C , para un vehículo que ha estado estacionado durante un período de tiempo en frío extremo, a $+60^{\circ}\text{C}$ para una batería que se ha calentado como consecuencia de la combinación de las condiciones ambientales y el calor generado por un proceso de carga rápida. En estas condiciones de uso tan variadas, el electrolito debe ser capaz de ofrecer el mayor transporte posible de iones de litio, sin cambiar apreciablemente su estado. El separador también debe ofrecer la mayor conducción de iones de litio posible bajo las mismas condiciones operativas, y debe ofrecer la capacidad de un rápido apagado térmico si se produce un sobrecalentamiento significativo, para evitar un proceso de avalancha térmica, a partir del cual ya no es posible controlar la celda.

3. Nivel de sistemas o *packs*

Los sistemas o *packs* de baterías que pueden exhibir tanto un vehículo eléctrico liviano y o una motocicleta, así como un vehículo eléctrico más pesado y complejo comprenden todos los sistemas de protecciones necesarios para que las baterías elementales o celdas operen con seguridad, controlando la energía que puede recibir en la carga, o entregar en la descarga de la batería.

Estos sistemas comprenden las celdas conectadas entre sí mediante conectores, sistemas de control (*Battery Management System* o BMS) y monitoreo, sistemas de refrigeración y calefacción, carcasas y estructuras (protección mecánica, térmica, impermeabilización). En los *packs* más sofisticados, de los vehículos eléctricos más grandes, los *packs* pueden contener protecciones ante golpes y vibraciones. Finalmente, los *packs* contienen contactores u otras clases de interruptores de corriente. En general para los autos eléctricos todos los componentes de las baterías cumplen estándares automotrices (ISO, UNECE, etc.), y certificados con grados de estanqueidad IP67 o superior.

En contraste con los *packs* de vehículos grandes como un auto o un bus eléctrico, los *packs* de un vehículo liviano, como una bicicleta eléctrica, son mucho más simples, y contienen básicamente las celdas, soldadas por flejes delgados (0,15 a 0,25 mm) de metal, más un relativamente pequeño circuito BMS, pero no tienen sistemas auxiliares de refrigeración ni grandes estructuras.

Por ejemplo, el sistema de baterías de un Nissan Leaf de 22 kWh contiene 48 módulos de 4 celdas de 33Ah c/u, fabricadas por AESC (Automotive Energy Supply Corporation), un *joint venture* entre Nissan y NEC, ubicada en Yokohama, Japón. A partir de 2018, Nissan Leaf introdujo en Japón la segunda generación con la nueva batería de 40 kWh que luce externamente igual, pero por adentro logró una organización más compacta con celdas más poderosas (Noya, 2020).

El mismo tipo de esquema es seguido en el caso de baterías de níquel-hidruro metálico de los vehículos eléctricos híbridos. Los otros componentes que conforman un sistema según su complejidad pueden ser:

- la electrónica de control y monitoreo de potencia (*Battery Management System* o BMS),
- el cableado anaranjado (indicando alta tensión), el cableado negro (indicando neutros o polos negativos), cables más finos para señales de datos de sensores y control,
- contactores y/o relés (elementos de conmutación de altas corrientes en DC o AC),
- el sistema de refrigeración/calefacción, y
- las carcasas, elementos estructurales, de aislación y de protección, conectores (estancos).

En general se puede advertir una importante presencia de metales comunes como aluminio o hierro, y plásticos, gomas y selladores, cuyas proporciones son estimadas en el gráfico 4 de la sección F. El sistema o pack en el caso de un colectivo eléctrico (e-bus) puede contener aún más peso en estructuras de soporte y refrigeración. Por ejemplo, el pack del e-bus fabricado por AKASOL para un e-bus de 18 metros, de la marca VDL Bus & Coach (VDL) en Colonia, Alemania. Este sistema es de recarga rápida frecuente (de 300 kW de potencia en cada parada) y relativamente menor capacidad de energía (100 kWh).

4. Sistemas de control (BMS)

La función de los sistemas de control BMS (*Battery Management System*, en inglés) o es mantener las baterías en un régimen de operación seguro, a través de sensores que miden una cantidad de parámetros relevantes, que incluyen:

- las tensiones (V) de las celdas o grupos de celdas en serie (cada tensión de la serie),
- las temperaturas (T) de las celdas, o de grupos de pocas celdas, de modo tal que se considere una temperatura representativa de cada grupo, y
- la corriente total de carga o descarga del pack, que deben estar limitadas por valores máximos respectivos.

La función más básica del BMS es decidir si interrumpe la corriente principal, mediante algún componente conmutador (como un contactor o un conjunto de mosfets) frente a alguna condición en la que se excedan los parámetros de seguridad preprogramados (tensiones máximas, temperaturas máximas, corrientes máximas, etc.). En este sentido un BMS es básicamente un control de seguridad.

Además, los sistemas BMS de baterías más grandes, o incluso de vehículos eléctricos livianos, pero de alta gama, cumplen funciones de comunicaciones con el exterior, para el monitoreo de la batería. Esta comunicación puede ser desde Bluetooth (por ejemplo, con una aplicación de teléfono celular) y Wifi (con una red Ethernet), hasta protocolos industriales como RS485 MODBUS o CAN. Éste último es más común en la industria automotriz. Mediante esos protocolos el BMS puede comunicar datos al equipo o equipos de control del vehículo en el que se integra la batería, incluyendo los cargadores y sobre todo si son de recarga rápida, lo que aumenta la seguridad global del vehículo y su entorno.

De allí la importancia de la correcta integración del BMS, a nivel de datos, con las aplicaciones a las que sirve la batería. Es importante tener en cuenta estas consideraciones al momento de querer reutilizar una batería, construyendo un nuevo sistema con partes de baterías usadas o retiradas de vehículos eléctricos.

Cuando la batería es grande, como la de un auto eléctrico, los sistemas BMS están formados por varias partes (placas de circuitos integrados), correspondiendo a cada una de las secciones o partes de la propia batería, que también interactúan con el sistema maestro del BMS. Esto se debe a que las baterías grandes pueden tener partes ubicadas en distintos lugares de las aplicaciones, como en un auto, o en un rack que contiene módulos de baterías.

Esto es lo que se denomina en electrónica una arquitectura distribuida o maestro-esclavo (*master-slave*). De este modo el nombre *Battery Management System* o BMS se reserva para la unidad maestro, que obtiene información de las unidades esclavo que se llaman *Battery Monitoring Unit* o BMU. Los BMU no tienen ninguna función de control, solo de monitoreo, y pasan los datos al BMS, que bajo ciertas condiciones puede tomar la decisión de cortar la corriente total, y que pasa los datos principales a la unidad de control superior, ya sea un *inverter*, un cargador, o una ECU o controlador en un EV, etc.

Algunos fabricantes de vehículos o aplicaciones que contienen BMS con tecnología propietaria pueden proteger sus equipos de la intromisión no autorizada mediante claves de acceso. De allí que en esos casos sea necesario contar con la autorización de los fabricantes para cualquier intervención que involucre desarmar y rearmar una batería que contenga esos BMS.

La producción de packs para vehículos eléctricos empieza por la cuidadosa selección y clasificación de las celdas, en máquinas que pueden ensayar (carga y descarga bajo parámetros controlados), cientos de celdas a la vez. Estas máquinas son conocidas en la jerga como cicladoras (*battery testing equipment*), a nivel de producción, aunque también se usan, a nivel laboratorio, equipos llamados potenciostatos, que tienen mayor precisión y menos canales. Las máquinas cicladoras típicas pueden ensayar celdas de una o varias clases, según las bandejas porta celdas que tengan. Además de proveer la carga y descarga, hay máquinas que clasifican las celdas por distintos parámetros como la resistencia interna y la capacidad, para obtener conjuntos de celdas lo más homogéneas posibles, para armar packs de alta calidad, en las que el BMS no tenga que gastar mucho trabajo en el balanceo de estas.

El armado de los packs se completa con operaciones de fijado de las celdas en su posición, soldadura o conexión de las celdas entre sí y con los conductores principales de corriente, instalación de sensores (temperatura, tensión, corriente) y cableado e instalación del BMS, y otros circuitos de control o monitoreo, instalación de sistemas de refrigeración/calefacción (en los packs más grandes), y cierre de carcasas. Terminado el proceso de ensamblado de los packs, se vuelve a ensayar la carga y descarga del pack como un todo, en máquinas cicladoras que tienen menos canales y mayor potencia por canal.

El ensamblado de packs de nivel automotriz es en general un proceso cuidadosamente planificado para la producción en serie, lo que lleva a un cierto orden de operaciones. Muy distinto es el trabajo del desmontaje de un pack genérico que llega a una planta de tratamiento, a menos que haya un plan por un convenio previo con cierta automotriz u fabricante del pack, acerca de un modelo específico de pack, en cuyo caso se conocen de antemano las operaciones de desmontaje.

A los efectos de aportar datos para la posterior explicación sobre desmontaje y las actividades que se requerirán y los desafíos en los distintos niveles se muestra en el cuadro 8 los niveles que van de pack a módulo y a celdas, de 3 autos eléctricos típicos seleccionados del año 2014. Se eligen modelos de varios años atrás, ya que serán los vehículos eléctricos de años anteriores los que llegarán primero al final de vida y requerirán su desmontaje. Sin embargo, es de esperar que las nuevas versiones tendrán sistemas similares, probablemente con mayor densidad de energía, con nuevas químicas de celdas, y quizá empaquetamientos más compactos.

Cuadro 8
Características de packs de tres modelos de autos eléctricos de 2014

Modelos de 2014	Unidad	Tesla Model S	BMW i3	Nissan Leaf
Pack completo		Panasonic	Samsung SDI	AESC
Capacidad	kWh	85	22	22
Tensión (nominal)	V	355,2	355,2	360
Peso total	kg	530	235	294
Peso unitario	kg/kWh	6,2	10,7	13,4
Largo	m	2,830	1,66	1,57
Ancho	m	1,772	0,963	1,188
Altura	m	0,127	0,265	0,259
Vol. (aprox.)	m ³	0,637	0,424	0,483
Módulos:				
Módulos/pack		16	8	48
Tensión módulo	V	21,6	44,4	7,5
Peso módulo	kg	25	24,5	3,8

Modelos de 2014		Tesla Model S	BMW i3	Nissan Leaf
Pack completo	Unidad	Panasonic	Samsung SDI	AESC
Largo módulo	cm	66,5	36	30,3
Ancho módulo	cm	30,2	31,1	22,5
Altura módulo	cm	7,9	15	3,5
Vol. (aprox.)	L	15,87	16,79	2,39
Celdas:		Cilíndricas	Prismáticas	Pouch
Tipo de cátodo		NCA	NMC	LMO/NMC
Tensión	V	3,6	3,7	3,75
Celdas/módulo (configuración)		444 (74P x 6S)	12 (12S)	4 (2P x 2S)
Peso celda	kg	0,0485	2	0,914
Largo o diámetro	cm	1,8	17,3	26
Ancho o diámetro	cm	1,8	4,5	22,5
Altura	cm	6,5	12,3	0,79
Volumen aproximado	cm ³	16,54	957,56	462,15

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de una figura de Harper, (2019).

F. Implicancias del crecimiento de la electromovilidad en la demanda de materiales

Las cadenas de suministro globales están mostrando signos de inestabilidad y hay una alta volatilidad en los precios en diversos materiales y de los insumos requeridos debido a los movimientos en los mercados de electromovilidad. Tal es el caso de los materiales que requieren las baterías para vehículos eléctricos que se componen fundamentalmente varios minerales –entre otros cobre, níquel, grafito, manganeso, cobalto y litio. También los componentes de los motores necesitan materiales tales como cobre, aluminio, y en algunos casos tierras raras, como neodimio para los imanes (UNCTAD, 2020).

Un estudio exhaustivo sobre el mercado de los minerales y sus fuentes es el reporte publicado por U.S. Geological Survey (U.S. Geological Survey, 2021). La Unión Europea publica con cierta frecuencia listas de los que son considerados los minerales críticos. Según la última lista, dentro de los minerales de baterías de electromovilidad, están el litio, cobalto, titanio, fosfato en roca, grafito natural (EU Raw Materials, 2020).

Pese a que la mayoría de los vehículos eléctricos se equipa con baterías de litio, dicho mineral constituirá un elemento minoritario, en peso, en la batería de estos vehículos, aunque se puede ver que tiene mayor impacto en su precio (Mining Press, 2022.a; 2022.b). Actualmente existe un importante descalce entre la oferta y la demanda de litio, por el hecho de que los proyectos de minería de litio tardan muchos años en llegar a estar productivos, mientras que la demanda para baterías de electromovilidad se ha incrementado de golpe; esto ha hecho que los precios de litio al presente alcancen valores máximos de hasta 70.000 dólares por tonelada de carbonato de litio equivalente (LCE).

De todos los minerales presentes en las baterías de litio, el grafito (básicamente C6, el mismo tipo de material de la mina de los lápices) que forma el material activo de los ánodos en casi todas las baterías, es uno de los materiales más concentrados geopolíticamente. China controla el 84% de la producción mundial de grafito para baterías (Raad, 2022).

Entre los minerales insumidos por las baterías de la electromovilidad, algunos son de diversos grados de criticidad. No todos estos minerales son críticos en el sentido de su abundancia relativa, reservas y accesibilidad, tanto en “mena” o “ley”, como en geopolítica. Por ejemplo, el manganeso, aluminio y cobre no son considerados críticos como el cobalto y el litio (Penke, 2021).

Por su parte, el cobalto es el material más buscado en las plantas de reciclaje de baterías de litio, y aporta más a su rentabilidad. Además de crítico, el cobalto es considerado material problemático, porque casi todo el suministro proviene de la República Democrática del Congo, en donde se verifican problemas de gobernanza y prácticas de minería familiar, a menudo con participación de niños (Smee, 2017), y muy bajo cuidado ambiental frente a un ambiente donde abundan las partículas tóxicas en el suelo y en el aire.

El litio en cambio tiene un grado menor de concentración de mercado y las prácticas de su minería se realizan con mayor cuidado en países con minería más regulada, lo que configura un riesgo de suministro menor (Penke, 2021).

Debido a las inestabilidades de suministro y la volatilidad de precios de algunos materiales, que está produciendo la irrupción de la electromovilidad, es probable que algunos fabricantes de baterías se encuentran con situaciones transitorias de cuellos de botella en los suministros de los materiales, cuya producción requiere proyectos mineros de muchos años, y riesgo de capital (Lambert, 2016; Enernews, 2021).

En línea con ello, por ejemplo, Tesla Motors ha previsto y tratado de evitar estas situaciones desde el inicio de su empresa, cuidando de hacer alianzas e integraciones verticales con sus proveedores, lo que ha contribuido mucho al valor diferencial que le otorgan sus accionistas. Esta misma estrategia está siendo seguida por otros fabricantes de Europa y Asia, asegurándose la integración vertical hasta con las empresas proveedoras de minerales. Por eso no es de extrañar que, por ejemplo, Toyota, sea accionista en un proyecto de litio (Sales de Jujuy) en la Puna de Argentina, o que parte del litio para las baterías de los vehículos eléctricos de BMW sea suministrado por Livent, también desde Argentina.

En general el mercado de este tipo de minerales reserva los volúmenes y negocia precios con el cliente (fabricante de baterías automotrices) con años de antelación, lo que impacta en el desarrollo mismo de los proyectos mineros y su financiamiento. A medida que pasen los años en el nuevo paradigma de la movilidad eléctrica, una parte cada vez más importante de los minerales podrán ser extraídos del reciclaje de baterías usadas. El mercado de baterías de litio recicladas podría superar volúmenes de 1.200.000 toneladas, y 6.000 millones de dólares para 2030 (Edel, 2020; Melin 2018.b).

Es importante resaltar que el mercado de baterías en desuso provenientes de los vehículos eléctricos livianos comienza a ser muy importante en el corto plazo (2023 en adelante), y tomará un rol dominante hacia 2027, por cuanto su mayor accesibilidad y sobre todo para los sectores de menores ingresos en América Latina, producirá una mayor disponibilidad de sus baterías en desuso.

Durante el año 2021 la demanda de los principales metales de baterías se ha recuperado fuertemente del efecto de la pandemia Covid-19, lo que está incentivando nuevos proyectos mineros. Según el reporte *Battery Metals Outlook* de Bloomberg NEF, China controla la industria de la conversión química de los metales para baterías, con la mayor porción de mercado para los 5 metales más importantes: níquel, litio, manganeso, cobalto y grafito (Millikin, 2021). Diversificar en las cadenas de suministro globales requerirá importantes inversiones en las zonas de mayor demanda de baterías, como Europa y Estados Unidos, que actualmente dependen de las importaciones para el abastecimiento de las materias primas.

Cuadro 9
Proyección de aumento de demanda de materiales de baterías de litio según dos fuentes
(Número de veces de aumento relativo)

Mineral	Proyección entre 2021 y 2030 según Millikin (2021)	Proyección entre 2019 y 2030 según Statista (2020)
Cobre	5,5	10
Aluminio	5,7	14
Fósforo	6,6	13
Hierro	6,6	13
Manganeso	9,3	3
Grafito	4,0	10
Níquel	5,2	14
Cobalto	1,5	3
Litio	5,3	9

Fuente: Bloomberg NEF, recuperado de (Millikin, 2021).

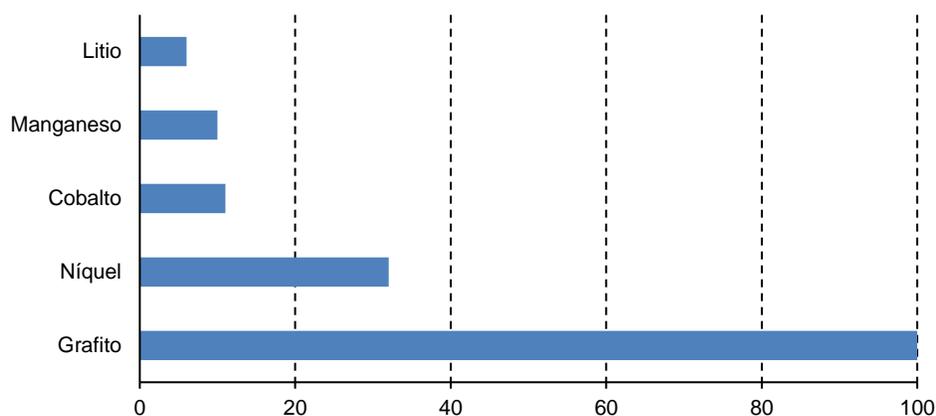
G. Los materiales y minerales presentes en baterías de litio con valor de reciclaje

En este apartado se describen las composiciones más usuales de las baterías al nivel de celdas y de packs. Al nivel de celdas, las baterías de litio tienen distintas composiciones de acuerdo con los tipos de cátodos, ánodos y electrolitos que componen las celdas. Al nivel de packs se agregan los materiales estructurales y las carcasas, los materiales eléctricos, y los de los sistemas de refrigeración.

Los residuos de baterías de litio retiradas de la electromovilidad pueden representar un recurso valioso. Los elementos y materiales contenidos en estas baterías no están disponibles como recursos de minería en muchos países, y el acceso a esos recursos es crucial para asegurar la estabilidad de las cadenas de suministro. En el futuro, estos residuos pueden tornarse en una valiosa fuente de minería secundaria de materiales críticos y minerales valiosos.

En forma general, el uso de algunos de los minerales valiosos en un vehículo eléctrico de pasajeros con un pack de baterías de litio mediano, de aproximadamente 400 kg y 50 kWh (del tipo NMC), aparte de contener aluminio, acero, y plásticos contiene importantes cantidades de grafito y níquel (Weyerer, 2021); véase el gráfico 3.

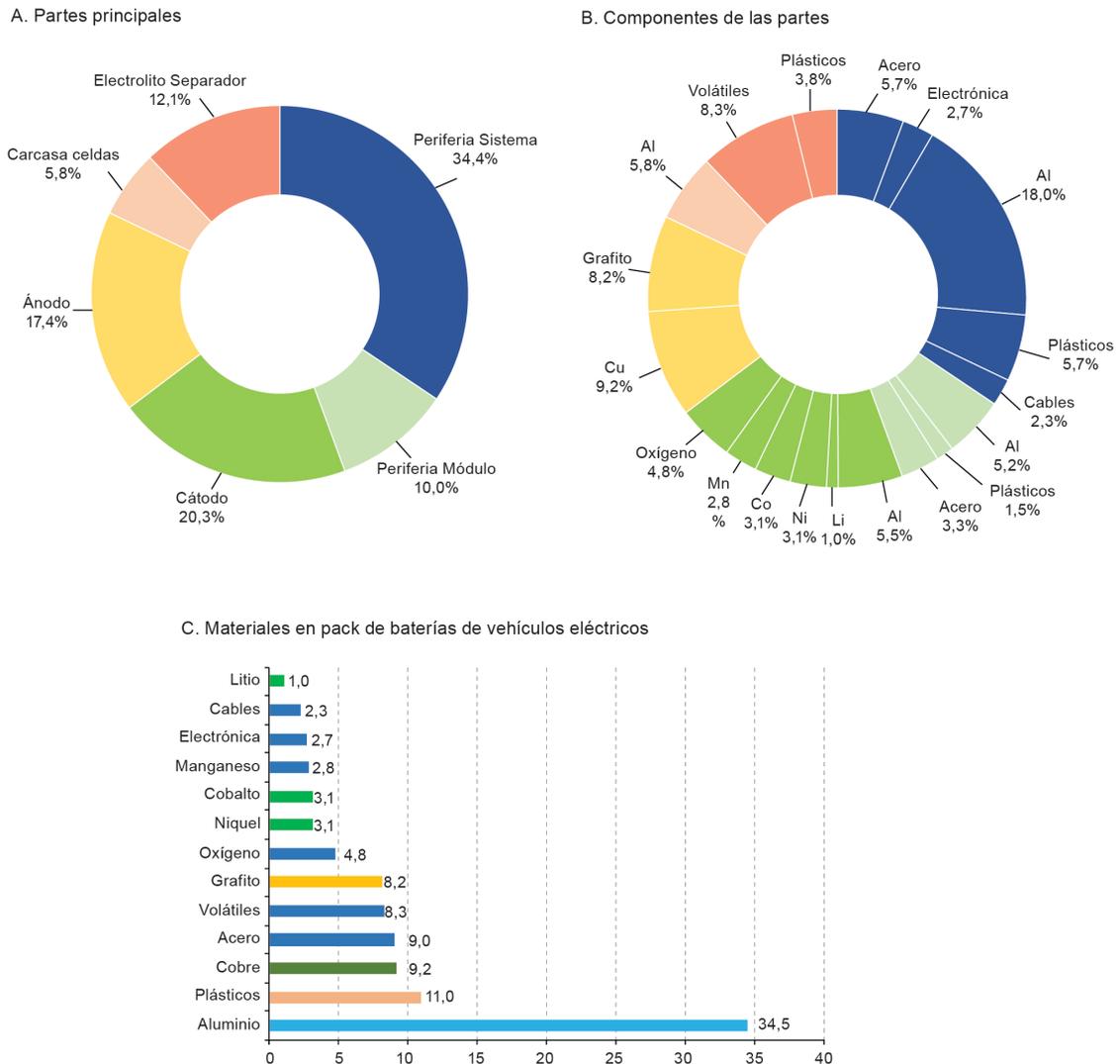
Gráfico 3
Minerales en la batería de un vehículo eléctrico de pasajeros con un pack de baterías de litio de aproximadamente 50 kWh
(En kilogramos promedio estimado por vehículo)



Fuente: Elaboración propia a partir de Weyerer, 2021.

Otro trabajo muestra la distribución de masa promedio de los distintos materiales (véase gráfico 4) y elementos encontrados en un sistema o pack de un típico auto eléctrico (Diekmann et al, 2017). Se observa que el total de las celdas en el pack representa el 55,6 % de su masa, compuesto por el cátodo con 20,3 %, el ánodo un 17,4 %, el conjunto de electrolito líquido (volátiles) y separadores plásticos con el 12,1%, así como las carcasas de las celdas con 5,8%. Se puede observar también que hay bastantes parámetros de diseño de las celdas con posibilidades para mejorar.

Gráfico 4
Composición de un sistema o pack de baterías de un auto eléctrico de pasajeros
(En porcentajes de masa)



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Diekmann et al, (2017).

El uso de níquel podría verse incrementado a nivel de los módulos, si los puentes entre celdas se realizan, como es el caso de varios vehículos eléctricos, con cintas de níquel soldadas. A nivel de celdas se incrementa la cantidad de níquel si se usan variantes de NMC con mayor proporción de este metal, como NMC622 o NMC811 (como se vio en la sección D.2). En cuanto a la participación total de elementos químicos en el pack, independientemente de a qué componente pertenecen, se aprecia que aparte de materiales comunes como plásticos y acero, los elementos minerales simples más usados en las baterías son el aluminio (34,5%), el cobre (9,2%) y el grafito (8,2%).

En cuanto a la composición de las celdas en sí mismas, hay una distribución de masas de elementos químicos en distintas celdas de litio (Huisman et al. 2017). Si bien la proporción de iones de litio es minoritaria, estimada en el orden de unos 2 g en una típica celda 18650 de 48 g (Maluf, 2015.b), este dato debe contrastarse con el hecho de que el litio no se encuentra puro en la naturaleza, sino que se lo extrae de rocas de espodumeno o de salmueras, y se lo lleva a forma de sales como carbonato, cloruro o hidróxido de Litio (Li_2CO_3 , LiCl , LiOH , resp.), recursos que se cuantifican colectivamente en términos de Carbonato de Litio Equivalente (LCE) (Obaya y Céspedes, 2021), el cual tiene 5,32 veces más masa que el elemento litio (véase cuadro 10).

Cuadro 10
Proporciones de litio en los compuestos producidos por la minería

Átomo o Molécula	Masa atómica o molecular (en g/mol)	Contenido de Li (en porcentaje)	Masa total / Masa de litio
Li	6,9410		
LiCl	42,394	16,4	6,11
Li_2CO_3	73,891	18,8	5,32
LiOH	23,948	29,0	3,45

Fuente: Elaboración propia.

De este modo se estima que una batería de un auto eléctrico de 50 a 75 kWh puede insumir entre 51 y 76 kg de carbonato de litio equivalente (y el 18,8% de esa masa será el elemento litio, véase cuadro 10). Así, una empresa del estilo de Tesla, que produzca unos 500.000 packs de 75 kWh, o 35 GWh/año de baterías, tendrá una demanda de 38.000 ton de carbonato de litio equivalente al año. Si bien existen suficientes reservas de LCE para hacer frente al aumento previsto de la demanda (Maluf, 2015.b), es necesario incrementar el ritmo de la producción y comenzar a utilizar el litio reciclado, ya que existe un importante desfase entre la oferta de este compuesto y la demanda para baterías (Colthorpe, 2022).

Respecto al uso del cobre, un vehículo eléctrico de pasajeros puede contener aproximadamente tres a cuatro veces más cobre que los vehículos a combustión equivalente (Rajzman, 2021; Els 2022). Además de contarse por decenas de kilos en los bobinados de los motores y los cables (a menudo de alta tensión), casi la mitad del cobre de un vehículo está contenido en los ánodos de las celdas de sus packs de baterías.

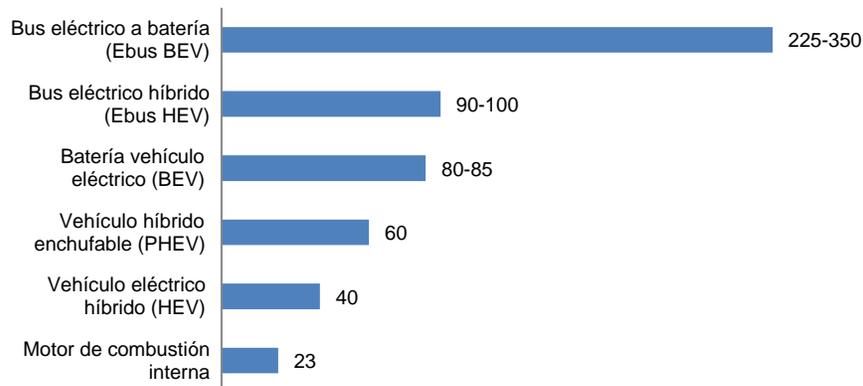
Sin embargo, no se prevé que los vehículos eléctricos vayan a impactar de forma muy significativa el futuro suministro global de cobre, que se dedica mayormente a otras industrias, como en la construcción, la infraestructura de generadores eléctricos, equipos industriales, tuberías, etc. Por ejemplo, en una central eléctrica convencional se utiliza 1 tonelada de cobre por cada MW de potencia, mientras que los parques eólicos y solares requieren entre 3 y 5 toneladas de cobre por MW.

La demanda internacional de cobre es estimada por la International Copper Association (ICA) en 28 millones de toneladas (ICA, 2020), y su suministro es estable, contando con 870 millones de toneladas

de reservas²⁴ de un total de recursos identificados de 5.000 Mtn. De los 28 millones de toneladas de demanda anual, unos 9,8 millones de toneladas se cubren con el cobre reciclado (aproximadamente 35%), de modo que el resto de la demanda se cubre con 18,2 millones de toneladas de producción de las minas. Al ritmo actual de producción las reservas alcanzarían para unos 40 años, mientras que los recursos identificados alcanzarían para 200 años.

ICA estimó en 2020 un incremento de 250.000 toneladas anuales de cobre hacia 2030 debido a la adopción de vehículos eléctricos en el mercado, lo que representa un incremento menor al 0,9 % respecto a la demanda de 2020 (ICA, 2020). No obstante, esto se verá compensado por la demanda de cobre para infraestructura de almacenamiento de energía, lo cual significa un incremento de 2,3 millones de toneladas hacia 2029 (ICA, 2019). Otras estimaciones sitúan la demanda de cobre para electromovilidad creciendo hasta 2,9 millones de toneladas en la década que inicia en 2021 (Els, 2022).

Gráfico 5
Cantidad promedio de cobre utilizada en vehículos, por tipo de vehículo
(En kilogramos)



Fuente: Elaboración propia a partir de Rajzman (2021).

Nota: E-bus BEV dependiendo del tamaño y capacidad de pasajeros, pueden requerir más de 350 kg de cobre.

Actualmente existen importantes esfuerzos en la minería de cobre por hacerse más sustentable, con el uso de energías renovables y otras medidas (ICA, 2021). Junto con los metales considerados valiosos para su eventual recuperación en los procesos de reciclaje, se encuentran, y en mayor volumen, materiales más comunes como acero, aluminio y plásticos. Los procesos de reciclaje serán explicados en secciones posteriores, aquí se trata de saber qué materiales de las baterías tienen el mayor valor comercial. Los inversores de una planta de reciclaje intentan recuperar estos materiales que tienen el mayor valor, el resto de los materiales como los plásticos y aceros, pueden dar un aporte marginal a la rentabilidad, o se descartarán en forma ambientalmente segura, lo que de todos modos es mejor que descartar las baterías. Los materiales más valiosos pueden ser los metales Co, Li, Ni, Mn, junto al grafito, que, en muchos procesos de reciclaje, se obtienen en aleaciones llamadas masa negra o *black mass* que tienen su circuito comercial especial, mientras los metales más comunes como Al y Cu también pueden encontrar su nicho, y venderse por circuitos comerciales más convencionales.

²⁴ Reservas son los recursos identificados y cuantificados como factibles de extraer de manera económicamente viable.

H. Las tecnologías futuras de las baterías de los vehículos eléctricos

Pese a que nuevos tipos de baterías están siendo desarrolladas, principalmente para evitar el uso de materiales escasos y/o problemáticos (como el cobalto y el litio), se buscan alternativas en las que los métodos de construcción sean similares a los de las LIB (tipo laminar, con compuestos de intercalación, como se vio en la sección D.2) pero con otros materiales (como sodio, magnesio, etc.), lo que permitirá aprovechar la infraestructura de producción existente y por lo tanto un rápido despliegue comercial.

En primer lugar, se buscan activamente mejoras de las celdas de baterías de litio mediante variaciones de los 3 elementos principales de las actuales celdas: los ánodos, los cátodos, y los electrolitos, y se busca tanto en la composición química como en la estructura con nanotecnología.

En cuanto a los ánodos, desde la década de 1990 hasta el presente siempre fueron láminas de cobre recubiertas de grafito (material activo). Los actuales desarrollos en el diseño de ánodos podrían reemplazar esos ánodos por estas alternativas (Kelleher Environmental, 2019):

- Ánodos de titanato de litio (LTO): Estos ánodos tienen una mayor densidad de potencia y permiten una mayor cantidad de ciclos de carga/descarga que los ánodos de cobre. Toshiba anunció su prototipo de 50 Ah de este tipo de batería y afirma que conservará el 90 % de su capacidad después de 5000 ciclos.
- Ánodo de silicio: esta tecnología proporciona una alta densidad de energía y potencial de clasificación de potencia a un costo potencialmente más bajo que los ánodos de grafito actuales. Samsung SDI y Panasonic ya están trabajando con esta tecnología, pero se prevé un tiempo de comercialización más prolongado.

En cuanto a los cátodos de las baterías de litio, como han sido optimizados a lo largo de 30 años de evolución, hoy se busca incorporar nanoestructuras de carbono y elementos como grafeno. También en el caso de los electrolitos, se busca reemplazar el electrolito líquido por un sólido poroso, nanoestructurado, en lo que se da en llamar una batería de litio de estado sólido (SSLIB) (Kelleher Environmental, 2019; Miao et al. 2019).

Algunas de las nuevas tecnologías buscan cambiar la química completa, y con ella el ion que se intercambia dentro de la celda. Un ejemplo ya entrado al mercado por la empresa china CATL son las baterías de iones de sodio también conocidas como *Sodium Ion Battery* (SIB), o *Na-ion battery*. Éstas podrían tener menor energía específica que una batería de litio níquel manganeso y cobalto (NMC), lo que las destinaría primariamente a aplicaciones estacionarias y móviles pesadas.

Las baterías de litio-azufre (Li-S) y de litio-aire (Li-aire) con ánodos de litio metálico puro, prometen la mayor densidad de energía conocida en baterías, pero por ahora son baterías difíciles de estabilizar, aunque ya prototipos funcionales, y está por verse a qué costo se podrán realizar.

Al revisar las tablas de potenciales electroquímicos de los elementos, y considerando que el litio es uno de los metales activos más livianos, queda claro que las baterías de litio, en sus distintas formas actuales y futuras (por ejemplo litio-azufre, litio-aire) seguirán siendo las baterías de mayor densidad de energía, por lo que probablemente seguirán teniendo la supremacía en el mercado de aplicaciones portátiles (electrónica de consumo) y móviles livianas (vehículos eléctricos pequeños y urbanos).

Las baterías estarán mejorando a pasos gigantes en los próximos años, hasta casi cuadruplicar la energía específica actual, debido a los cuantiosos capitales que están siendo invertidos en investigación y desarrollo en baterías avanzadas, tanto desde el ámbito público como el privado, y aprovechando que se comparten tecnologías entre dos campos claves para la sustentabilidad: el de la movilidad eléctrica y el de acumulación de energía estacionaria (DOE 2021; Nagpure, 2020; Kim, 2021; Bellan, 2021).

En cuanto a la movilidad pesada (buses, camiones, barcos, etc.) y las aplicaciones estacionarias, donde no afectan tanto las restricciones de peso y/o volumen, es previsible que otras clases de baterías, ofrezcan soluciones igualmente factibles y económicamente más convenientes. Sin embargo, la batería de Litio-Hierro-Fosfato (LFP) es un buen contendiente actual para estas aplicaciones, por sus bajos costos y el hecho de que no contiene materiales problemáticos como el cobalto.

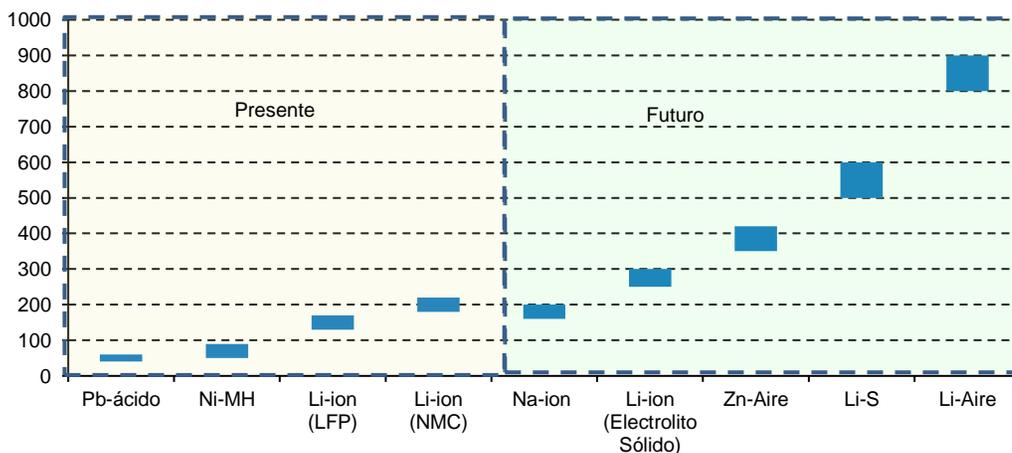
Las baterías de iones de sodio (Na-ion o SIB) podrían ofrecer un costo más bajo gracias a la abundancia de sodio, y ya existen en el mercado algunas baterías que muestran un rendimiento prometedor. La vida útil de estas baterías supera los 2.000 ciclos de carga/descarga y se pueden cargar y descargar rápidamente, por ejemplo, en 15 minutos, sin los usuales problemas térmicos de las baterías de litio a esas razones de recarga.

La densidad de energía de las primeras celdas SIB fue de aproximadamente 90 -160 Wh/kg, comparable con la de las primeras baterías de litio. La empresa CATL, una de las productoras chinas más grandes (actualmente fabricando baterías de litio de tipo LFP para los autos Tesla en China), ha lanzado su línea de producción en serie de baterías de sodio, principalmente pensada para la movilidad pesada y aplicaciones de acumulación de energía. La actual SIB de CATL ofrece una densidad de energía de hasta 160 Wh/kg y se puede cargar al 80 % en 15 minutos a temperatura ambiente. Para la próxima generación de sus celdas SIB, los investigadores de CATL apuntan a una densidad de energía de 200 Wh/kg, que podría ser desplegada comercialmente tan pronto como en 2023 (Randall, 2021).

En el reporte del Joint Research Center (Hill et al, 2019) se especifican también otras químicas de baterías posiblemente disputando cuotas de mercado desde 2025, como baterías de litio con óxido de vanadio (LVO), pero es posible que las fuentes consultadas al respecto en dicho estudio estén algo desactualizadas. El vanadio en particular es un material escaso y caro como para un despliegue masivo de este tipo de baterías.

Los óxidos de vanadio son más conocidos por integrar otros tipos de baterías (sin Litio), llamadas baterías de flujo (flow batteries), en donde el material que compone los electrodos se mantiene fluido, (llamándose catolito y anolito), y se los hace reaccionar uno con otro a través de una membrana selectiva. Usualmente estas baterías son demasiado pesadas para ser usadas en movilidad eléctrica, aunque existen algunos prototipos en vehículos eléctricos, sobre todo de gran porte. En general son usadas en almacenamiento de energía estacionaria. Otro ejemplo de batería de flujo más viable, que recientemente captó mucho interés, es la batería de flujo de Hierro (Iron-flow) (Rathi, 2021).

Gráfico 6
Baterías presentes y posibles baterías futuras, con su energía específica
(En Wh/kg)



Fuente: Elaboración propia en base a Kim (2020), y Miao et al (2019).

Existen en desarrollo muchas otras tecnologías alternativas a las baterías de litio, que utilizan otros iones u otros materiales, y pueden tener distintos mecanismos electroquímicos. Por su energía específica, algunas de ellas podrán ser adecuadas para movilidad eléctrica, pero otras no. Para una revisión detallada véase por ejemplo a Wang Y. et al, (2016). Un par de ejemplos se mencionan a continuación, junto con sus aplicaciones previstas. A los efectos de prever la gestión de baterías retiradas de vehículo eléctrico en un futuro de más largo plazo, se debe prestar más atención a las tecnologías de baterías que sean apropiadas para movilidad eléctrica:

- Baterías de iones de Zinc (ZIB). Esta batería funciona como la batería de litio, con compuestos de intercalación (en este caso, del ion de Zinc) en sus electrodos. Tiene excelentes propiedades de durabilidad y seguridad, y puede ser fabricada en instalaciones compatibles con las fábricas de baterías de litio. Sin embargo, la ZIB será más apropiada para aplicaciones estacionarias que móviles, debido a su mayor peso y volumen. Salient Energy es una empresa que las está desarrollando, con vistas a aplicaciones estacionarias (Brown, 2021).
- Baterías de Aluminio-Aire (y *battery swapping*). Otra propuesta interesante, que hasta ahora no consiguió alcanzar un desarrollo comercial apreciable, pese a haber estado en estudio por más de 20 años, son las baterías de Aluminio-Aire (Al-Aire), que tienen un funcionamiento algo distinto a una batería recargable (como las LIB o Ni-MH). En las baterías Al-Aire hay un ánodo de aluminio puro, que reaccionará con el oxígeno del aire, a través de un electrolito líquido acuoso, que aportará iones OH⁻ convirtiéndose en hidróxido de aluminio, Al(OH)₃. Esta reacción produce electricidad a una tensión constante mientras dure el aluminio.

En las baterías Al-Aire el aluminio debe ser restituido luego a partir del hidróxido, en instalaciones estacionarias, invirtiendo el proceso mediante electricidad. En este sentido, al decir de Trevor Jackson, fundador de una de las empresas fabricantes, llamada Métaelectricque, “esta batería es más parecida a un motor que consume un combustible” (aluminio) (Uhde y Spurná, 2021). Sin embargo, aquí no hay combustión violenta sino una reacción química más controlada. Estas baterías de Al-Aire no se recargan *in situ* en el vehículo, sino que se recambian por baterías regeneradas en una central, constituyendo un sistema de *battery swapping*. Para usar este sistema se requiere desarrollar también los automatismos que recambian las baterías, para vehículos especiales, típicamente flotas privadas, de reparto de bienes o de pasajeros, como taxis y colectivos eléctricos. Por otro lado, este sistema puede contribuir a aliviar posibles congestiones por sobredemanda de las redes eléctricas en una economía masiva de vehículos eléctricos recargables, ya que el recambio de baterías no exige mayores potencias a las redes en los puntos de demanda.

Una de las ventajas más notables es su muy alta energía específica. Según Jackson, su batería logró llegar a 1,35 kWh/kg, que es alrededor de 9 veces mayor a la de una batería de litio actual. Esta batería de alta energía y liviana podría ser aplicada por lo tanto hasta en aviones eléctricos. Otras ventajas incluyen una muy larga vida útil, a un costo moderado (29 a 35 euros/kWh). También el recambio (*swapping*) podría hacerse muy rápido, en aproximadamente 90 segundos, eliminando las esperas de recarga de los vehículos eléctricos. En síntesis, esta batería y sistema tendría muchas ventajas, pero está por verse si logra encontrar marcos y contextos favorables para su desarrollo (Uhde y Spurná, 2021).

En resumen, en este apartado se revisaron algunas posibilidades de distintas químicas de baterías que están en desarrollo en laboratorios, y que en unos años bien podrían estar en el mercado. En la práctica, toma alrededor de 5 a 10 años para que una tecnología de baterías recorra el camino, de ensayos y homologaciones, que va desde el laboratorio hasta la producción serial y el mercado. Y la gran mayoría no lo logra: la competencia con las baterías ya establecidas en el mercado es muy difícil.

Pero también en el futuro se espera que haya distintas relaciones de los usuarios o propietarios de vehículos eléctricos o flotas, con sus baterías. Por ejemplo, en modalidades de *leasing* o en

intercambio de baterías se alteran las relaciones convencionales de propiedad sobre la batería, lo que impactará las formas de disposición al final de vida útil.

Serán flotas de vehículos compartidos, o conjuntos de baterías colectivamente utilizadas por una comunidad o grupo de clientes, coordinados por emprendimientos privados, los que dispongan de las baterías, que prácticamente tendrán los mismos tiempos de llegada al final de vida. De este modo se podrá incrementar también la trazabilidad de esas baterías, al estar centralizados los datos históricos de las mismas. Por eso se tendrá que prestar atención a estas modalidades de uso compartido ya que tendrán relaciones distintas con las baterías al final de la vida.

Los desarrollos de baterías están ocurriendo desde varios frentes o nichos de aplicación distintos, y aunque los más prominentes son los de la movilidad eléctrica, éstos no son los únicos. Las baterías para movilidad no representan el mismo desafío o problema a resolver que las baterías para el almacenamiento de energía estacionaria, donde no hay restricciones de peso y volumen. Se debe prestar atención al tipo de batería en relación con el problema de aplicación que intenta resolver, o al nicho que intenta llenar.

Las baterías recargables basadas en iones de metales alcalinos monovalentes, incluyendo sodio (Na^+) y potasio (K^+), tienen las ventajas de una relativamente alta abundancia y bajo costo. No obstante, aún quedan varios obstáculos por superar antes de que esas baterías puedan convertirse en una realidad práctica y comercial. Los desafíos incluyen cómo mejorar el ciclo de vida insuficiente, y cómo diseñar nuevos materiales de ánodo y cátodo con alta capacidad de energía específica. Otras baterías recargables basadas en iones metálicos multivalentes, como magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), zinc (Zn^{2+}) y aluminio (Al^{3+}), serían capaces de transferir más electrones en un solo par redox, por lo que posiblemente sean útiles para obtener una alta densidad de energía volumétrica, que es deseable para dispositivos portátiles. El mayor desafío aquí es la falta de materiales de electrodos adecuados en los que los iones metálicos multivalentes puedan difundir con buena cinética, y la falta de electrolitos de voltaje elevado, compatibles con esos electrodos (Wang Y. et al, 2016).

Cualquiera sea el tipo de materiales o iones que conformen las baterías del futuro, claramente deberán tener una importante densidad de energía, del orden de los 250 Wh/kg o más, a un costo razonable (<100 dólares/kWh) y una larga vida útil (>3000 ciclos), para poder ser aplicadas a la movilidad eléctrica y tener chances de competir con las baterías de iones de litio.

Otros de los criterios para evaluar nuevos desarrollos de baterías deberán ser la sustentabilidad de los materiales (su abundancia y su economía circular), así como la posibilidad de su producción masiva utilizando el tipo de instalaciones ya existentes y métodos ya conocidos, que se han desarrollado siguiendo los modelos de baterías de litio y Ni-MH.

Para todos los desarrollos nuevos de baterías que se difunden, cabe preguntarse varias dudas, antes de simpatizar con una nueva tecnología, entre otros:

- ¿Cuán eficiente energéticamente es el ciclo de carga-recarga? (¿Mayor al 98%?)
- ¿Qué tan larga es la vida útil en ciclos esperada? (¿Mayor a 3.000-5.000 ciclos?)
- ¿Qué tan segura (poco inflamable, estable térmicamente) es la batería?
- ¿Qué rango de temperaturas ambiente puede soportar funcionando bien?
- ¿Qué tan abundantes (y no-críticos) son los materiales que la componen?
- ¿Qué tan alta densidad de energía (> 500 Wh/L) y energía específica (>250 Wh/kg)?
- ¿Qué tan alta razón de descarga (xxC) o qué potencia específica (W/kg) tiene?
- ¿Qué tan "convencional" (compatible con LIB o Ni-MH) puede ser su fabricación masiva?

- ¿Qué tan fácil y viable es su reciclaje? (Lo que aquí más interesa)

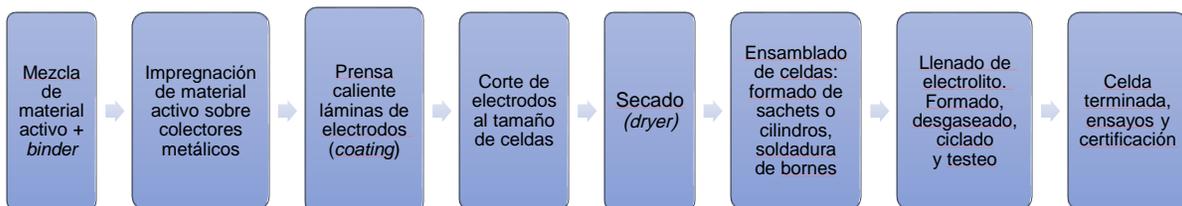
Como se puede apreciar, son muchos factores los que condicionan el éxito de una tecnología de baterías para llegar desde el laboratorio hasta el estadio comercial.

I. La cadena de fabricación de baterías de litio

La fabricación de baterías de litio constituye una larga cadena de múltiples etapas de agregación de valor, que usualmente se realizan en distintas empresas, en distintos países y continentes (Obaya y Cespedes, 2021), y que es necesario conocer para poder seguir el flujo de los materiales de las baterías hasta su final de vida y disposición final o reciclaje. Al presente la inmensa mayoría de volumen de baterías se fabrica en China, seguida de Corea, situación de concentración que está por cambiar en el transcurso de esta década, cuando entren en servicio una cantidad de fábricas en Europa y Estados Unidos (como se verá más adelante).

La producción de celdas de baterías de litio comienza en un paso previo con la fabricación de los materiales activos, a partir de las materias primas y precursores, que usualmente el fabricante de celdas compra o fabrica por sí mismo, y luego mezcla con un aglutinante (*binder*) en un mezclador. Con ese material obtenido se pasa a la manufactura de electrodos, por un proceso de laminación y recubrimiento (*coating*) sobre los sustratos, que vienen en rollos de láminas de cobre o aluminio de unos 30 micrones, y son los colectores de corriente. Para esa etapa suele haber 2 líneas de producción paralelas, una para los ánodos y otra para los cátodos, realizando ambas un proceso similar, pero con distintos materiales y distintos sustratos colectores (Cu y Al, respectivamente). Una vez fabricados los electrodos, pasarán por el corte para los tamaños y formatos de celda requeridos, junto con el corte también del separador polimérico, y finalmente se hace apilamiento (C-S-A-S), el plegado y el empaquetado, el llenado del electrolito, y el proceso de formación (los primeros ciclos de carga/descarga, donde los materiales se activan). Finalmente se realizan ensayos de control (véase diagrama 4).

Diagrama 4
Esquema de la fabricación de celdas, incluyendo la fabricación de electrodos



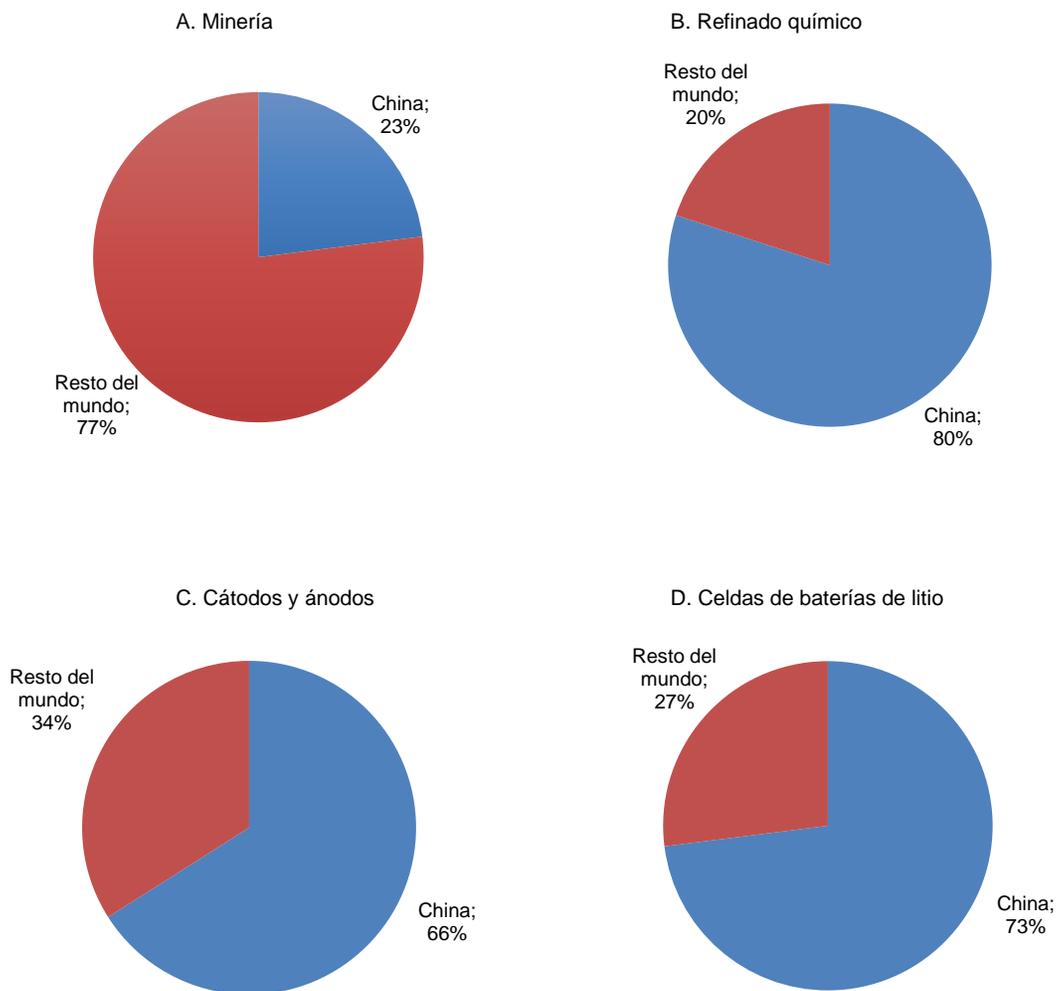
Fuente: Elaboración propia.

Al hablar de la fabricación de baterías, en general se trata de fábricas de celdas. Las baterías pueden ser ensambladas, tanto a nivel de sistemas, como a nivel de celdas. Un fabricante de celdas usualmente fabrica también sus electrodos, pero puede que se sirva de electrodos (rollos de metal, cobre o aluminio, recubiertos de los materiales activos o *coatings* fabricados por un tercero, a quien se controla estrictamente la calidad y la logística de las materias primas, y la calidad de sus productos.

En casi toda la cadena desde el procesamiento químico de los materiales, pasando por la manufactura de componentes (electrodos, separadores, carcasas, *sachets* o *pouches*, etc), y el ensamblado de celdas y de packs, China muestra una dominancia desproporcionada (Benchmark Mineral Intelligence, 2020.b).

El actual predominio de China se ha forjado con planes cuidadosamente formulados y ejecutados desde hace más de una década, y se da en 3 de los 4 tramos principales de la cadena de suministro de baterías, como se muestra en el gráfico 7. Solamente en el primer tramo de la cadena, la minería de los materiales de baterías, este país depende en gran medida de materias primas importadas, y produce solo el 20% del total mundial (Benchmark Mineral Intelligence, 2020.a).

Gráfico 7
Dominancia de China en la cadena de suministro de baterías al 2019
(En porcentajes de producción global)



Fuente: Elaboración propia a partir de Benchmark Mineral Intelligence (2020.b).

Se espera que la capacidad de producción de baterías supere los 2.500 GWh en 2025, según la Clean Energy Association (CEA, 2021). En 2019, China produjo 72% de las baterías de litio del mundo y Estados Unidos solamente el 9%. Además, China viene construyendo el equivalente de una megaempresa por semana y tiene 46 planificadas del total global de 70 a febrero de 2019 (Benchmark Mineral Intelligence, 2020.a).

Por su parte, los fabricantes más importantes actuales planifican hacer grandes ampliaciones de la capacidad de producción, tanto en China, como en la Unión Europea y en los Estados Unidos de Norteamérica, tal que, por ejemplo, hacia 2025 una sola empresa llamada CATL estará llegando a los 240 GWh/año, y hacia 2030 podría superar los 600 GWh/año (Lee, 2022). Por otro lado, entre 2021 y 2030 la capacidad global de producción de baterías de litio podría aumentar más de cinco veces, a más de 5.500 GWh/año entre 300 fábricas, aunque al presente la oferta puede permanecer insuficiente hasta 2023. Las empresas CALB, LG, y Svolt estarán haciendo las mayores expansiones relativas a su capacidad actual (Wood Mackenzie, 2022).

Actualmente la producción de baterías de litio está fuertemente concentrada en Asia, pero hacia 2030 tanto Europa como Estados Unidos serán importantes centros de manufactura también, donde planean desembarcar incluso muchas empresas asiáticas (Panasonic, Samsung, LG Chem, CATL, SK Innovation, BYD, CALB, entre otras). También en Europa se proyecta la llegada de 24 mega productores de baterías de litio por un total estimado de 600 GWh/año (Zenn, 2021.a).

Por su parte, Estados Unidos de Norteamérica se ha fijado metas ambiciosas respecto a la fabricación de vehículos eléctricos y sus baterías, sin olvidarse de su reciclaje. En 2021 el Departamento de Energía publicó el Plan Nacional para las Baterías de Litio (*National Blueprint for Lithium Batteries 2021-2030*) (DOE, 2021.a). Este plan tiene 5 objetivos para el país:

- Objetivo 1. Asegurar el acceso a materias primas y refinadas y descubrir alternativas para minerales críticos para aplicaciones comerciales y de defensa.
- Objetivo 2. Apoyar el crecimiento de una base de procesamiento capaz de satisfacer la demanda nacional de fabricación de baterías.
- Objetivo 3. Estimular los sectores de fabricación de electrodos, celdas y packs.
- Objetivo 4. Habilitar la reutilización al final de su vida útil y el reciclaje de materiales críticos a gran escala y una cadena de valor competitiva completa en el país.
- Objetivo 5. Avanzar el liderazgo en tecnología de baterías mediante un firme apoyo a la I+D científica, la educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemática, así como el desarrollo de la fuerza laboral.

El Objetivo 4 muestra ya explícitamente la previsión de la reutilización y el reciclaje de las baterías de litio. Asimismo, en un reciente comunicado de mismo Departamento de Energía se expresa: "Además de las plantas de baterías para vehículos eléctricos que ya están en operación en los Estados Unidos, se han anunciado 13 plantas adicionales y se espera que estén operativas dentro de los próximos 5 años. De las 13 plantas previstas, ocho son emprendimientos conjuntos entre fabricantes de automóviles y fabricantes de baterías. Muchas de estas nuevas plantas estarán ubicadas en el sureste o en el medio oeste" (DOE, 2021.b; Lambert, 2021). La lista de estas plantas se reproduce en el cuadro 11.

Lo que estas tendencias indican, es que el movimiento mundial de fabricación de baterías continuará concentrado en los mercados más importantes de vehículos eléctricos, entre China y Europa y, en menor medida, en Estados Unidos de Norteamérica. En esos mercados es donde se dará a la vez la mayor demanda de materias primas para las baterías, y la mayor tasa de reciclaje de sus materiales, probablemente aceptando para reciclar, como hace China actualmente, las baterías de otras partes del planeta, para asegurarse la obtención de más insumos.

Cuadro 11
Nuevas plantas de baterías anunciadas por fabricantes de vehículos eléctricos a octubre 2021

Fabricante	Localización	En operación esperada
Ford	Northeast of Memphis, TN	2025
Ford & SK Innovation	Central KY	2025
Ford & SK Innovation	Central KY	2026
General Motors & LG Chem	Lordstown, OH	2022
General Motors & LG Energy Solution	Spring Hill, TN	2023
General Motors & LG Energy Solution	Por definir	Por definir
General Motors & LG Energy Solution	Por definir	Por definir
SK Innovation	Northeast of Atlanta, GA	2022
SK Innovation	Northeast of Atlanta, GA	2023
Stellantis & LG Energy Solution	Por definir	2024
Stellantis & Samsung SDI	Por definir	2025
Toyota	Southeast of Greensboro, NC	2025
Volkswagen	Chattanooga, TN	Por definir

Fuente: Departamento de Energía (DOE, 2021.b).

II. La importancia de la gestión integral de las baterías de litio en desuso: minería secundaria y economía circular

El reciclaje de los materiales de una batería de un vehículo eléctrico reduce el impacto ambiental (energía, emisiones de CO₂) de su ciclo de vida, al producir un menor impacto que la minería original de las materias primas (Stewart y Mann, 2019; Pagliaro y Meneguzzo, 2019).

El impacto de materiales se puede estimar conociendo la evolución proyectada de vehículos eléctricos en un mercado particular, y haciendo suposiciones conservadoras sobre el peso promedio (250 kg) y el volumen promedio (1/2 metro cúbico) de un pack de baterías en un vehículo eléctrico de pasajeros (Harper et al, 2019). Consideraciones análogas pueden servir para estimar el impacto de la economía de bicicletas y motos eléctricas, y en el otro extremo de vehículos pesados como colectivos eléctricos.

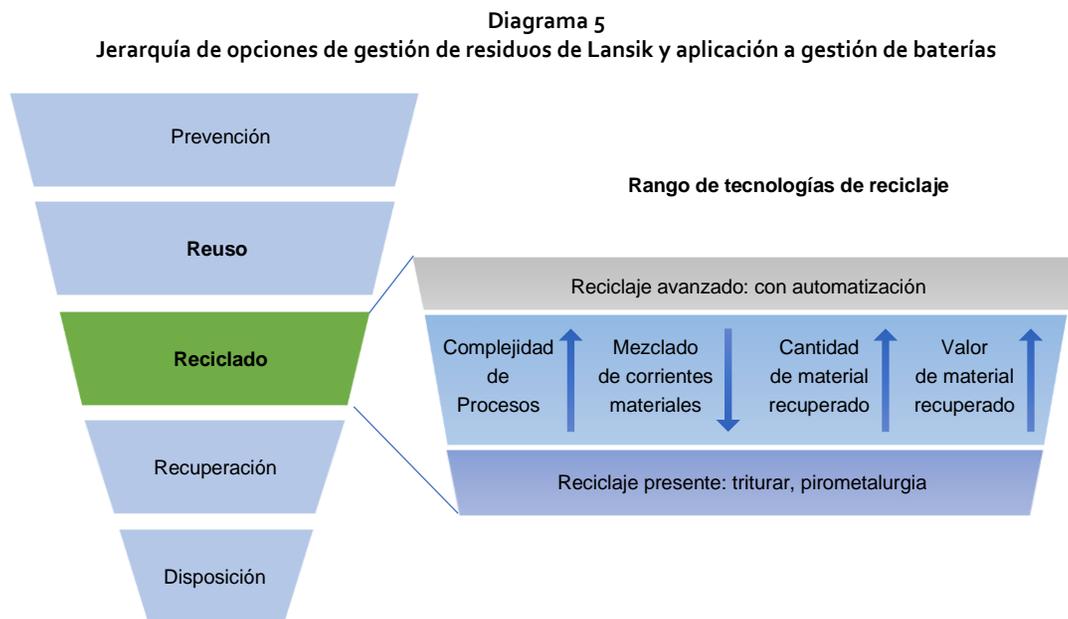
A nivel global, por ejemplo, habiendo superado ya los 12 millones de vehículos eléctricos de pasajeros en 2021, los desechos de los packs resultantes ascenderán 3 millones de toneladas y 6 millones de metros cúbicos, en 8 a 10 años (2029-2032) de haber sido introducidos, cuando las baterías de esos vehículos lleguen al final de su vida útil.

La cadena de la gestión de las baterías, como potenciales residuos, debe comenzar mucho antes del final de su vida. De ser posible, se debe impactar en el momento de la introducción de la batería en un mercado particular, estableciendo ciertas medidas de estandarización y trazabilidad.

Las perspectivas de alcanzar la circularidad en el manejo de los materiales han sido abordadas por varios autores, en distintas zonas geográficas. Véase por ejemplo los trabajos de la CEPAL (Clerc et al, 2021; CEPAL, 2020; De Miguel et al, 2021), y el trabajo de Hill et al, (2019). Una detallada perspectiva de economía circular para la reutilización y reciclaje de baterías de litio se da en Pagliaro y Meneguzzo, (2019). Con el tiempo la economía circular constituyó en una visión marco que inspira muchas de las políticas actuales de países industrializados, sobre todo de la Unión Europea.

En el caso de las baterías algunos autores por ejemplo Harper et al, (2019) sugieren que sería conveniente tomar ciertas prevenciones al nivel del diseño y la fabricación de cada uno de los niveles (celdas, módulos, packs, BMS, carcasas), con medidas tales como utilizar menor cantidad de los materiales más problemáticos (como el cobalto, lo que también impactará en la economía del reciclaje), o el uso de ciertos selladores y pegamentos de fácil remoción, y el uso de fijaciones (tornillos, tuercas) que permitan ser removidos en lugar de soldaduras, y el uso de etiquetas inteligentes como códigos QR, etc. que podrían estandarizar los diseños. Se sugiere que se incentive este tipo de diseño con certificaciones de producto "diseñado para ser reciclado".

En el manejo de residuo existe una jerarquía de gestión que implica que ciertas actividades de manejo son preferibles a otras, en el sentido que ahorran más energía, recursos y emisiones. Esta jerarquía mostrada en el diagrama 5, es un concepto general sobre el manejo de residuos que fue desarrollado desde la Directiva del Consejo 75/442/EEC sobre residuos en 1975, y fue presentada por el político holandés Ad Lansink en 1979, en una forma esquemática que hoy se conoce como "escalera de Lansink" (en realidad una pirámide invertida), que califica las opciones de manejo desde la más deseable hasta la menos deseable ambientalmente (Lansink, 2018).



Fuente: Elaboración propia a partir de Harper et al. (2019) y Lansink, (2018).

El ideal es lograr la prevención, que en el caso de las baterías implica el diseño de celdas y packs concebidos desde el origen para ser reciclados. En China, la presión regulatoria basada en el principio de Responsabilidad Extendida al Productor (que se verá en el capítulo III), llevó a que algunos fabricantes comiencen a fabricar celdas diseñadas para ser fácilmente removidas de los packs, sin soldaduras ni pegamento. Es el caso, por ejemplo, de la empresa BYD, uno de los fabricantes de autos y colectivos eléctricos, y de celdas y packs, más grande del mundo, que con sus nuevas celdas tipo blade de LFP está aumentando la seguridad y la reciclabilidad.

En el caso de las baterías, existe consenso en que la reutilización en segunda vida, siempre que sea posible, es una opción preferible al reciclaje. Resulta evidente que la reutilización ahorra recursos e impactos ambientales. Se deben encadenar las sucesivas aplicaciones de las baterías para optimizar su uso y minimizar su impacto en todo su ciclo de vida.

En el rango de reciclaje de baterías, se asume que el reciclaje más avanzado tendrá que lograr, mediante el uso de más automatización, y con técnicas de inteligencia artificial, lidiar con la complejidad y variabilidad de los procesos. De este modo, se aumentará cuando sea posible, la clasificación de las baterías y la separación de los módulos y/o las celdas de los packs de baterías²⁵, previo a los posibles procesos de reciclaje²⁶ y evitando en la medida de lo posible, el ingreso de corrientes homogéneas de baterías a esos procesos. Lo anterior, con el fin de aumentar la calidad, pureza y el valor neto de los materiales que se recuperan.

Además, los procesos de reciclaje deben buscar la eficiencia energética y en lo posible no producir más impactos ambientales como lixiviados o efluentes gaseosos, que no sean tratables en forma viable. En este sentido, en el Capítulo II se verá en detalle los distintos procesos actualmente implementados en escala industrial y pilotos de estudio, para el reciclaje de baterías.

En la Unión Europea se han estudiado exhaustivamente las perspectivas de la economía circular de las baterías en desuso de la movilidad eléctrica (Hill et al, 2019) y de este ejemplo se aprecia que busca objetivos comunes a cualquier economía de electromovilidad. Estos objetivos son mayor independencia en el suministro de baterías para los vehículos eléctricos y de los materiales que las componen; y dar respuesta integral, ambientalmente adecuada, al problema de los posibles residuos que se generen de estas baterías.

Cabe recordar que el objetivo de la economía circular es preservar el valor de los materiales y los productos durante el mayor tiempo posible, reutilizando en igual o diferentes aplicaciones los productos, o finalmente reciclándolos, para eliminar o reducir al mínimo la generación de residuos y cerrar su ciclo de vida, en contraposición con el paradigma dominante de la economía lineal de producción-consumo-eliminación (CEPAL, 2020; De Miguel et al, 2021).

Con ese fin, se propone restaurar y mantener la utilidad de los productos, los componentes y los materiales para conservar su valor, mediante el cambio del modelo de producción, el diseño de procesos y productos (*ecodiseño*), la creación de modelos de negocio, la promoción de los flujos de recursos y la creación de valor comunitario (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

En la economía circular se propone minimizar el consumo de nuevos materiales (de minería primaria), reemplazándolos por materiales recuperados (de minería secundaria o urbana), y reducir así el consumo de energía y las emisiones, respecto a los procesos de extracción primarios, lo que reduce la presión ambiental que se asocia al ciclo de vida de los productos, desde la extracción de los recursos, pasando por la producción y el uso, hasta el final de la vida útil (Clerc et al, 2021).

La Unión Europea lidera las acciones en esta materia y ha puesto en práctica un programa para convertirse en una economía eficiente en cuanto a uso de los recursos y con bajas emisiones de carbono (Comisión Europea, 2020; Hill et al, 2019). Esto tendrá repercusiones en los países con los que esta región coopera de manera estrecha. En este marco, existe una oportunidad para que en América Latina y el Caribe se diseñe y fortalezca una estrategia propia de crecimiento con economía circular (De Miguel et al, 2021).

En la economía circular, los residuos no son vistos como desecho sino como recursos, lo que es importante si se considera que, para alcanzar un desarrollo económico sostenible y parejo en todo el mundo hacia 2050, es necesario reducir un 90% (un factor 10, conocido como el postulado del "Factor X") el uso de materiales en los países industrializados (Lehmann, 2018). Una adecuada gestión de los residuos implica priorizar la prevención, la reutilización, el reciclado y la recuperación de energía por sobre la disposición final (Lansink, 2018).

²⁵ Algo que, en países como China, con leyes de seguridad e higiene del trabajo más laxas, se realiza la separación a costa de trabajo manual intensivo, y en la mayoría de los casos en condiciones informales. Véase por ejemplo Li et al (2021) y Woollacott, (2021).

²⁶ Como se verá en el próximo capítulo, actualmente sin esas operaciones mencionadas en la mayoría de los casos se comienza el reciclaje con el triturado de los packs o módulos completos.

Al presente, el flujo de materiales en el mundo dista mucho de ser circular. Según la última versión (5ta edición) del Reporte de la Brecha de Circularidad (*Circularity Gap Report*) la economía mundial consume más de 100.000 Mton/año, y solo recircula alrededor del 9% de los materiales, es decir, la brecha de circularidad (y la proporción de materiales que la economía global descarta) es mayor al 91%. La extracción y el uso de materiales se incrementan año tras año. Tan sólo en los 6 años que van entre las dos conferencias climáticas más importantes (la COP25 de París en 2015, y la COP26 de Glasgow en 2021) la economía global consumió 500.000 millones de toneladas²⁷ de materias primas vírgenes, representando un 70% más de materiales vírgenes que lo que el planeta Tierra puede restituir. Si las tendencias continúan, sin un importante esfuerzo por cerrar la brecha de circularidad (en un escenario "Business as Usual") hacia 2050 el consumo material del mundo habrá superado las 170.000 Mton/año. Evidentemente el mundo no puede recuperarse de semejante nivel de extracción, y el consiguiente colapso de la economía es previsible (Circle Economy, 2022).

1. El costo ambiental de la batería de litio impacta en la sostenibilidad de los vehículos eléctricos

Reducir la huella ambiental en emisiones por el uso de energía está siendo exigido actualmente a los proyectos de minería, que usan cada vez más energías renovables en particular, solar. Hay una nueva demanda y preocupación por parte de los fabricantes de vehículos eléctricos (y por ende transmitida a los fabricantes de sus baterías), para que sus suministros provengan de fuentes sostenibles, reduciendo así la huella de sus productos. Las compañías mineras y sus inversores saben que la competitividad de los productos, para mercados como el de la Unión Europea, actualmente se juzga no solo por su precio, sino también por su huella de carbono y su sostenibilidad (Zagorodny, 2022).

Los impactos ambientales adicionales radican en el uso del agua, que se puede considerar del mismo orden o menor que en cualquier otra actividad industrial o extractiva (agraria, metalúrgica, petrolera, etc.), y en el consumo de otros insumos químicos como ácidos, solventes, cal, etc.

La cantidad de recursos materiales y energía que insume la minería original de los materiales de las baterías, y su refinado químico, será en principio superior a la que insumirá la obtención de esos mismos materiales a partir de su reciclaje, o minería secundaria (Harper et al, 2019). La razón de ello se puede advertir del hecho de que las concentraciones de los minerales en las baterías son mayores que las encontradas en la naturaleza. Sin embargo, la extensión de la oferta de estos materiales recuperados no alcanzaría a cubrir la demanda por varios años, y los costos asociados de algunos de ellos podrían ser más altos que los originales, dependiendo de las condiciones transitorias de mercado para cada material recuperado.

Por ejemplo, en el caso del litio, se puede estimar el uso de recursos. Dependiendo del proceso, la minería de litio en salares puede insumir grandes cantidades de salmuera, que no es agua potable ni utilizable para riego, sino una disolución que contiene sales disueltas en concentraciones mayores a la del agua de mar. Esta salmuera se extrae de reservorios a 100 a 200 m debajo de la superficie del salar, mediante pozos de bombeo. Se requieren estudios hidrogeológicos que aseguren que la recarga de estos reservorios (usualmente por lluvias, deshielos, y corrientes subterráneas) será suficiente para mantener el nivel del reservorio, de modo que el emprendimiento sea sostenible.

²⁷ "0.5 Trillion" en inglés, 1 Trillion = 1.000 Billion = 1.000.000 Million (inglés). Aquí 1 Mton = 1.000.000 toneladas.

Para obtener los minerales disueltos en la salmuera, tradicionalmente se han usado métodos de evaporación en grandes pozas a la intemperie, lo que daba tiempos de producción de muchos meses. Actualmente se están probando métodos de extracción directa de litio (DLE) en muchos de los proyectos nuevos, debido a su mayor rapidez de producción, y mejor aprovechamiento del agua contenida en la salmuera. Véase por ejemplo Obaya y Céspedes, (2021) y Flexer et al, (2018).

Se puede estimar que, para obtener 1 tonelada de litio de salmuera, con métodos de extracción directa de litio, dependiendo de la ley de la salmuera (contenido de litio en partes por millón), se requieren extraer y procesar cantidades de salmuera como las estimadas en el cuadro 12. En los modernos procesos de extracción directa de litio, a diferencia de los tradicionales procesos de evaporación abierta, se extraerá el litio y también se preservará agua pura extraída de la salmuera en condiciones controladas, la cual puede servir para los procesos, o bien para otros fines locales; el resto de la salmuera “agotada” (sin el litio), en menor volumen, será devuelta al salar.

Cuadro 12
Cantidad de salmuera para extraer litio en salares de la Puna por un método de extracción directa

Contenido de litio en salmuera (en ppm)	Salmuera requerida por tonelada de litio producido (en toneladas)
600	2 146
450	2 862
200	6 439

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cálculos propios en base al contenido de litio y eficiencia total de extracción directa (*Direct Lithium Extraction ó DLE*) de 0,79. Dato de eficiencia típica de extracción DLE de Alpha Lithium, comunicación privada.

El caso de la minería de litio a partir del espodumeno, como se practica en Australia, tiene mayores impactos ambientales. Para obtener esa tonelada de litio de roca de espodumeno, se necesitan 250 toneladas de ese mineral, pero el consumo energético para el procesamiento de la roca es mayor que en el caso de la salmuera. En cambio, para obtener esa misma tonelada de litio de reciclaje (minería secundaria), alcanzará con disponer de 28 toneladas de baterías en desuso (Tedjar, 2013), o sea, las baterías de entre 180 y 260 vehículos eléctricos, dependiendo de sus tamaños.

Se ha mencionado el caso de litio solamente, pero ya se ha visto en secciones anteriores que la proporción de litio en los packs de baterías es minoritaria, y la del otro material problemático, que es el cobalto, tiende a desaparecer en las nuevas químicas, mientras que otros elementos algo más comunes como el Cu, Ni, Al, Mn, Fe, etc. tienen una proporción e incidencia mayor en el impacto ambiental de las baterías.

III. Los procesos de la gestión integral de las baterías

Según se desprende de una entrevista al experto Hans Melin un artículo reciente (Deign, 2018), la percepción del público está algo atrasada respecto a las posibilidades actuales de reciclaje de baterías de litio de los vehículos eléctricos, por cuanto en la opinión pública se encuentra a menudo la idea de que no existen aún las tecnologías para reciclar estas baterías. De hecho, en los últimos años se han desarrollado muchas técnicas y procesos para hacerlo, alcanzando distintos grados de recuperación de sus elementos de mayor valor. La causa de este posible retraso en la percepción pública puede radicar en el atraso mismo del mercado de final de vida de las baterías de litio respecto a los mercados de electromovilidad.

Como se verá en el presente capítulo, existen numerosos centros de I+D, públicos y privados, enfocándose en la tarea de mejorar estos procesos, lo que da cuenta de la importancia ambiental y económica que adquirido el tema. Se están desarrollando tecnologías avanzadas de reciclaje de baterías, que podrían entrar en el mercado de fin de vida de baterías en el período 2025-2030, principalmente aumentando el grado de automatización en la manipulación de packs y celdas, con métodos de inteligencia artificial.

Actualmente existen procesos que pueden recuperar más de un 75% de los materiales de las baterías de litio (Diekmann et al, 2016), y nuevos procesos se están evaluando en plantas piloto, que eventualmente llegarán a una tasa de recuperación de casi el 100%. Por ello, habrá que prestar atención a quienes están desarrollando investigaciones avanzadas en estos temas, a la hora de montar nuevas capacidades de reciclaje de baterías de la movilidad eléctrica.

En los tipos de baterías de litio que se vieron antes, los materiales más valiosos se encuentran en concentraciones que exceden a las que aparecen en los minerales naturales (Jacoby 2019). Recuperar estos minerales del reciclaje de baterías, aunque pueda resultar más caro para algunos materiales como el litio, que aquellos obtenidos en boca de mina, tiene el potencial de ser una fuente extra de minería secundaria. Esta minería está siendo evaluada y promovida en mercados como la Comunidad Europea y Estados Unidos de Norteamérica, con fuerte demanda de electromovilidad y ambiciosos planes de aumentar la fabricación local de baterías, pero que no tienen asegurado el suministro de dichos minerales.

Para estudiar la problemática actual de la gestión de los residuos de baterías de la electromovilidad en los países que ya avanzaron en la implementación de la movilidad eléctrica, se necesita comprender primero algunos aspectos tales como: i) la vida útil de las baterías, ii) los circuitos de origen y final de vida una batería de litio, lo que podría llamarse el ciclo de vida, iii) los posibles destinos y el tratamiento que se le puede dar a una batería usada.

Las baterías de litio en electromovilidad de cierto porte como los autos eléctricos o buses tienen una vida útil estimada²⁸ entre 5 y 10 años (Zhu et al. 2021), por lo que el mercado de su final de vida está desfasado en esa cantidad de años respecto al propio mercado de los vehículos eléctricos. No obstante que la disponibilidad de grandes volúmenes de baterías en desuso como residuos a disponer se produce años después de la introducción de los vehículos eléctricos en una dada economía, también se debe contar con respuestas al problema de eventuales retiros de circulación, por eventuales problemas o por siniestros.

Por otro lado, también se deben tomar en cuenta los vehículos eléctricos livianos y de movilidad personal, porque si bien contienen baterías más pequeñas, livianas y simples, su vida útil más corta y su mayor tasa de expansión producirán un volumen muy apreciable de baterías en desuso provenientes de este sector. Hasta ahora usualmente no se consideran entre los residuos de aplicaciones eléctricas y electrónicas, como lo indica Clerc et al, (2021).

Las cuestiones más importantes para responder y que podrían considerarse según Melin (2021), como los pilares del mercado de final de vida de las baterías de litio son:

- i) cómo las baterías de litio llegan al final de su vida útil y cómo se recolectan (incluye cómo se extraen y desmontan) de los vehículos eléctricos en los que estaban,
- ii) cómo se reutilizan las baterías de litio en segunda vida en aplicaciones nuevas o ya existentes, menos exigentes que la aplicación de primera vida en el vehículo eléctrico original,
- iii) cómo se reciclan las baterías de litio, cuando no se pueden reutilizar en segunda vida, o cuando se agota la segunda vida también; y
- iv) cómo es el mercado de los materiales recuperados del reciclaje, o la disposición final de los productos del reciclado²⁹.

En las próximas secciones de este capítulo, el foco estará puesto en presentar los aspectos técnicos y comerciales de estas cuestiones, dejando los aspectos regulatorios para el capítulo III.

Previendo el momento de remover una batería de su vehículo, o sea el desmontaje parcial, ya sea para reacondicionarla (*refurbishing*) para una segunda vida en otra aplicación, o para extraer y recuperar sus materiales en procesos de reciclaje, se torna evidente que los principios de circularidad deberán, al mediano o largo plazo, imponer condiciones y restricciones al diseño original de la batería. Estos deberían sean más fáciles y eficientes (por menor consumo de recursos, tiempo y energía) los procesos de desmontarla, separar sus piezas y componentes, y, eventualmente, reciclarla. En este sentido urge crear o adoptar estándares y normativas que implementen el "Producto Diseñado para ser Reciclado" en las baterías (Tedjar, 2013), lo que será aclarado aquí desde su aspecto técnico. Un posible desafío al respecto de exigir condiciones sobre la manufactura de los productos en origen es que, como se vio en el capítulo anterior, gran parte de la cadena de suministro de los vehículos eléctricos y sus baterías ocurre en países fuera de la región de Latinoamérica, en particular en países de Asia.

²⁸ Zhu et al, (2021) dice que, entre 5 y 10 años, si bien otros autores, y las garantías otorgadas por distintas automotrices, pueden diferir en la cantidad de años, se acepta que las baterías de litio de los vehículos eléctricos pueden soportar más de 2.000 ciclos parciales, reteniendo un 80% de su capacidad. Dependiendo del uso del vehículo, y de su autonomía por carga, esto podría resultar en un amplio rango de vidas útiles.

²⁹ En Melin, (2021) se especifican las 3 primeras, la última es un agregado del autor del presente trabajo.

Como se estudiará en este capítulo, los métodos para reutilizar la batería en una segunda vida pueden implicar su desmontaje (si no es posible reutilizar la batería completa) y el diagnóstico exhaustivo a varios niveles: de sistemas o packs, de módulos o secciones, y finalmente de las celdas. Lo que se buscará en este caso es verificar el estado de salud de las baterías, junto con otros parámetros relevantes para decidir cómo reutilizar los módulos o celdas, o packs completos, en una nueva aplicación.

Cuando no se puede reutilizar las baterías, ni total ni parcialmente, por una evidente disfunción o por la pérdida del porcentaje mayor de su capacidad, se destinarán a plantas de reciclaje. Los métodos que se usan para reciclar las baterías están siendo objeto de intensa investigación y están mejorando con el tiempo sus grados de recuperación.

Aun cuando algunos de los procesos, bajo ciertas circunstancias de un mercado particular (por los bajos volúmenes procesados o los bajos precios temporales de ciertos materiales), puedan no resultar rentables, las empresas y gobiernos se están preparando para hacer frente a situaciones de mayor afluencia de los residuos de baterías, mediante la creación de capacidades de procesamiento, y la implementación de sistemas de gestión integral de los mismos.

A. El manejo de residuos de baterías de litio plantea riesgos de seguridad que deben prevenirse

Es conocido el riesgo de incendio de apilamientos de residuos peligrosos y combustibles, lo que está ejemplificado por incendios de apilamientos de cubiertas, que han durado años sin poder ser extinguidos. En Heyope, condado de Powys en Gales, Reino Unido un incendio de una pila de 10 millones de cubiertas ardió desde 1989 hasta 2004, humeando y contaminando la zona con gases de cianuro, sulfuros, monóxido de carbono, entre otros, además de producir un prolongado lixiviado tóxico.

El material de los electrodos de las baterías de litio es mucho más reactivo que el material de las cubiertas (Doughty, 2012) y puede dar lugar a incendios espontáneos, sin necesidad de una fuente externa de calor. Existen reportes de que la cantidad de incendios en instalaciones de reciclaje de baterías de litio va en aumento (Kong et al., 2018), en parte por los mayores volúmenes y también por posibles negligencias de usuarios y/o personal de las instalaciones. Ejemplos de algunos incendios que tuvieron lugar en instalaciones de recuperación de metales y reciclaje de estas baterías en Estados Unidos de Norteamérica incluyen:

- Shoreway Operation Center, San Carlos en septiembre de 2016 (Rethink Waste, 2017),
- Guernsey en agosto de 2018, y
- Tacoma, Washington en septiembre de 2018.

También hay incendios en plantas recicladoras generales ocasionados por baterías de litio mezcladas entre los residuos aceptados. La mayoría de estas baterías son pequeñas celdas de teléfonos celulares o baterías de notebooks y tabletas. En el caso del reciente incendio de una planta de reciclaje en Taylor, Texas, que no es específicamente de baterías, se supone que el incendio ha sido producido por baterías de litio que han llegado mezcladas en las corrientes de residuos generales (Aleman, 2022). También en abril de 2022 hubo una explosión seguida de incendio en una chatarrera en Florida, Estados Unidos, producidos por la batería de un scooter (monopatín) eléctrico que allí terminó su vida y tardaron 26 horas en controlarlo (Rankin, 2022).

Los incendios no son una novedad en la industria del reciclaje. Según un informe de Ryan Fogelman, de la empresa Fire Rover, los incendios en plantas de reciclaje en Estados Unidos y Canadá aumentaron un 26% entre 2016 y 2019 de un total de 272 eventos reportados, a 343, respectivamente (Mock, 2020). La novedad es que la causa principal con mayor frecuencia son las baterías de litio.

Más adelante serán enumeradas ciertas medidas de prevención de incendios involucrando baterías de litio al momento de la recolección, desmontaje y tratamiento (Kong et al., 2018, Doughty y Roth, 2012). A menudo las plantas recicladoras de estas baterías reciben residuos de toda clase, incluyendo, pero no exclusivamente, los de la movilidad eléctrica. Esto hace que el residuo ingrese en las plantas en formatos no estandarizados. También las plantas recicladoras de residuos generales suelen recibir baterías de litio de formatos pequeños. De aquí la importancia de implementar un adecuado sistema de gestión de las baterías de litio usadas en general (y no solo de la movilidad eléctrica), que minimice el riesgo de combustibilidad y que sean tratadas por separado para que no terminen en las corrientes de residuos generales.

Estudiando las problemáticas y las experiencias aprendidas de estas plantas se pueden formular recomendaciones de acciones para la aceptación y el manejo seguro, involucrando verticalmente a todos los actores de la cadena de gestión de las baterías de litio, desde los productores hasta los usuarios finales.

B. La vida útil y el ciclo de vida una batería: estado de carga y estado de salud

En este apartado se dan conceptos básicos sobre los parámetros de uso de las baterías, y cómo influyen esos parámetros de uso en el proceso de envejecimiento o degradación paulatina de la batería. El propósito es contar con las herramientas conceptuales y los procedimientos empíricos para poder juzgar el estado de las baterías que se reciba en una instalación de procesado. Los conceptos fundamentales del uso y la vida útil de las baterías están resumidos en el cuadro 13.

Cuadro 13
Parámetros, abreviaciones y conceptos básicos del uso y envejecimiento de una batería

Parámetro	Concepto
Carga eléctrica versus el proceso de recarga ^a de la batería.	La carga de una batería se mide en culombios, o en otra unidad más práctica que es ampere-hora. 1 ampere-hora = 3600 culombios. El proceso de carga o recarga de la batería consiste en entregarle energía eléctrica (aplicando de un voltaje o tensión de carga V, constante en signo, permitiendo que corriente continua fluya hacia la batería, forzando la reacción química en los electrodos, de modo que aumenta el potencial eléctrico (V) entre ellos, almacenando así la energía.
Capacidad (C)	Se refiere siempre a la capacidad de recarga o descarga inicial (en ampere-hora), que especifica el fabricante bajo ciertas condiciones, como la temperatura, y la corriente a la que se produce la recarga o descarga.
Profundidad de descarga (<i>depth of discharge</i>)	Es el porcentaje de la capacidad nominal de carga, que se recarga o se descarga de la batería, respectivamente, en un ensayo o uso dado.
Razón de carga o descarga (<i>charge or discharge ratio</i>)	La corriente (velocidad o ritmo) a la que fluye la carga y que vacía o llena la batería. Por ejemplo, se suele anotar por 0,5 C o C/2 un proceso de carga o descarga a una corriente (en amperes) numéricamente igual a la mitad de su capacidad (en ampere-hora), de modo que la batería se cargará o descargará en 2 horas. En baterías de litio 1C o C1 corresponde a 1 hora, y una corriente numéricamente a la capacidad. En plomo-ácido, típicamente C10 o C20 significa la capacidad cargada o descargada en 10 horas o 20 horas, respectivamente. C/5 corresponde a 0,2 C, una corriente de 1/5 de la capacidad en amperes.
Ciclos de uso, ciclos de vida	Cada par de procesos de recarga y descarga, que pueden hacerse hasta cierto porcentaje de su capacidad de profundidad de descarga, se denomina un ciclo. Cada batería de una clase y de un fabricante tiene una vida útil esperada, expresada en cantidad de ciclos a cierta profundidad de descarga, y bajo ciertas condiciones de temperatura y corriente de carga/descarga. Por ejemplo, a 25° C y C/2, o sea, para baterías de litio en 2 horas. Otras temperaturas o corrientes, o profundidad de descarga, influyen en la cantidad de ciclos que rinda la batería.
Estado de carga	La cantidad de carga presente al momento que se refiera dentro de la batería, expresada como porcentaje de la capacidad inicial (nominal, especificada por fabricante), o de la capacidad actual medida por el estado de salud de la batería
Estado de Salud	Es la fracción en porcentaje que representa la capacidad actual de la batería (en un dado momento, luego de cierto uso y degradación) respecto a la capacidad inicial (nominal, especificada por el fabricante).

Fuente: Elaboración propia.

^a Véase la explicación sobre la ambigüedad de esta palabra en la nota al pie de la página anterior.

Las baterías sufren degradación, ya sea con el uso o con el transcurso del tiempo, lo que significa que su capacidad real (medida en ampere-hora), irá disminuyendo respecto a la capacidad inicial que especifica el fabricante, dentro de una fecha dada y condiciones de temperatura y razón de descarga.

Las baterías tienen una vida útil que se especifica y estima en ciclos o en tiempo de años de uso, bajo ciertas condiciones. A la primera opción se la llama vida útil de ciclos (*cycle life*), y a la segunda vida útil de calendario (*calendar life o lifespan*). Estos conceptos se diferencian porque una batería puede haber estado inactiva por un tiempo, por ejemplo, en un almacén de una fábrica o negocio, o dentro de un vehículo eléctrico sin uso, y ese tiempo cuenta para su envejecimiento.

La cantidad de ciclos que puede durar una batería es el número de veces que pueden hacerse pares de procesos de carga y descarga, los que pueden tener distintas profundidades. Se llama profundidad del ciclo o más comúnmente profundidad de descarga (*depth of discharge*), al porcentaje de carga eléctrica³⁰ que se descarga de la batería respecto a su capacidad (C) total. Así, por ejemplo, una batería que tenga una capacidad de 40 ampere-hora y se descargue a una profundidad de descarga del 80%, se le estará extrayendo 32 ampere-hora.

La vida útil o el tiempo de vida útil (*lifespan*) de las baterías, se refiere al tiempo en que se usará la batería en la función para la que ha sido diseñada, para lo que debe retener cierto porcentaje utilizable de la capacidad inicial, o estado de salud. Usualmente los fabricantes especifican esa vida útil en términos de la cantidad de ciclos (carga/descarga) que se le podrá hacer a la batería, bajo ciertas condiciones (ritmo o corriente de la carga y la descarga, temperatura de trabajo, profundidad de la descarga de los ciclos) que afectarán el desempeño y la vida útil de la batería.

La capacidad real de una batería va disminuyendo con el tiempo por degradación, y es posible que a partir de un cierto nivel de pérdida de capacidad la batería ya no cumpla con la función para la que se diseñó.

En autos eléctricos es usual que se considere el final de la primera vida (de acuerdo con los usos y la garantía del vehículo, y la conformidad de su dueño) a una batería cuya capacidad se ha reducido hasta algún punto entre 70 % y 80 % de su capacidad inicial. De modo que las baterías que llegan al final de la primera vida tienen todavía una capacidad remanente, de distintos grados, que habrá que verificar, para poder destinarlas a una posible segunda vida, lo que se verá en la próxima sección.

En la práctica, el final de vida en autos eléctricos con baterías de litio ocurre en promedio luego de 8 a 10 años de uso, habiendo recorrido unos 160.000 a 200.000 km.

La degradación de la batería depende de muchos factores entre los que influye mucho la calidad de fabricación de las baterías, las condiciones de uso (temperaturas, aceleraciones del vehículo (corrientes de descarga), pendientes, corrientes y frecuencia de las recargas, etc. Por ejemplo, es sabido que las llamadas "cargas rápidas", que ofrecen recargar las baterías en fracciones menores a 1 hora en cargadores públicos muy poderosos, afectan la vida útil de las baterías, y por eso se recomienda a los usuarios no hacer cargas rápidas muy seguidas, ni cargar porcentajes altos de la carga de la batería en esos cargadores, ni hacerlo si la batería está en un estado de carga muy bajo (menor al 20%). De todos modos, cada vehículo eléctrico tiene sus propios sistemas de administración de las baterías que alertarán sobre la conveniencia o no de las cargas rápidas en cada situación.

³⁰ En español hay una triple ambigüedad con la palabra carga, que se refiere a carga eléctrica, esto es, cantidad de electrones, medida en culombios o en ampere-hora, que entra o sale de una batería; así como al consumo o demanda que se le requiere a un circuito eléctrico (que en inglés se denomina *load*), aun si éste incluye baterías, y que se mide en términos de corriente (amperes) o potencia (Watts). A su vez, la carga de una batería puede indicar la cantidad de carga eléctrica presente o actual (objeto), o bien el proceso de cargar (*to charge, charging*), en contraposición a la descarga de una batería. En este último caso se puede usar "recarga" para aclarar que se refiere al proceso, y no al objeto carga eléctrica ni al consumo (*load*).

La profundidad de la descarga por cada ciclo, y la velocidad o ritmo de la carga (en la práctica, la corriente de carga) influirá en la cantidad de ciclos que pueda hacerse a la batería. El usuario mejor informado puede elegir distintas estrategias para conservar las baterías por más tiempo.

Se conviene³¹ en dar por terminada la primera vida útil de una batería cuando su capacidad ha disminuido hasta un cierto nivel, por ejemplo 70% al 80%, indicado en las especificaciones, ya sea de la batería o del vehículo. Por ejemplo, en un vehículo eléctrico ya no daría el rango adecuado (en km por cada carga) que espera el usuario, por lo tanto, el vehículo, de mantenerse en buenas condiciones, requerirá un recambio de la batería por una nueva.

La fabricación de baterías de Litio constituye una cadena de múltiples etapas de agregación de valor, que usualmente se realizan en distintas empresas y pueden abarcar distintos países.

Un parámetro importante que determina la funcionalidad de la batería es su capacidad (C) (medida en ampere-hora, que es una medida de carga eléctrica, véase el Anexo 1), la que va menguando con el tiempo y los ciclos de uso. La capacidad de una batería de un auto eléctrico no se reduce abruptamente, sino que por lo común sufre una degradación de aproximadamente de un 2% a un 3% por año, de acuerdo con el fabricante, la química y su calidad, y la intensidad de su uso.

El estado de salud se define como la razón o cociente entre la capacidad real actual de la batería y la capacidad nominal inicial, expresado en porcentaje. Así por ejemplo una batería que está exhibiendo una capacidad actual de carga/descarga de unos 80 ampere-hora y originalmente tenía una capacidad de 100 ampere-hora, tendrá un estado de salud de 80%. Obviamente a medida que el estado de salud vaya disminuyendo, la profundidad de los ciclos también irá disminuyendo, para respetar una profundidad de descarga constante.

El estado de salud se puede determinar a nivel del pack, o a nivel de las celdas, una vez que se desarma. Los equipos para determinar el estado de salud son llamados en la industria "cicladores", o probadores de baterías (*battery test equipment*), de los cuales hay versiones de gran potencia para los packs enteros, y versiones para celdas, con numerosos canales para ensayar multitud de celdas simultáneamente.

C. El circuito de las baterías en desuso de los vehículos eléctricos

Las baterías en desuso de los vehículos eléctricos no estarán directamente disponibles para su tratamiento, sino que previamente deben ser desmontadas o extraídas³² de sus vehículos, y transportadas a las plantas de tratamiento (si la extracción no se produjo allí), lo cual exigirá la acción coordinada de distintos actores públicos y privados, y ciertas precauciones y normativa para su regulación. Aquí los circuitos que sigan las baterías dependerán mucho de si son vehículos eléctricos grandes como colectivos eléctricos, o livianos como motocicletas y bicicletas eléctricas.

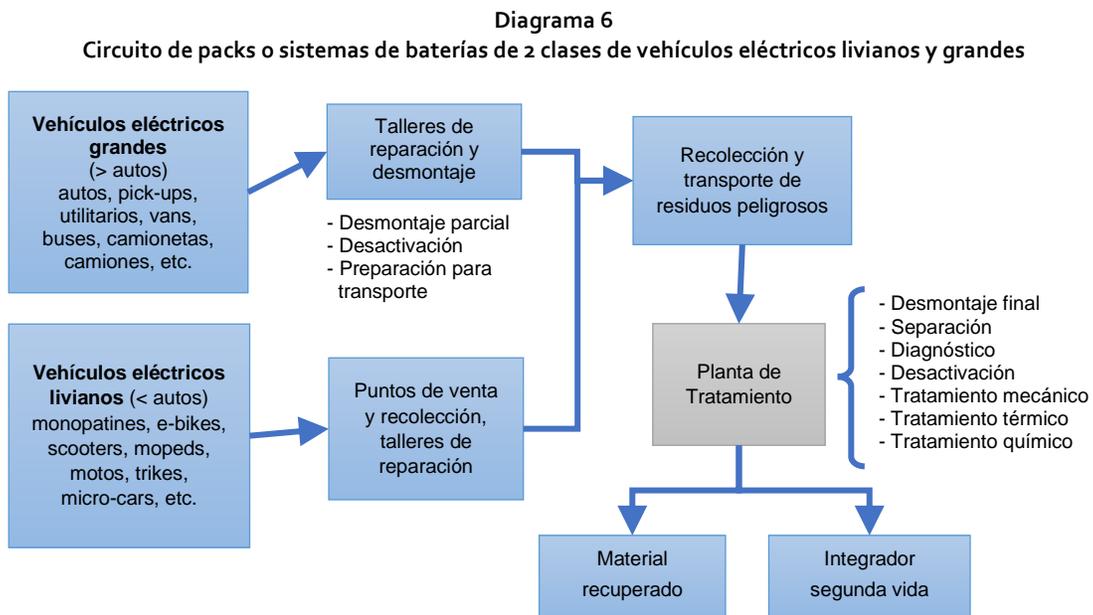
En un contexto regulatorio basado en el concepto de Responsabilidad Extendida al Productor (REP) de los residuos, es posible que las baterías sean directamente transportadas dentro de los vehículos eléctricos hacia las instalaciones del fabricante, o de quien el fabricante comisione para su tratamiento posterior. En este caso las baterías se desmontarán o extraerán en esas mismas

³¹ El Consorcio de Baterías Avanzadas de Estados Unidos (USABC), definió en 1996 el criterio de retiro más citado hoy en día que establece que la batería de un vehículo eléctrico debe retirarse cuando su capacidad perdió 20% de su capacidad inicial. Sin embargo, con el aumento de los rangos de los vehículos eléctricos hoy en día (por ejemplo, un Tesla S puede dar actualmente unos 643 km bajo ciclo EPA, que cuadruplica los rangos de hace 20 años), los usuarios están más dispuestos a aceptar pérdidas mayores de capacidad (Zhu, 2021). El umbral de pérdida también debería depender de la química de las baterías, este aspecto se discute en Martínez-Laserna (2018).

³² A lo largo de las secciones que siguen, desmontaje parcial significa la extracción del pack de baterías de los vehículos eléctricos en el que estaban, mientras que desmontaje final significa el desarmado completo del pack (véase la próxima sección).

instalaciones, evitando un transporte especial. Pero también es posible, en función de lo que permitan y reglamenten las distintas regulaciones (lo que se verá en el próximo capítulo), que las baterías usadas sean dispuestas directamente por el dueño del vehículo, quien podría llevarla a un taller de reparaciones, o de integración para su reutilización, o de conversiones³³ (*retrofit*), que pueda estar capacitado y autorizado para reformar y/o reparar esas baterías usadas, incluso para destinarlas a otros usos.

En el diagrama 6 se muestran los circuitos posibles que podrían realizar las baterías, según distintas regulaciones, desde su origen en los vehículos eléctricos, separados aquí en dos clases (livianos, hasta el tamaño de micro-cars, y pesados o grandes, desde el tamaño de un auto eléctrico estándar), hasta las plantas de tratamiento (reacondicionamiento para reuso y/o reciclaje). Esto evidencia que podrá haber 2 tipos de actores intermedios entre el originador de la batería agotada y el centro de procesamiento. Se consignan algunas tareas o procesos que deberán llevarse a cabo en distintos actores o nodos de la red.



Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, cuando un auto eléctrico, o un vehículo liviano, comienza a tener una autonomía reducida, el dueño tendrá que llevarlo a que eventualmente se reemplace la batería por una nueva o reparada; en caso contrario el vehículo tendrá que salir de circulación. En muchos casos esto se gestiona en talleres especializados en ese tipo de vehículos (ya sea livianos o grandes). En el caso de vehículos eléctricos grandes pueden ser talleres de las propias marcas automotrices o comisionados por ellas, y podrían también ser talleres particulares que se dedican a ciertas clases de vehículos.

En algunos países, por ejemplo, existen talleres que se dedican a recuperar y reparar las baterías de ciertos autos híbridos y eléctricos que ya tienen muchos años. Por dar un ejemplo, el Toyota Prius,

³³ Las conversiones (*retrofits*) de vehículos que originalmente tenían motor de combustión, consisten en reemplazar su motor de combustión por uno o varios motores eléctricos para la tracción del vehículo. De este modo, se consigue un vehículo eléctrico, que reutiliza y revaloriza un vehículo usado (evitando descartarlo), por un costo usualmente menor que un vehículo eléctrico nuevo. Estas conversiones obviamente requerirán baterías, que en general serán de litio, aunque se hacen también con otras clases de baterías. También es posible reutilizar baterías usadas en esta aplicación, siempre que el vehículo convertido tenga menos exigencia que el vehículo eléctrico original de donde se extrajo la batería usada.

uno de los primeros híbridos de la marca, tiene celdas de Ni-MH que pueden ser cambiadas por celdas nuevas cuando fallan individual o colectivamente y se consiguen por un precio accesible en algunos mercados, como Estados Unidos de Norteamérica, Europa y China. La empresa MEC en Estados Unidos de Norteamérica es una de las que realiza este servicio.

Esta reparación no siempre se puede hacer con cualquier marca de vehículo eléctrico, porque dependerá de que la electrónica de los sistemas de control de la batería de cada vehículo lo permita o no, y de la disponibilidad de los repuestos. A menudo los fabricantes de autos, por cuestiones de garantía y propiedad intelectual, protegen sus equipos de la intrusión ajena. Por ejemplo, el sistema de control no vuelve a funcionar, luego de desarmar la batería, si no se coloca una clave de acceso, autorizada por el fabricante. Pero, de cualquier modo, existen casos en que es factible que la batería sea reparada por terceros, que no son el productor original del vehículo. Esos mismos talleres o instalaciones de servicios deberían entrar en la regulación sobre la disposición y el tratamiento final de las celdas que no puedan ser reparadas, y deban ser recicladas.

Para extraer la batería como un todo del vehículo eléctrico se debe contar con talleres e instalaciones que difieren en sus capacidades y sus técnicas, conforme al tamaño del vehículo y la batería que se debe desmontar o extraer. De allí que se propone separar los posibles vehículos en 2 clases, según su tamaño, porque como se vio antes, esto implica dos niveles distintos de capacidades y riesgos. Los vehículos que aquí se catalogan como grandes³⁴, desde la categoría de autos eléctricos estándar hasta vehículos más pesados, tienen baterías de más de 100 kg y altas tensiones³⁵ de trabajo, para lo que se debe contar con instalaciones de un taller de nivel automotriz, y capacidad para trabajos en alta tensión.

En lo que se refiere a vehículos eléctricos livianos, incluyen desde bicicletas, motos y triciclos hasta pequeños city-cars o micro-cars³⁶, cuyas baterías usualmente pesan menos de 100 kg y tienen tensiones menores a 72 V (usualmente entre 48 y 60 V), por lo que el nivel de requerimientos de equipamiento técnico para la manipulación y posibles ensayos de las baterías es menor que en el caso de vehículos eléctricos grandes.

Para los vehículos eléctricos grandes, se debe contar con talleres adecuadamente certificados y autorizados por los fabricantes para el desmonte y/o recambio de sus baterías, que son pesadas y de alta tensión. Implicarán máquinas elevadoras de vehículos, grúas y auto elevadores para su transporte.

Las instalaciones y sus trabajadores deberán cumplir ciertas normas de seguridad, entre las que incluyen:

- i) Contar con abundante ventilación forzada, para el posible escape de gases tóxicos (el electrolito de las baterías conteniendo hexafluoruro de litio, se vaporiza ante un incendio de las celdas), y dispositivos contra incendios adecuados para sofocar o contener un posible incendio, involucrando baterías de litio (NFPA, 2016).
- ii) El espacio debe ser suficientemente amplio para no incurrir en grandes acumulaciones de packs almacenados, sobre todo cuando todavía puedan estar activados, y que pueda así aumentar el riesgo de incendios.
- iii) Todas las herramientas que entren en contacto con las baterías deberán estar aisladas eléctricamente (recubiertas en plástico hasta sus extremos), y las mesas de trabajo

³⁴ Se decidió no llamarlos vehículos eléctricos pesados porque la característica de pesados se reserva para vehículos de carga y transporte como buses y camiones. Vehículos eléctricos grandes incluye a los autos de pasajeros y utilitarios del porte de una camioneta o pickup.

³⁵ Típicamente hasta 300-400 V en autos eléctricos, y hasta 600- 800 V en buses eléctricos y camiones.

³⁶ En Europa, los city-cars o micro-cars, usualmente monoplaza o biplaza, son pequeños autos (aproximadamente < 450 kg) de baja velocidad (usualmente < 50 km/h), de uso urbano y de cercanía, en algunos países clasificados como "categoría L6/L7" (EAFO, 2021).

recubiertas de materiales no conductores, como plásticos o goma, para evitar el riesgo de cortocircuitos accidentales, por el contacto de cables y bornes con conductores.

- iv) El uso de guantes aislantes de alta tensión y ropa de seguridad, incluyendo para algunas operaciones máscaras protectoras de gases tóxicos, debería ser obligatorio.

Una vez extraídos los packs baterías de su vehículo, si el destino final de los mismos es enviarlos a la planta de tratamiento y no reacondicionarlos en el sitio, se deberá preparar los packs en forma adecuada para su transporte, para que no se produzcan cortocircuitos, ni roturas por golpes o vibraciones, ni aplastamiento por apilamiento indebido. Notar que es posible producir un cortocircuito interno en una celda de batería de litio y por consiguiente un incendio, por mera compresión o aplastamiento.

Recuadro 1

Inestabilidad térmica y riesgo de incendios en baterías de litio

Se debe comprender y enseñar que un cortocircuito en un pack de baterías de litio equivale a un incendio inmediato, sin mucha posibilidad de detenerlo, porque a menudo el elemento metálico que produce el cortocircuito, siendo tan altas las corrientes de cortocircuito, se soldará instantáneamente con las baterías. En el mejor de los casos, el elemento metálico es débil y se corta, pero si éste no es el caso, las celdas continuarán entregando corrientes muy altas, entrando en una avalancha térmica (*thermal runaway*) que será irreversible, poniéndose incandescentes, hasta liberar violentamente la presión y el calor por sus extremos, liberando también gases tóxicos, resultado de reacciones en el electrolito que contiene sales como hexafluoruro de litio, y del aglutinante (*binder*) de los electrodos, que suele ser PVDF. También se producirá una avalancha térmica si las celdas son comprimidas o aplastadas, de modo que entren en cortocircuito interno sus electrodos. Por eso, el manejo seguro de las pilas y packs de baterías de litio requiere en primera instancia un esfuerzo de educación y concientización de los usuarios.

El precio que hay que pagar por disfrutar de la alta densidad de energía, al menos en la generación actual de baterías de litio, es la cuota de inseguridad derivada de la inestabilidad térmica. De allí la importancia que tienen los sistemas de control, y en particular, el control de la temperatura y el manejo del calor, mediante refrigeración, en los packs más grandes y potentes. Esta situación está en vías de resolverse, con las nuevas generaciones de baterías en pocos años, con electrolitos de estado sólido, que serán, según se prevé, mucho más estables y seguras.

Pero por ahora, hay que generar conciencia de los peligros que están implicados en un uso incorrecto, y de las formas de manejo seguro, de estas baterías, sobre todo al momento de su disposición al final de su vida útil.

Fuente: Elaboración propia.

Si la batería será reacondicionada en una planta de tratamiento, y se la envía al transporte todavía activada con cierta cantidad de carga eléctrica, se debe procurar que los bornes activos estén aislados, minimizando todo riesgo de cortocircuito. De todos modos, los packs armados, como un sistema entero, tienen protecciones contra cortocircuito, desde sus BMS; aun así, es preferible asegurarse que funcionen las protecciones, porque los BMS también pueden fallar, en condiciones no previstas. Aislar los bornes es una medida de prevención adicional que no implica costo alguno.

D. El desmontaje final de una batería de litio de un vehículo eléctrico

Para reacondicionar y/o reparar una batería para prepararla para una eventual segunda vida, o para reciclar sus elementos, habrá que seguir ciertos procedimientos de desmontaje. Desmontaje final se refiere al desarmado de sus componentes, para lo que es necesario contar de antemano con información del pack de parte fabricante acerca de lo que se encontrará dentro de la batería. Sobre todo, en baterías de alta tensión, es importante contar con manuales e información, incluyendo planos que detallen las partes o secciones de alta tensión, que pueden contener riesgo de descarga eléctrica dentro de los sistemas o packs.

Al momento de desmontar una batería de un vehículo eléctrico típico se encontrarán distintos niveles de empaquetado. Por ejemplo, desde el pack completo, pasando por secciones, módulos y celdas, y cada uno con su complejidad, requerimientos de manejo seguro, problemas y desafíos. En el cuadro 8 del capítulo I se detalló la estructura interna de 3 sistemas de baterías de modelos de autos eléctricos de 2014.

El desmontaje o desarmado de una batería de un auto eléctrico es una tarea de alto riesgo, y solo debería realizarse bajo capacitación del personal, sobre todo para trabajos de alta tensión, y los riesgos específicos de trabajar con baterías de litio, y la autorización de las empresas fabricantes.

En el caso de los vehículos eléctricos grandes, para las primeras operaciones del desmontaje, al nivel de pack, habrá que tomar los recaudos necesarios para el trabajo con alta tensión, con tensiones típicas que superan los 300 V a 400 V. Se debe usar guantes de seguridad para alta tensión, y herramientas con aislamientos plásticos o de goma. Una vez que los módulos han sido desconectados entre sí, las tensiones de módulos probablemente estarán por debajo de los límites considerados peligrosos que va de los 50 V a 60 V.

En estos packs las celdas pueden estar conectadas entre sí o bien con conductores soldados, o bien por puentes de metal atornillados. En este último caso su remoción es más sencilla. En los packs de vehículos eléctricos livianos, usualmente las celdas están conectadas entre sí por puentes de metal³⁷ soldados, en general, con soldadura de punto eléctrico. Estos puentes se pueden remover fácilmente con alicates, pero resulta laborioso si son grandes cantidades de packs. Se espera que esta tarea de separar las partes de un pack pueda automatizarse en el futuro, mediante el uso de robótica con inteligencia artificial, contribuyendo a la rentabilidad y a la seguridad de los procesos de reacondicionado y/o reciclado de las baterías (Harper, 2019).

En internet se pueden encontrar los detalles internos de muchas baterías de autos eléctricos. Por ejemplo, de la batería de un Nissan Leaf de 24 kWh primera generación (Maluf, 2015), también se encuentran videos muy detallados de su desmontaje artesanal (Nelson, 2015).

Es de notar que el pack del Nissan Leaf, como el de otros autos eléctricos, tiene un interruptor de alta tensión, para corte de servicio, sobre la carcasa de arriba y en el centro del pack³⁸ que puede accederse desde el piso de la cabina entre los asientos, para desconectar la batería del auto al momento de realizar un servicio, y eventualmente para su desmontaje.

Tales precauciones de seguridad suelen estar disponibles, a nivel del sistema de control del vehículo, en todos los packs de autos eléctricos que trabajan a altas tensiones. En los manuales de los vehículos eléctricos usualmente se especifica que el sistema de alta tensión se interrumpirá inmediatamente al detectarse una colisión, con la activación de los airbags, y otras condiciones peligrosas, como la entrada de agua en la cabina.

También es de notar que, en este caso, del peso total de la batería que es 295 kg, unos 151 kg corresponden a las celdas (tipo LMO), y el resto unos 144 kg son estructuras auxiliares. Estas cifras dan un ejemplo de lo que se puede esperar de la relación entre materiales comunes (acero, aluminio, plásticos) y los más valiosos dentro de las celdas, como fue visto en la sección F del capítulo I, gráfico 5. El diseño de esta batería ha recibido críticas fundamentadas en que no dispone de un sistema de refrigeración, por lo que no se ha desempeñado bien en climas calurosos, y exhibe problemas de

³⁷ Usualmente los puentes o contactos entre celdas son flejes (cintas) de níquel o de alguna aleación con alto contenido de níquel, para 1. evitar su oxidación, y 2. bajar su resistencia eléctrica. Usualmente son flejes de aprox. 0,15 a 0,20 mm de espesor, y 8 a 12 mm de ancho, correspondiendo a las celdas cilíndricas tipo 18650 (18 mm de diámetro) o 26650 (26 mm de diámetro).

³⁸ Se pueden ver imágenes de este tipo de pack en <http://www.boronextrication.com/2011/11/10/where-is-the-safety-hv-disconnect-on-a-nissan-leaf/>.

temperatura al conectarse a cargadores rápidos (Holland, 2018). Los packs de otros autos eléctricos pueden agregar más peso aun de sistemas auxiliares, en particular del sistema de refrigeración.

En algunos videos se puede observar la extracción (WeberAuto, 2018.a) y el desmontaje completo, artesanal, de una batería de Chevrolet Bolt 2017 (WeberAuto, 2018.b), que incluye un sistema de refrigeración. En otros videos (Bas Bjorn, 2020) se observa desmontaje manual de la batería de un BMW i3 (con falencias de seguridad al hacerlo, reconocidas por su autor ya que no usa guantes aislantes ni herramientas aisladas), y de los módulos hasta las celdas. Por su parte, en Hübner (2022) se muestran detalles del desarmado de los packs de baterías de los 2 modelos eléctricos Volkswagen más vendidos, el híbrido enchufable (PHEV) Golf GTE, y el eléctrico puro (BEV) e-Golf³⁹.

Cuando los packs de baterías se desmontan hasta el nivel de celdas en centros de reciclaje de las propias empresas automotrices (o comisionados por ellas), la escala mayor requiere un mayor nivel de automatización. Actualmente se busca activamente desarrollar procesos de automatización, porque la separación de celdas de un pack, sobre todo cuando están pegadas y soldadas, dependiendo del diseño y construcción del pack, puede ser un proceso que insuma mucha mano de obra (Harper, 2019). Esta es la razón económica principal por la que se prefiere la reutilización de los módulos enteros en aplicaciones de segunda vida, a tener que desarmar los módulos hasta el nivel de celdas para reacondicionado, o eventualmente reciclaje.

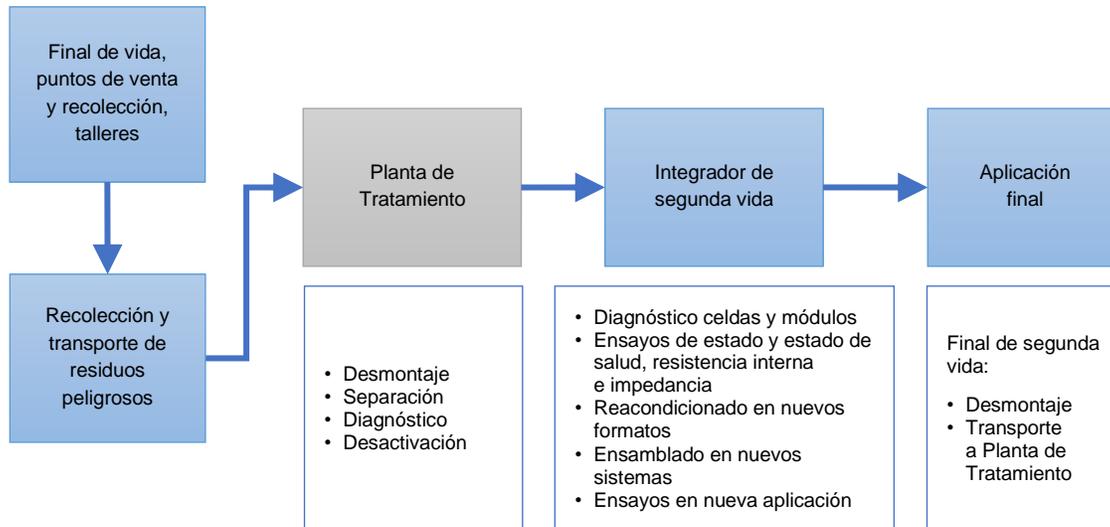
E. La segunda vida de las baterías, su reparación y reacondicionamiento

Una vez que la capacidad de una batería ya sea pack o sistema, ha menguado para cumplir su función en un vehículo eléctrico hasta un punto que resulta insuficiente, es probable que el dueño decida reemplazarla, según las condiciones de su garantía, o comprar una nueva, o bien vender o dar de baja el vehículo completo, transfiriendo el problema de la batería a un segundo dueño. En ese momento debe existir la posibilidad de remover la batería gastada, cualquiera sea el destino del vehículo, para darle otro uso o reciclarla.

El pack o sistema será enviado desde el taller o concesionaria donde se extraiga el pack del vehículo eléctrico, a través de un transporte autorizado, a una planta de tratamiento, a menos que la extracción del pack se haga en la misma planta de tratamiento, evitando así el transporte de los packs. Esto tendrá relación también con las regulaciones sobre la disposición final de vehículos en desuso y los destruidos en siniestros. En la plantase hará un primer diagnóstico, a nivel del pack, para decidir si puede cumplir una función de segunda vida, integrándose con otras baterías en igual condición, de modo de formar un arreglo más grande, o con suficiente capacidad y potencia para la nueva función (véase diagrama 7).

³⁹ Para sus diferencias ver por ejemplo Autopista.es, (2017).

Diagrama 7
Circuito de packs hasta segunda vida y vuelta a tratamiento cuando finaliza la segunda vida



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Un mismo actor puede concentrar distintos estadios y actividades, que no necesariamente son realizadas por distintos actores.

Los ensayos que se realizan típicamente consisten en tratar de determinar el estado de salud del pack como un todo, y de no resultar adecuado bajo los parámetros de la nueva aplicación planificada, se procederá al próximo paso, la separación de módulos o celdas, para luego hacer un diagnóstico en esos niveles.

En el caso de módulos como de celdas, típicamente se mide la resistencia interna (RI), mediante la caída de potencial en corriente continua (CC) entre los bornes, tanto en la situación en vacío sin consumo, así como en la situación con una resistencia externa (*load*) conocida. También se mide la impedancia (Z) en corriente alterna (CA), inyectando una señal sinusoidal de 1 kHz, que es un método usado para obtener una estimación del estado de salud de un módulo o una celda. Morris (2015) muestra fotos de algunas máquinas cicladoras (*battery tester*) que pueden realizar estos ensayos sobre cientos de celdas a la vez.

En caso de que el pack o sistema tenga un pequeño porcentaje de celdas en mala condición, podrá intentarse la recuperación de las demás celdas, o módulos enteros, que estén en buenas condiciones para formar otro pack de baterías de menor capacidad.

Sin embargo, se debe cuidar de conseguir un conjunto homogéneo de celdas en capacidades y resistencia interna, y no es una buena práctica reacondicionar packs usados reemplazando solo algunas de las celdas viejas, mezclando celdas viejas con celdas nuevas. No es una práctica recomendable mezclar celdas de distintos lotes o partidas, o fabricantes, debido a que tendrán distinto grado de envejecimiento, y por tanto capacidades y resistencias internas no homogéneas.

Este objetivo implicará el diagnóstico por ensayos de todas las celdas y/o módulos, y la separación completa de las celdas defectuosas de sus respectivos módulos, para reemplazarlas por celdas homogéneas, o de todas las celdas, para armar nuevas configuraciones de packs.

A los efectos de facilitar y automatizar estas tareas, sería ideal, aunque no siempre realizable, el poder disponer ya desde la fabricación de los packs, de un par de provisiones:

- i) que ya en la etapa de desarrollo los packs sean diseñados para su reutilización y reciclaje,
- ii) la inclusión de mecanismos informáticos para una trazabilidad adecuada, que permitan una rápida revisión de los datos históricos de la batería, probablemente almacenados en la memoria del vehículo y/o en las bases de datos de los fabricantes, a las que se acceda por la lectura de códigos QR o similares.

Estas previsiones aplicarán en forma plausible para los vehículos de la clase de autos o más grandes, pero serán más difícil de implementar en forma viable en vehículos eléctricos livianos, que son más numerosos, difíciles de registrar y controlar, y deben mantener un bajo costo.

Por lo dicho, los packs provenientes de los 2 sectores de vehículos eléctricos mencionados tendrán probablemente un tratamiento distinto. Por un lado, en los packs provenientes de los vehículos eléctricos grandes, se tiene un mayor ordenamiento, control de origen y registro, y pocos actores grandes con quienes tratar. Por otro lado, en los packs de vehículos eléctricos livianos, se tiene una situación más desordenada, a menudo de orígenes no controlados, y distribuida capilarmente entre muchos actores.

Para este segundo grupo se prevé que puede ser más difícil implementar el cumplimiento de la responsabilidad extendida del productor, por cuanto sus productos se encuentran distribuidos entre miles de clientes particulares, los cuales deberán cooperar para su retorno a puntos de recolección. En este caso, el problema es similar al problema de la aplicación de responsabilidad extendida del productor para las pilas domiciliarias, dentro de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Clerc et al, 2021). Para ello hará falta campañas permanentes de concientización, y estímulos para la devolución de los packs usados a los puntos de recolección.

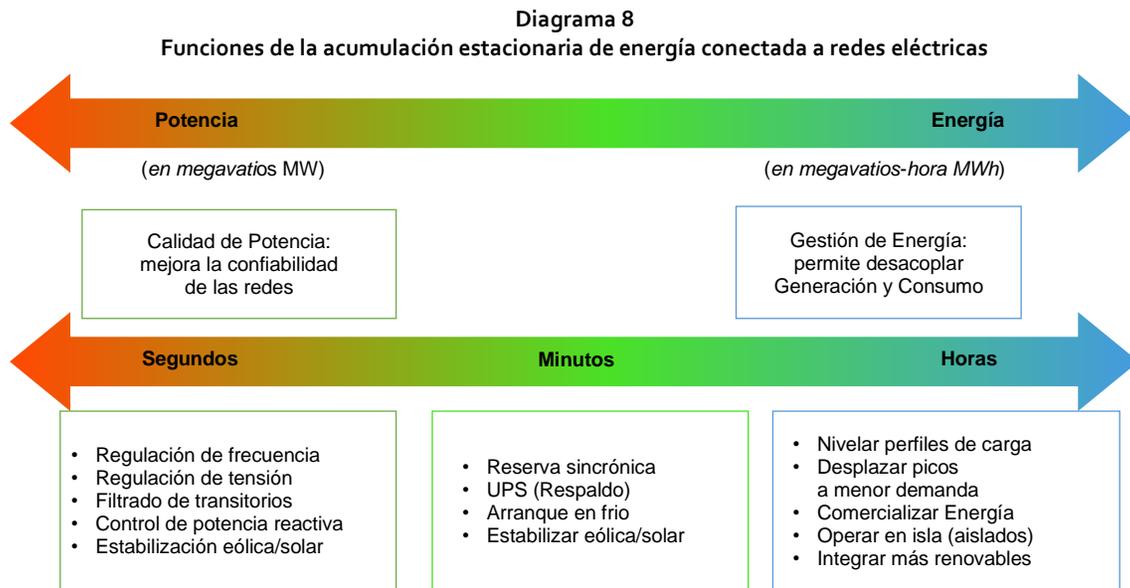
Cualquiera sea su origen, habrá situaciones en las que los packs que todavía tengan capacidad remanente suficiente serán reacondicionados para una segunda vida, en aplicaciones menos exigentes, en las que no haya restricciones de rendimiento, peso y volumen (como las hay en la movilidad eléctrica).

Las aplicaciones más plausibles de segunda vida se encontrarán por lo tanto en acumulación estacionaria de energía, cumpliendo diversas funciones, que se clasifican por sus potencias y tiempos característicos, para, por ejemplo⁴⁰:

- i) sistemas de energía residenciales (aproximadamente desde 2 kWh a 30 kWh) o industriales (>30 kWh),
- ii) energía de respaldo (*backup*) crítico para bancos, hospitales y data centers (en el orden de los 100 kWh o más), y
- iii) grandes sistemas conectados a las redes eléctricas (en el orden de cientos de kWh a varios MWh).

En países que tienen un alto porcentaje de energías renovables intermitentes en su generación eléctrica, tanto en sus redes de distribución como en microrredes aisladas, se torna cada vez más relevante disponer de centros de acumulación que puedan cumplir las diversas funciones avanzadas, como la estabilización de la oferta, la regulación de frecuencia y tensión, la gestión de la demanda, el desplazamiento de picos etc., como se muestra en el diagrama 8.

⁴⁰ Las capacidades dadas como referencia son estimativas, no responden a una clasificación formalmente estandarizada



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Fitzgerald, (2015).

Una aplicación de segunda vida que está ganando mucho mercado en China es la reutilización de baterías de vehículos eléctricos usadas en la energía de respaldo de torres de comunicaciones. La empresa China Tower afirmó que puede absorber 2 millones de baterías de vehículos eléctricos retiradas para esa tarea, en igual número de torres de telecomunicaciones, con una demanda conjunta de 54 GWh, para lo cual gestionó acuerdos de cooperación comercial con 16 de los principales productores de vehículos eléctricos y baterías en China, entre ellos BYD, Guoxuan High Tech, y YinLong New Energy (Na Jiao, 2018).

Las necesidades de respaldo de energía para consumos críticos (como hospitales, bancos, data center, aeropuertos, etc.) y para otros recreativos (como recitales, que aumentan la demanda eléctrica local temporalmente) son posibles nichos de aplicación de las baterías de segunda vida. Por ejemplo, desde 2018, en el estadio Joahn Cruyff de Ámsterdam funciona un sistema de acumulación con 590 baterías de autos eléctricos, de las cuales 340 son nuevas (24 kWh c/u) y 250 son usadas (20 kWh remanentes c/u), formando un sistema que puede brindar 3 MW de potencia, adicional a la de la red, y 2,8 MWh de energía acumulada. Ligado a 4.200 paneles solares en el techo del estadio y a la electricidad de la red, el sistema puede hacer una administración óptima de los recursos para entregar a los recitales entre 1 y 3 horas (dependiendo de la demanda real) de energía solar acumulada, y, cuando ésta no alcanza, energía de la red, obtenida antes en horarios nocturnos, y acumulada en las baterías (Pagliaro y Meneguzzo, 2019). De este modo se efectúa también un mejor manejo de los picos de demanda en las redes de distribución.

Otra de las aplicaciones de acumulación estacionaria plausible de suministrar con baterías de segunda vida, y que será ser muy útil para la economía circular de los vehículos eléctricos y su huella de carbono, serán las estaciones de recarga pública para este tipo de vehículos, alimentadas con energías renovables. En éstas, la energía solar podrá ser acumulada para las horas nocturnas, o la eólica podrá acumularse para lograr un suministro más constante. A la vez las baterías de la instalación contribuirán a suministrar más potencia. De este modo se potenciará el círculo virtuoso de los vehículos eléctricos, las energías renovables, y la economía circular.

Muchos fabricantes de autos eléctricos están ciertamente tomando acciones para acomodar las baterías gastadas de sus autos eléctricos en una segunda vida, principalmente para usos estacionarios

de acumulación de energía conectados a redes eléctricas (Hill, 2019). Es el caso, por ejemplo, de Nissan-Renault, BMW, Tesla, y Daimler, entre otros (Pyper, 2015; Hill, 2019).

Daimler, lanzó a mediados de 2015 su negocio de baterías para acumulación estacionaria, junto a su subsidiaria Deutsche Accumotive, enfocándose tanto en la pequeña escala residencial como en escalas más grandes para clientes industriales. Hacia fin de ese año Daimler anunció la instalación de un centro de acumulación en Lünen, Alemania, con capacidad de 13 MWh de baterías usadas de sus autos eléctricos, para ser integrada con la red eléctrica, para estabilizar sus fluctuaciones, en conjunto con otros partners del sector energético. Las empresas participantes cubren todo el espectro del ciclo de estas baterías, incluyendo la experiencia de operación de las redes eléctricas, y finalmente el reciclaje de las baterías cuando se agote su segunda vida, que estará a cargo de la empresa Remondis. Daimler afirmó en ese momento que ésta era la instalación de baterías de segunda vida más grande en el mundo (Mercedes-Benz, 2016).

En 2016 Nissan presentó una planta de 1 MWh con 64 baterías de Nissan Leaf usadas para su oficina en Francia, con capacidad de vender la energía a la red, combinadas con generación solar y 100 cargadores de autos eléctricos, de acuerdo con su socio ENEL. Según Nissan, este proyecto iniciado en 2015 fue el primer proyecto de una automotriz usando baterías de segunda vida retiradas de sus vehículos eléctricos (Crompton, 2016).

Por su parte, BMW construyó en 2017 una granja de acumulación en su planta de producción en Leipzig, con capacidad para 700 baterías usadas de sus autos eléctricos del modelo i3, que tienen entre 22 y 40 kWh, y se reciben en dicha instalación con un estado de salud del 70% (Davies, 2017). Cuando se inició, había pocas baterías usadas, porque sus autos tenían poco menos de 4 años de lanzados al mercado, y hoy en día las 700 plazas están proporcionando unos 15 MWh de capacidad con una potencia de 10 MW.

En 2018 Renault y sus socios publicaron su plan *Advanced Energy Storage*, para crear un sistema de almacenamiento de energía con baterías reutilizadas de sus vehículos eléctricos. El sistema avanzado, modular y distribuido entre varias localizaciones en Francia y Alemania, se convertiría con el tiempo en el sistema de almacenamiento de energía más grande de Europa con baterías reutilizadas de vehículos eléctricos, llegando a reutilizar 2.000 packs de baterías de vehículos eléctricos, con una potencia de 70 MW y una capacidad de 60 MWh, equivalente al consumo diario de unos 5.000 hogares (Manthey, 2018).

Renault tuvo en cuenta las aplicaciones de segunda vida desde el inicio de su programa de movilidad eléctrica, ya que la compañía ha ofrecido durante mucho tiempo vehículos eléctricos con arrendamiento (*leasing*) de baterías. Si bien este modelo de negocio se ha visto relajado últimamente, Renault sigue siendo dueño de muchas de las baterías que se utilizan en sus vehículos eléctricos como Kangoo Z.E y Zoe.

En febrero de 2020 Renault y su socia Connected Energy presentaron una planta sistema de almacenamiento de energía con 1.2 MW y 0,75 MWh de baterías de segunda vida de sus utilitarios eléctricos Kangoo, para servicios eléctricos en una planta industrial de Umicore en Bélgica (Colthorpe, 2020), afirmando que esta aplicación puede extender el uso de las baterías por al menos 7 años más. En octubre de ese año Renault presentó 2 nuevos proyectos de sistemas de almacenamiento de energía con baterías de segunda vida *Advanced Battery Storage* en Francia y *SmartHubs* en Reino Unido, destinados a contribuir a equilibrar las redes eléctricas en tanto el porcentaje de energías renovables intermitentes se incrementa. El primer proyecto con 4,7 MWh y es parte del plan anunciado en 2018, y fue instalado en la planta de Renault en Douai. En las sucesivas menciones al Plan, Renault ya habló solo de ubicaciones en Francia, y de un total de hasta 50 MWh. El segundo proyecto comenzó a implementarse en Sussex, Reino Unido, y según lo anunciado llegaría a tener 14,5 MWh con el tiempo en varias ubicaciones. El proyecto *SmartHubs* es uno de los cuatro proyectos iniciados por el gobierno británico para contribuir a diseñar los sistemas de energía del futuro. El consorcio del proyecto incluye

Connected Energy, Moixa, PassivSystems, ICAX, la Universidad de Newcastle, Innovate UK y el Consejo del Condado de West Sussex (Hampel, 2020).

Como ejemplo más reciente, en marzo de 2022 el grupo ENEL anunció la entrada en operación de su proyecto *Second Life* con 78 baterías de autos eléctricos Nissan, 48 de las cuales son usadas y 30 nuevas, para obtener datos de sus rendimientos comparados, en una central eléctrica en Melilla, España, operada por su subsidiaria ENDESA. El proyecto basado en principios de economía circular y capaz de entregar 4 MW de potencia y almacenar hasta 1,7 MWh de energía, fue elegido iniciativa miembro del Foro Económico Mundial. Si la planta de Melilla se desconecta del sistema, el sistema de almacenamiento de energía es capaz de entregar su energía inmediatamente y por 15 minutos, tiempo suficiente para reiniciar el suministro de energía.

De los ejemplos anteriores queda claro que los fabricantes automotrices, asociados a empresas del sector eléctrico, están en una posición ventajosa en el mercado de segunda vida, al ser los que controlan el origen de sus baterías, pueden monitorear su uso y recolectarlas a través de sus redes de concesionarios (Pyper, 2015). Existe también multitud de empresas más pequeñas, algunas en estadio de lanzamiento (*startups*), que se proponen el negocio de la segunda vida de baterías, para lo cual tienen que conseguir el material de partida de alguna automotriz, o en su defecto reacondicionar packs de vehículos eléctricos livianos.

Por ejemplo, FreeWire⁴¹ en California, trabaja con baterías de litio usadas del Nissan Leaf, construyendo cargadores rápidos para vehículos eléctricos, que tienen la posibilidad de suministrar más potencia desde la energía almacenada en sus baterías. Su CEO afirmó que consigue las baterías por 100 dólares/kWh, pero en general los fabricantes automotrices no revelan los precios de sus packs usados.

Por esa razón, queda abierta la cuestión de la factibilidad económica de los proyectos de reutilización de baterías en segunda vida, más allá de la viabilidad técnica. También está por ahora abierta la cuestión de la durabilidad y el rendimiento de las baterías usadas en segunda vida, lo que dependerá de la aplicación y del estado previo de las baterías, y es objeto de muchos estudios actualmente.

Al presente, abundan los casos de aplicaciones de segunda vida con baterías de litio usadas en el sector residencial, en combinación con sistemas de energía solar, con mayor o menor grado de formalidad.

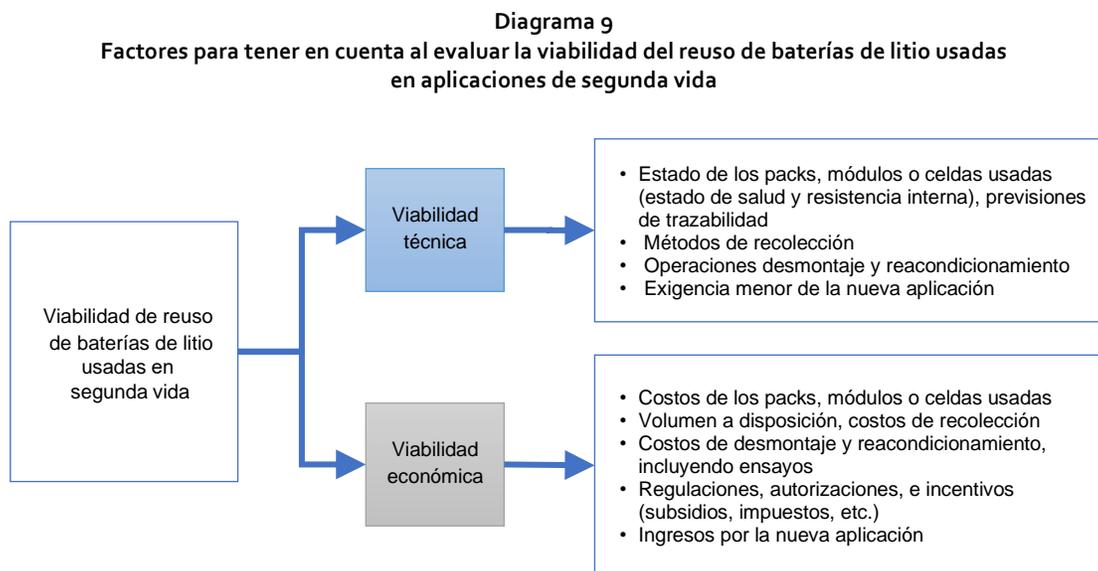
En el trabajo de Martínez-Laserna et al (2016) se evaluó el rendimiento y la degradación de baterías de litio durante la segunda vida, en packs armados con distintos lotes de celdas, en diferentes condiciones, sometidos a dos perfiles de carga distintos. Por un lado, con descargas relativamente suaves (baja exigencia de corriente o *C-rate* (⁴²), en lo que podría ser un sistema FV residencial aislado) y por otro lado, descargas más exigentes (altas corrientes o *C-rate*, en lo que podría ser un sistema conectado a la red, con gestión de demanda. Las condiciones de ciclado fueron aceleradas, para simular el envejecimiento de 1 año en 1 mes, de otro modo el estudio se haría muy largo. Se estudió la disminución de la capacidad, y el aumento de la resistencia interna de las celdas, y el efecto de la heterogeneidad de las celdas elegidas (distintos modos de degradación en la primera vida, aun cuando el estado de salud fuera el mismo), en la durabilidad del sistema de baterías en la segunda vida. El estudio mostró que algunas celdas con mayor exigencia (*C-rate*) en packs heterogéneos en la segunda vida llegaron a exhibir saltos o rodillas en las curvas de disminución de la capacidad y del aumento de resistencia interna, lo que indica una degradación acelerada. En esos casos, las celdas tipo *pouch* se inflaron, indicando la gasificación del electrolito, y tornándolas rápidamente inservibles.

⁴¹ Véase más información en www.freewire.com.

⁴² Para repasar el concepto de *C-rate*, consultar el anexo 1.

Los resultados de Martínez-Laserna et al, (2016) muestran que la viabilidad técnica de la reutilización de celdas usadas de vehículo eléctrico en una aplicación de segunda vida depende fuertemente de la homogeneidad en el estado de salud de las celdas elegidas y sus fases de degradación. Sin embargo, el tipo de perfil de demanda (altas o bajas corrientes o *C-rate*) de la nueva aplicación también tiene un efecto importante en la subsiguiente degradación durante la segunda vida. Es importante, a los efectos de la duración de la segunda vida, diseñar las aplicaciones o dimensionar los packs de manera acorde, de modo que no representen una alta exigencia en corrientes o *C-rates* a los packs, en relación con la exigencia que tenían en la primera vida. Claramente, la aplicación de altas corrientes en una batería de litio, que generan más calor, es un efecto dominante para su envejecimiento.

Los factores para considerar al evaluar la viabilidad del reuso de baterías de litio usadas en cada caso concreto, hasta llegar a un modelo de negocio aceptable, se dividen en factores de viabilidad técnica y factores de viabilidad económica, que se resumen en el diagrama 9.



Fuente: Elaboración propia.

Un detalle importante para tener en cuenta en el reensamblado de packs con celdas usadas extraídas de otros packs es la homogeneidad de las celdas, un aspecto que se resalta en el recuadro 2. Es común ver en internet la refabricación de packs extrayendo las celdas de viejos packs de notebooks y otros aparatos electrónicos. Lo que muchas veces no se cuenta en esas publicaciones y videos, es el resultado final de esos packs: su baja performance, su corta vida útil, y los riesgos de mal funcionamiento, que suelen ser ignorados.

Las baterías reacondicionadas de segunda vida para funciones estacionarias de acumulación pueden ser un recurso muy económico, comparadas con sistemas nuevos de acumulación, o de primera vida, además de resolver el problema ambiental de la disposición de las baterías, y facilitar la evaluación del ciclo de vida de estas.

Recuadro 2**Importante consideración sobre el uso de celdas no homogéneas para reensamblado de packs**

No es recomendable y no es una buena práctica, mezclar en un pack reensamblado con celdas de litio usadas, las celdas de diversos fabricantes, de distintas partidas o de lotes distintos (que tendrán distinto grado de envejecimiento), o celdas con distintas capacidades o estados de salud, todo lo cual se resume en "celdas no homogéneas", puesto que se obtendrá un pack en el que las celdas trabajarán de modo desigual, implicando una baja performance, una corta vida útil y mayores riesgos de problemas, donde unas celdas pueden actuar sobre la carga (y hasta la polaridad) de las otras, si los sistemas de control y monitoreo de la batería no pueden controlar la situación. De hecho, en los packs de buena calidad y alta seguridad, los BMS se diseñan teniendo en cuenta las características concretas de las celdas que se usarán, en particular sus curvas de carga/descarga, sus capacidades (ampere-hora) y resistencia interna.

De este modo, usar celdas no homogéneas para reensamblar un pack, no resulta una buena práctica de esta industria. Este aspecto es un factor que impacta en la viabilidad técnica del ensamblado de packs de segunda vida, en cuanto a la selección del material de partida, para lo que se buscará contar en lo posible con una cantidad suficiente de packs homogéneos. Por otro lado, implica considerar qué clase de garantías es posible extender para los packs de segunda vida, en base a la integridad del material con el que se arman, y la relación con el cliente final.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la constante baja de precios de los packs nuevos, y la gran variabilidad del recurso de partida (baterías usadas de muchos fabricantes distintos) hace dudar sobre la conveniencia económica de los esfuerzos de recuperación y reacondicionado, en los mercados que todavía no tienen volumen, y en los que no hay incentivos económicos o regulatorios para estas actividades. En China, por ejemplo, con el mercado más grande de segunda vida, existen subsidios específicos para este tipo de actividad, como se verá en el capítulo III.

Podemos ver modelos de negocios de segunda vida de baterías usadas en los ejemplos revisados y empresas mencionadas, pero la compleja economía y eventuales casos de negocio de la segunda vida no se pueden generalizar a todas las regiones, y a todos los tipos de baterías, y deben evaluarse caso por caso, para cada conjunto particular de oferta de baterías usadas y demanda (mercado potencial). En Martínez-Laserna et al, (2018) se estudian métodos para la evaluación de la viabilidad de segunda vida, que dependen de innumerables factores para cada mercado en particular. Algunos de dichos factores fueron resumidos en el diagrama 7.

En el trabajo de Zhu et al, (2021) se da un completo y actual reporte sobre la factibilidad de aplicaciones de segunda vida, incluyendo una lista de proyectos, la mayoría de acumulación estacionaria, con sus capacidades (kWh o MWh) desde 2011, realizados por empresas tales como Nissan y Sumitomo, GM y ABB, Dake Energy, Eaton, Daimler, Vattenfall, BMW, Bosch, GETEC, Remondis, Toyota, Renault, Wärtsilä, Hyundai, Northvolt, Umicore, entre muchas otras. Se puede observar muchas colaboraciones o *joint ventures* entre automotrices y empresas de energía. De la línea temporal de proyectos se destacan 4 tendencias: 1) el número de proyectos ha aumentado dramáticamente en los últimos 3 años, 2) casi todos los principales fabricantes automotrices han lanzado o planean lanzar proyectos de aplicaciones de segunda vida, ya sea trabajando con su proveedor de baterías o empleando a una empresa externa (usualmente del rubro energía), 3) las aplicaciones de acumulación estacionarias a gran escala (ESS), en particular para redes, son cada vez más populares; y 4) los tipos de aplicaciones de segunda vida se están diversificando.

Finalmente se puede considerar que los impactos ambientales de las operaciones tendientes al reuso en segunda vida son mínimos, considerando un uso muy moderado de energía y prácticamente nula necesidad de insumos químicos (a menos que haya que separar alguna parte pegada, mediante solventes o removedores, que será un caso no muy plausible para destinar a segunda vida) en los procesos de desmontaje y reacondicionamiento. Aparte de éstos, se tendrá impactos derivados de la

incorporación de nuevos materiales eléctricos (circuitos, chips, etc.) y estructurales (carcasas, gabinetes, etc.). En todo caso resulta evidente que serán impactos muy inferiores a los posibles impactos derivados del reciclaje en un estadio final de las baterías. De aquí que sea preferible, siempre que se pueda, destinar las baterías a segunda vida antes que, a reciclaje, como se vio en del capítulo I, al explicar la “Jerarquía de Lansink”.

Instalaciones estacionarias de acumulación de energía eléctrica

Las condiciones que deben cumplir las instalaciones eléctricas para fines de almacenamiento estacionario de energía deberán en general ser establecidas y supervisadas por las autoridades que controlan las redes eléctricas locales, a través de las normativas y los reglamentos que correspondan, de modo que las instalaciones cumplan de manera segura su función, entregando la energía con los parámetros de calidad de potencia requeridos por el operador de la red. En parte este cumplimiento se relaciona a las condiciones de diseño de las baterías, y en parte a la electrónica de potencia de los convertidores (*inverters*) que acoplan las baterías (corriente continua) a las redes eléctricas (corriente alterna), en la tensión y frecuencia adecuadas.

En el caso de abastecer a sistemas aislados, como microrredes rurales o emprendimientos industriales en sitios remotos, deberá conformarse a los reglamentos que correspondan para instalaciones eléctricas, domiciliarias o industriales, en la jurisdicción o país que se esté considerando.

A los efectos de diseñar la aplicación de un sistema de baterías en segunda vida, se debería tener en cuenta los siguientes puntos⁴³:

- i) La capacidad en ampere-hora que se requiere acumular y descargar (demanda) debe ser menor que la capacidad del conjunto de baterías ensamblado, de modo que la profundidad de descarga esté acorde a lo recomendado para cada tipo de batería (en las de litio, idealmente, profundidad de descarga < 80 %), considerando la capacidad real actual dada por el estado de salud de las baterías usadas.
- ii) La razón (corriente, en amperes, o *C-rate* en % de C) de carga o descarga, y, por lo tanto, la potencia (en watts en corriente continua, o en VA en corriente alterna) que requiere la demanda debe ser menor que el *C-rate* y la potencia pico tolerada por el nuevo arreglo de baterías usadas. En baterías de litio idealmente la demanda no debería superar una razón de 0,5 C ($C/2$), o bien la potencia demandada no debería superar el 50% de la potencia del pack. Cuanto menor el *C-rate* y la profundidad de descarga, mayor será la duración de la segunda vida útil.
- iii) Adaptar las tensiones (V) mediante las etapas de transformación necesarias. Para esto tener en cuenta que una batería no tiene una tensión fija sino un recorrido de tensión, entre una tensión máxima (100% cargada) y una tensión mínima segura por diseño.
- iv) Utilizar las carcasas o envoltentes adecuadas para el servicio que se prestará. Por ejemplo, si se trata de una aplicación a la intemperie, asegurar un entorno que respete el rango de temperaturas de trabajo especificadas para cada tipo de batería.
- v) En caso de usar sistemas de control (BMS) nuevos para las baterías reacondicionadas, éstos deben estar integrados, mediante protocolos de comunicaciones configurables, con el sistema de control de la nueva aplicación (por ejemplo, del inverter o el control maestro del sistema de acumulación, véase más abajo).

⁴³ Para una reseña de los conceptos eléctricos de baterías que se usan a continuación, consultar el anexo 1.

Los parámetros más relevantes que normalmente controla un sistema BMS son:

- las tensiones de las celdas o grupos de celdas en cada elemento de la serie (cada tensión de la serie);
- las temperaturas de las celdas, o cada cierta cantidad de celdas, de modo tal que se considere una temperatura representativa del conjunto, y
- la corriente total de carga o descarga del pack, que debe estar limitada a valores máximos.

La función básica del sistema de control es decidir si interrumpe la corriente principal mediante algún elemento conmutador, como contactores o conjuntos de MOSFETs frente a alguna condición preprogramada, en la que se excedan los parámetros de seguridad (tensiones máximas, temperaturas máximas, corrientes máximas, etc.). Para esto, los sistemas de control deben contener información específica de las celdas a las que van a controlar. En el mejor caso estos sistemas se diseñan o configuran específicamente para las celdas que se usarán, incluyendo en la programación del sistema de control los datos de las curvas de carga/descarga de las celdas.

Adicionalmente, los sistemas de control posibilitan el monitoreo remoto de las baterías. En sistemas de acumulación estacionaria, los BMS deben estar integrados por comunicaciones con el resto del sistema que entrega la energía en la descarga, o recibe la energía en la recarga. Estos sistemas a veces llamados PCS (*Power Converter System en inglés*) incluyen inversores bidireccionales (DC/AC y AC/DC) y convertidores DC/DC, y realizan el acoplamiento entre la batería y su entorno eléctrico, como barras o buses de AC o DC. En ocasiones, la carga de baterías puede realizarse a través de cargadores dedicados (toman energía en AC, y la convierten a DC).

La integración por comunicaciones de los BMS es un requisito fundamental para que los PCS (y/o cargadores) puedan administrar las estrategias de descarga y recarga de las baterías, en función del estado de los recursos del sistema total (como la energía de red, la generación solar, etc.). Las señales que le envíe el BMS al PCS serán información clave para mantener la seguridad del sistema, y para monitorear el estado de las baterías. De aquí la importancia que cobra el software en estos sistemas, y no solamente el hardware, tanto en las comunicaciones y adquisición de datos, como en la toma de decisiones de control.

Las instalaciones estacionarias de acumulación de energía con baterías de litio a gran escala requieren la incorporación de elementos y sistemas de extinción de incendios (Conzen, 2019). Hasta qué punto dichos sistemas pueden ser incorporados en los sistemas más pequeños de acumulación residenciales, es una cuestión que se dirime entre lo que permitan los costos y lo que obliguen las regulaciones. En general el usuario debe estar informado acerca de los riesgos de incendio de las baterías de litio.

En cualquier caso, las baterías de litio plantean riesgos de seguridad también al nivel de su uso en acumulación de energía residencial, por lo que para este caso también será conveniente contar con recomendaciones sobre la minimización de los riesgos, entre ellas:

- i) que el BMS esté correctamente integrado con la aplicación (inverter, etc),
- ii) ubicar las instalaciones de baterías, cuando sea factible, en el exterior de las viviendas, aunque en contenedores o gabinetes aislados de la intemperie, pero ventilados, teniendo en cuenta las variaciones climáticas y los rangos de temperaturas de trabajo de las baterías.
- iii) incorporar, cuando se pueda y sea viable, sistemas de alarma y protección contra incendios.

F. Los procesos de reciclaje de los materiales de baterías según su tipo

Luego de agotada la primera vida, y la posible segunda vida, o ante la imposibilidad práctica de destinar cierta clase o lote de baterías a una segunda vida, se plantea la posibilidad de su reciclaje, para intentar recuperar los materiales que contengan (que fueron detallados en el Capítulo I).

Los procesos de reciclaje que se practican al presente son muy variables, reflejando la gran variabilidad de químicas y formatos de baterías (Hill et al, 2019).

Hasta el presente, muchas de las plantas se enfocan en el recupero de los metales más valiosos, como el cobalto y el níquel. En el caso del litio, hasta ahora los costos del producto reciclado no podían competir con el precio del litio original de minas, pero esto puede estar en vísperas de revertirse, con la escalada de los precios del litio que se está viendo al momento de escribir este texto (Colthorpe, 2022). Sumado a ello, las cuestiones geopolíticas del abastecimiento resultan un estímulo a las plantas de reciclaje para obtener mayores rindes de este metal también.

El reciclaje de baterías de litio al presente es un mercado muy concentrado. El 70% del reciclaje de baterías de litio se hace en China y Corea (Colthorpe, 2019; Melin, 2021). Según (Melin, 2018.b) la fuerte demanda interna de China ha desencadenado la ampliación de varias plantas de tecnología avanzada y ha convertido a los recicladores chinos en líderes mundiales. Esto ha elevado la tasa de reciclaje global (en relación con la cantidad de baterías que está llegando al final de su vida) hasta el 42 %. No el magro 3 a 5% sobre el que se suele leer en los medios. Además, las baterías que reciclan en China provienen también en parte de Europa, América del Norte y del resto del mundo, a través de la industria de reutilización de dispositivos electrónicos portátiles, en rápida expansión, que se concentra en Hong Kong y Shenzhen (Melin, 2018.b).

A diferencia del resto del mundo, las baterías en China, y cada vez más en Corea del Sur y Japón, no son recicladas por recicladores independientes. En cambio, son los fabricantes de baterías, y de materiales para baterías (por ejemplo, ánodos y cátodos), los que utilizan los materiales reciclados para refabricar precursores y materiales de cátodos. Dos tercios de esa industria tienen su sede en China, y una gran parte del tercio restante se encuentra en Corea del Sur y Japón (Melin, 2018.b).

Esta situación también está en vías de encontrar más baterías de litio entre 2022 y 2025, con el advenimiento de las gigafactories en Estados Unidos y Europa, que proporcionarán la demanda local de materiales reciclados.

En Europa, las grandes automotrices como Volkswagen y Tesla invierten miles de millones de dólares en esquemas de reciclado, a la vista de la nueva regulación europea sobre reciclado. El reciclaje de menor escala de las baterías de uso doméstico, al que cada vez más se unen las baterías de EV livianos, está todavía en manos de empresas más pequeñas como Redux en Alemania (Weyerer, 2021). Redux se dedica más a reciclar pequeños packs de baterías de litio y residuos de baterías del sector residencial, como packs de notebooks, apoyándose en su experiencia de reciclaje de todo tipo de pilas de uso doméstico. Esta empresa está teniendo problemas con sus magros ingresos. El producto de su reciclaje puede ser difícil de vender, más si es tóxico o peligroso (Weyerer, 2021).

La complicación principal del reciclaje es el desarmado total de la batería en módulos y la separación de las celdas, lo que insume mucha mano de obra, ante la gran variabilidad de las baterías de insumo. Esto requerirá para su automatización de un tipo de inteligencia artificial que hoy recién está empezando su desarrollo, con la flexibilidad que tiene la inteligencia humana, para, por ejemplo, identificar piezas en un contexto complejo, y manipular herramientas de manera hábil. Sería muy conveniente si los fabricantes incluyeran etiquetas, códigos QR o RFID, u otros similares que sean legibles automáticamente, en las partes y componentes clave de los packs de baterías.

Al presente, existen sistemas y regulaciones para el etiquetado de baterías, pero para otros fines, que no se relacionan con el mencionado arriba (facilitar la automatización del reciclado). Para el transporte aéreo de baterías de litio, por ejemplo, la IATA (International Air Transport Association) establece normas que incluyen su etiquetado, usando el sistema de Naciones Unidas de clasificación de sustancias peligrosas (Smith Corona, 2022). En Japón, tanto la Sociedad de Ingenieros automotrices como la Asociación Japonesa de Baterías han recomendado un estándar de etiquetado para las baterías, básicamente con el signo “reciclable” y el tipo de batería, entre cuatro químicas (Pb, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion) con cuatro colores, para facilitar su recolección y clasificación (Takashi, 2014), como se muestra en el diagrama 11 del capítulo IV.

En general los procesos de reciclaje actuales siguen alguna combinación de las siguientes clases de procesos: desactivación, procesos pirometalúrgicos, procesos mecánicos, y procesos hidrometalúrgicos.

En las explicaciones sucesivas se trata de resumir las descripciones de esos procesos en base a los trabajos de Harper et al, (2019), Diekmann et al, (2017), Hill et al, (2019) y Pagliaro y Meneguzzo, (2019). Los detalles concretos de los procesos dependerán muy específicamente de las particularidades de baterías siendo recicladas, como los formatos de los packs, y los formatos y las químicas de las celdas.

1. Desactivación

En primer lugar, la desactivación tiene por objetivo eliminar cualquier carga eléctrica residual que puedan tener las baterías, módulos o celdas, y también reducir los elementos químicos volátiles del electrolito. En general se puede hacer en conjunto con la apertura y separación. La industria prefiere hacer las 3 operaciones juntas, enviando los packs directamente a triturado en una atmósfera inerte de N₂ o CO₂. El procesamiento físico actual de LIB en Europa y América del Norte incluye los procesos de Recupyl (Francia), Akkuser (Finlandia), Duesenfeld (Alemania) y Retriev (Estados Unidos/Canadá). Los procesos europeos a gran escala actualmente no utilizan técnicas de estabilización antes de abrir las celdas, sino que optan por abrirlas bajo una atmósfera inerte de CO₂ o argón (con menos del 4% de O₂). La apertura bajo CO₂ permite la formación de una capa pasivante de carbonato de litio sobre cualquier metal de litio expuesto.

La desactivación puede hacerse por descarga directa en salmueras, buscando extraer de alguna forma el electrolito en forma gaseosa (proceso térmico a 300°C), por la evaporación o combustión del solvente, seguido de filtración. También puede hacerse por descarga óhmica en resistencias, y subsiste la cuestión de si esa energía residual se pudiera aprovechar, al menos para los procesos de la planta, acumulándola justamente en otras baterías de segunda vida. En este paso las celdas pueden hincharse y abrirse. Usualmente el desmontaje parcial de las partes de un pack en partes menores (módulos) disminuye la energía contenida, y es un paso que tendrá que hacerse de todos modos, así que es preferible hacerlo antes de la desactivación.

En el caso de packs de alta tensión la descarga en salmueras no puede hacerse en forma directa, debido al alto grado de electrólisis que produce y la consecuente evolución vigorosa de los gases, pero puede hacerse en módulos de baja tensión y celdas, donde la electrolisis puede ser mejor controlada. La desventaja es que se pueden contaminar los materiales de las celdas, complicando el procesamiento químico posterior. Por otro lado, dependiendo de las químicas, la sobre descarga puede ser perjudicial para las celdas por un efecto de disolución del cobre en el electrolito, lo que tendrá consecuencias indeseables en los procesos que siguen.

Las tecnologías actuales de procesamiento baterías de litio esencialmente eluden estas preocupaciones alimentando las baterías al final de su vida útil directamente en una trituradora o a un reactor de alta temperatura, exponiendo así los elementos que serán recuperados en procesos posteriores.

A partir de allí, la preparación de los módulos, celdas o materiales de recubrimiento de los electrodos, recuperados en el paso anterior, puede hacerse por métodos de tratamiento

pirometalúrgico y/o mecánicos. El uso del tratamiento pirometalúrgico conduce a la recuperación de Ni, Co y Cu en una masa fundida. El tratamiento mecánico combina trituración y clasificación.

2. Tratamiento pirometalúrgico

Los procesos del tratamiento pirometalúrgico utilizan hornos a altas temperaturas para reducir los óxidos metálicos a una aleación de Co, Cu, Fe, y Ni. A estas altas temperaturas las baterías son básicamente fundidas. Este es un proceso que deriva de los tratamientos usados normalmente para las pilas de uso doméstico, y está establecido ya comercialmente para las baterías de litio de la electrónica de consumo. Tiene ciertas ventajas para el reciclaje general de celdas de baterías de litio sin discriminación, como vienen de la electrónica de consumo, y para las que vienen de los vehículos eléctricos también sin clasificación previa. Como los colectores de corriente de los electrodos (Al y Cu) contribuyen al proceso de fundido, esta técnica puede ser usada con módulos enteros, y celdas indistintamente, sin necesidad de una desactivación previa. Los productos son aleaciones metálicas, escorias y gases. Los productos gaseosos obtenidos a temperaturas más bajas (<150 °C) contienen volátiles orgánicos del electrolito y el aglutinante ("*binder*").

A temperaturas más altas los polímeros se descomponen y se queman. La aleación metálica puede ser separada a través de procesos hidrometalúrgicos (HM) en los componentes metálicos, y la escoria usualmente contiene los metales Al, Mn, y Li, que pueden ser recuperados mediante un procesamiento HM adicional, pero también pueden usarse en otras industrias, como la industria del cemento. En el proceso PM normalmente no se tiene en cuenta la recuperación de los electrolitos y los plásticos u otros componentes como las sales de litio. A pesar de plantear impactos ambientales (como la producción de gases tóxicos, que deben ser capturados o remediados y el requisito de procesamiento HM posterior), los altos costos de energía, y la limitada cantidad de materiales recuperados, éste sigue siendo un proceso de uso frecuente para la extracción de los valiosos metales de transición como Co y Ni.

3. Tratamiento mecánico

En el tratamiento mecánico después de la trituración, los materiales triturados pueden someterse a una variedad de procesos de separación física, que aprovechan las variaciones en propiedades como el tamaño de las partículas, la densidad, el ferromagnetismo y la hidrofobicidad. Estos procesos incluyen tamices, filtros, imanes, mesas vibratorias y medios pesados, utilizados para separar una mezcla de solución rica en litio, plásticos y papeles de baja densidad, cubiertas magnéticas, electrodos revestidos y polvos de electrodos. El resultado es generalmente una concentración de recubrimientos de electrodos en las fracciones finas de material y una concentración de plásticos, materiales de carcasas y láminas metálicas en las fracciones gruesas. A partir de allí se puede usar separación magnética y por flotación para separar el carbón/grafito de los óxidos metálicos Véase más detalles en Harper et al, (2019).

En la siguiente etapa, muchos de los trabajos académicos estudian y proponen procesos mecánicos para exponer los materiales de recubrimiento de alto valor para un mayor uso posterior de procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos combinados. Muchos de esos estudios se basan en estudios de laboratorio, utilizando celdas de electrónica de consumo, que no necesariamente reflejan la realidad de las celdas de uso automotriz.

4. Tratamientos hidrometalúrgicos

Estos tratamientos involucran el uso de soluciones acuosas para lixiviar los metales deseados del material del cátodo. La combinación más común de reactivos reportada es H_2SO_4/H_2O_2 . Se han llevado a cabo varios estudios con el fin de determinar el conjunto de condiciones más eficiente para lograr una tasa de lixiviación óptima. Estas incluyen: la concentración del ácido de lixiviación, el tiempo, la temperatura de la solución, la relación proporción sólido-a- líquida y la adición de un agente reductor.

La complejidad de estos procesos excede el alcance de este trabajo, pero se refiere al lector al reporte de Harper et al, (2019)

El trabajo de Diekmann et al, (2017) propone una nueva ruta, utilizando pasos previos de Wang, (2016) para separar el recubrimiento de los electrodos. Los procedimientos son combinaciones de procesos térmicos y mecánicos, que utilizan temperaturas superiores a 400 °C para descomponer el aglutinante (o *binder*, el más común hoy en día es fluoruro de polivinilideno), lo que da como resultado una menor adherencia entre la lámina colectora de corriente y el recubrimiento del electrodo. El subsiguiente proceso mecánico da una recuperación de los materiales de recubrimiento con alta pureza.

En el siguiente paso, se aplican usualmente tratamientos hidrometalúrgicos para la recuperación directa de metales, como Co, Ni, Mn y Li, de los materiales de recubrimiento obtenidos por el procedimiento mecánico, así como para la extracción de Al y Li de las escorias de procesos pirometalúrgicos. Para lograr esto, se emplean lixiviación y varios procesos de preparación. También se pueden encontrar procesos mecano-químicos en Wang M. et al, (2016).

Para mostrar la gran variedad de procesos de reciclaje existentes, a continuación, se describen brevemente dos ejemplos de procesos (Diekmann et al, 2017; Hill et al, 2019).

- i) La empresa canadiense Retriev (antes Toxco Inc.) utiliza una combinación de tratamientos mecánicos y HM. La trituración de las celdas usadas y preclasificadas se lleva a cabo mediante un molino de martillos bajo una solución de salmuera. Esta trituración húmeda conduce a una menor reactividad de las celdas y evita emisiones nocivas. Los fragmentos resultantes se someten a un proceso de separación mecánica para recuperar Al, Cu y Co en un proceso posterior. Además, se pueden recuperar Co y una salmuera de Li de los fluidos restantes.
- ii) El grupo belga Umicore utiliza una combinación de procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgico. El llamado proceso Val'Eas comienza con un horno de tres secciones. Un tratamiento de precalentamiento desactiva las baterías por evaporación de los solventes electrolíticos. El siguiente pirólisis funde los componentes plásticos a una temperatura de 700 °C antes de que la aleación y la escoria se recuperen a temperaturas de hasta 1450 °C. Como la aleación contiene Co, Cu, Ni y hierro (Fe), la escoria se compone de Li, Al, silicio (Si) y calcio (Ca). Posteriormente, la aleación es tratada por HM para recuperar compuestos refinados de Co y Ni.

Los procesos mencionados tienen claras desventajas, como la alta entrada de energía para el tratamiento pirometalúrgico, la falta de recuperación de Li, la alta producción de desechos líquidos peligrosos para la trituración húmeda y las bajas tasas de reciclaje de materiales. Por esa razón, los proyectos de LithoRec se centraron en el desarrollo de un proceso de reciclaje principalmente mecánico seguido de un tratamiento hidrometalúrgico de los materiales de recubrimiento.

Reciclaje directo de cátodos y ánodos

La extracción directa de material de cátodo o ánodo del electrodo para el reacondicionamiento y la reutilización en una batería de litio usada se conoce como reciclaje directo. En principio, los óxidos de metal mixto del cátodo se pueden reincorporar en un nuevo cátodo con cambios mínimos en la morfología del cristal del material activo. En general, esto requerirá que se reponga el contenido de litio para compensar las pérdidas debidas a la degradación del material durante el uso de la batería y porque es posible que los materiales no se recuperen de las baterías en estado completamente descargado, con los cátodos completamente litiados. Hasta ahora, el trabajo en este método se ha centrado principalmente en baterías de portátiles y teléfonos móviles, como consecuencia de la mayor cantidad de éstas disponibles para el reciclado (en un formato más uniforme de única celda), y también en la recuperación de cátodos, debido al menor valor del grafito del ánodo (Harper et al, 2019). Estos

métodos requieren el desmantelamiento de las celdas hasta sus componentes de cátodo, ánodo y separador para su tratamiento por separado. Para más detalles véase Pagliaro y Meneguzzo, (2019).

La eficiencia de los procesos de reciclaje directo está correlacionada con el estado de salud de la batería y puede no ser ventajoso cuando el estado de carga es bajo. También existen problemas potenciales con la flexibilidad de estos métodos para manejar óxidos metálicos de diferentes composiciones. Para obtener la máxima eficiencia, los procesos de reciclaje directo deben adaptarse a formulaciones específicas de cátodos, lo que requiere diferentes procesos para diferentes materiales de cátodos. Los aproximadamente 10 años que se pasan en un vehículo, seguidos, quizás, por algunos más en una aplicación de segundo uso, por lo tanto, presentan un desafío en una industria donde las formulaciones de baterías están evolucionando a un ritmo rápido. El reciclaje directo puede tener dificultades para colocar en el mercado materias primas de procedencia desconocida o mal caracterizadas, y habrá renuencia comercial a reutilizar el material si la calidad del producto se ve afectada (Harper et al, 2019).

Los desafíos del reciclaje de LIB

Los desafíos para diseñar procesos de reciclaje radican en la enorme variabilidad de químicas y formatos de celdas usadas por los fabricantes, lo que impactará en la pureza y composición de los productos de reciclado, y en la necesidad de ajustes permanentes de los procesos, sobre todo los hidrometalúrgicos, mecánicos y químicos. Especialmente la diversidad de diseños y arquitecturas de sistemas, carcasas, estructuras, y electrónica, que aplica cada fabricante, complican el diseño de automatismos para su desarmado.

De aquí que las plantas de reciclado, cuando no directamente vinculadas a los productores de las baterías, se beneficien de convenios a largo plazo con éstos, para mantener cierta homogeneidad en las corrientes que pueden llegar a reciclar, años después de la producción. Se deduce de esto que son proyectos de largo plazo que involucran unidades de negocios verticalmente integradas con los productores originales de las baterías.

Los riesgos y peligros del reciclaje de LIB

Los peligros de daños potenciales del reciclaje pueden ser divididos en 3 clases, que interactúan entre sí, formando una combinación que se retroalimenta: peligro eléctrico, peligro de fuego y explosión, y peligro químico.

Los peligros eléctricos directamente relacionados a la energía y alta tensión de las baterías. Los choques eléctricos pueden causar serios daños y hasta la muerte al cuerpo humano, y los cortocircuitos producen rápido calentamiento por efecto Joule hasta temperaturas muy elevadas. Este peligro se va reduciendo a medida que los packs de más energía se van separando en módulos de menos energía, removiendo los conectores entre ellos, y más aún luego de desmontar los módulos en celdas.

El peligro de fuego y explosión radica en que los diluyentes empleados en el electrolito de las celdas usualmente de dimetil carbonato, y etil metil carbonato que son inflamables, los productos de su combustión como metano, etano y propano también aumentan el riesgo de fuego y explosión, al aumentar la temperatura y presión de las celdas.

El riesgo químico puede ser inducido por los productos gaseosos tóxicos de las reacciones, como el monóxido de carbono (CO) y el fluoruro de hidrógeno (HF), de la descomposición de la sal hexafluoruro de litio (LiPF₆) del electrolito, y el aglutinante de fluoruro de polivinilideno. De allí que se requieren procesos de desactivación y remoción de tales sustancias para continuar luego con la recuperación.

Los impactos ambientales de los procesos de reciclaje de baterías de litio

En algunos tratamientos químicos o HM pueden generarse aguas residuales que contienen metales pesados, amoníaco y nitrógeno, entre otros efluentes. Los avances tecnológicos recientes en los procesos están logrando que la extracción de metales sea más segura y respetuosa con el medio ambiente. Una tecnología de uso de desechos y control de la contaminación para baterías de litio debe poder reducir las emisiones de aguas residuales en al menos un 50%.

Recientemente una tecnología de esta clase inventada por el Instituto de Ingeniería de Procesos de la Academia de Ciencias de China logró la recuperación selectiva de litio y el tratamiento de sus aguas residuales. Se ha construido un proyecto piloto que utiliza esta tecnología para demostrar cómo se puede reciclar baterías de litio de manera respetuosa con el medio ambiente. El Instituto de Ingeniería de Procesos indica que el reciclaje de baterías de litio crea metales valiosos y sustancias tóxicas como compuestos y solventes orgánicos, que han logrado reutilizar (Xinhua, 2021).

Los investigadores en muchas empresas y centros de I+D del mundo, públicos y privados, están trabajando sobre líneas similares para encontrar formas seguras, eficientes y ecológicas de reciclar dichos materiales. En esta temática puede verse una gran cantidad de trabajos académicos, basta consultar por ejemplo los libros (Liang et al, 2019; Kwade et al, 2018; Guangjin, 2017). El primeros dos son compilaciones que contienen contribuciones de varios autores, y sus afiliaciones. En general en la I+D más académica puede verse una tendencia hacia la ciencia de materiales (química, física, etc.), más que a la ingeniería de procesos, excepto cuando se dispone de plantas piloto. Las entidades nombradas a continuación llevan a cabo su propia I+D para optimizar sus procesos y probar nuevas variantes, tanto en sus propias plantas piloto como en las industriales.

Algunos datos de empresas de reciclaje de baterías de litio en Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea

Globalmente hay unas 100 empresas en plena actividad o preparándose con tecnologías de reciclaje de baterías en desarrollo, para un mercado que se percibe que estará mucho más activo en pocos años más (Kumagai, 2021). Para una referencia de estas empresas y sus procesos se puede ver (Hill et al, 2019). Algunas de estas empresas son globales, y tienen plantas en varios países. Hay nuevos procesos en estudio con grados de recuperación mucho más altos, del orden del 95 al 99 % de distintos materiales, si bien habría que verificar aun los impactos ambientales y balances económicos y ecológicos de sus procesos. Naturalmente las empresas suelen proteger sus desarrollos tecnológicos más importantes, que pueden encontrarse en sus patentes.

En Estados Unidos el rubro de reciclaje de baterías tiene un congreso específico⁴⁴. De acuerdo con datos de Startus, (2020), 5 de los startups más innovadores en reciclaje de baterías de Europa y América son: Lithion, Li Cycle, Akkuser, NAWA Technologies, y Duesenfeld. En el listado que sigue se mencionan algunas empresas, su nacionalidad y algunos detalles relevantes.

- Ascend Elements⁴⁵ (ex- Battery Resourcers) con proceso patentado *Hydro-to-Cathode*(TM) produce cátodos de nuevo a partir de materiales de cátodos reciclados.
- Akkuser (Finlandia)⁴⁶ construyeron la primera instalación de reciclaje en el mercado, que tiene la capacidad de reciclar baterías de una manera ambientalmente sostenible. Desarrollaron un proceso de reciclaje que permite una alta eficiencia de reciclaje y un tratamiento seguro de los residuos de baterías reactivas. Sus procesos no usan agua ni reactivos químicos, ni calor, por

⁴⁴ Véase más información en <https://www.usa.ev-battery-recycling.com/>.

⁴⁵ Véase más información en www.AscendElements.com.

⁴⁶ Véase más información en <https://www.akkuser.fi/en/home/>.

lo tanto, no tienen emisiones. 50% de los materiales de baterías de litio puede ser recuperado. Reciben el 100% de las baterías portables usadas de Finlandia.

- NAWA Technologies (Francia)⁴⁷ métodos biológicos para recuperar materiales de baterías.
- Duesenfeld (Alemania)⁴⁸, métodos para recuperar electrolito.
- Li Cycle⁴⁹ Originada de Kingston, Ontario-Canadá, su instalación Commercial Spoke 2 en Nueva York puede reciclar 5.000 toneladas de baterías de litio al año. En 2022 abrirá su instalación Commercial Spoke 3 en Arizona con capacidad de reciclar 10.000 toneladas de baterías de litio al año. Utiliza una combinación de reducción mecánica y técnicas hidrometalúrgicas.
- Recupyl (Francia)⁵⁰ reciclaje de baterías litio-ion y pilas alcalinas salinas, está operando a nivel industrial en Francia (baterías litio-ion), Singapur (baterías litio-ion), Estados Unidos de Norteamérica (baterías litio-ion y pilas alcalinas salinas). Sus operaciones incluyen segregación de pilas mixtas. En España operan a través de Envirobat España.
- Lithion Recycling (Canadá)⁵¹ con reciclaje directo de cátodos permite la extracción de materiales catódicos y los cátodos regenerados, junto con algunos otros materiales, son apropiados para el reingreso directo a la industria. Lithion Recycling desarrolla una solución de reciclaje de baterías que recupera el 95% de todos los componentes de las baterías de iones de litio y regenera materiales con alta pureza.
- Umicore (Bélgica)⁵² empresa global con 47 sitios de producción en el mundo, es líder en reciclaje y suministro de materiales para baterías y otras industrias. Presente en América Latina con puntos de recolección en Brasil, por ejemplo, Renault en Uruguay exige que sus productos se envíen a la planta de tratamiento de Umicore en Bélgica.
- Northvolt (Suecia)⁵³ es un caso muy notable. Ha producido celdas de batería con níquel, manganeso y cobalto 100% reciclados, y ahora apunta hacia la ampliación de las instalaciones de reciclaje en Suecia. Luego de la validación del material, las pruebas de rendimiento electroquímico de las celdas producidas con metales reciclados demuestran un rendimiento similar al de las celdas producidas con metales recién extraídos. Para acelerar el reciclaje de baterías y su impacto en la producción de baterías, Northvolt tiene como objetivo ampliar la capacidad de su planta de reciclaje para permitir el reciclaje de 125.000 toneladas de baterías por año, lo que equivale a unos 30 GWh de producción de baterías por año (Northvolt, 2021).

El transporte de baterías de litio como mercancías peligrosas. Normativa de seguridad

Existe una serie de normas que definen y aclaran los procedimientos de ensayos de seguridad para el transporte de baterías de litio, y para verificar su adecuación y seguridad para su uso en vehículos eléctricos de toda clase (para ruta y fuera de ruta, o industriales) y en instalaciones estacionarias de acumulación de energía.

⁴⁷ Véase más información en <http://www.nawatechnologies.com/>.

⁴⁸ Véase más información en https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html.

⁴⁹ Véase más información en <https://li-cycle.com/>.

⁵⁰ Véase más información en <http://www.recupyl.es>.

⁵¹ Véase más información en <https://www.lithionrecycling.com/>.

⁵² Véase más información en <https://www.umicore.com/>.

⁵³ Véase más información en <https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>.

a) Manual de pruebas y criterios de UNECE sección 38.3

En el transporte internacional de baterías de litio rigen las definiciones de la sección 38.3 del Manual de Pruebas y Criterios (*Manual of Test and Criteria*)⁵⁴ de UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*), que es una referencia estándar en lo que hace a las definiciones tratamiento de mercancías peligrosas para su transporte. El apartado 38.3 especifica los procedimientos que han de seguirse para la clasificación de las pilas y baterías de litio metálico y de iones de litio. La séptima edición del manual corresponde a 2019 (ONU, 2019). En el caso de vehículos eléctricos las baterías deben cumplir o ser compatibles con otras normas adicionales de seguridad específicas de la industria automotriz.

b) Norma ISO 26262

La ISO 26262⁵⁵ es el estándar internacional para la seguridad funcional de los sistemas eléctricos y electrónicos en los vehículos. Este estándar cubre solo el mal funcionamiento del hardware y el software del sistema de control de la batería, que puede causar fallas en la prevención del exceso de temperatura, carga, corriente y voltaje que conduce a un incendio de la batería. Los fallos de funcionamiento que no sean eléctricos o electrónicos, como defectos químicos o mecánicos en las baterías, están fuera del alcance de estas normas (Kanakamedala y Ghantous, 2021).

Si bien ISO 26262 cubre la seguridad automotriz, en 2012 se formó un cuerpo de regulaciones de seguridad de vehículos eléctricos dedicado bajo la UNECE con China, Japón, la Unión Europea y los Estados Unidos de Norteamérica, copatrocinando grupos de trabajo para abordar los problemas ambientales y de seguridad de vehículos eléctricos. El grupo de trabajo de seguridad de vehículos eléctricos de UNECE⁵⁶, especifica la seguridad del vehículo en uso y posterior a un choque. Los vehículos eléctricos deben advertir sobre una situación peligrosa dentro del compartimiento de pasajeros que permitirá su salida dentro de los 5 minutos. Además, los vehículos eléctricos permanecen seguros y no se incendian ni explotan hasta una hora después de un choque (Kanakamedala y Ghantous, 2021).

Estos requisitos se alinean con los estándares GB de China (GB 18384 – 2020⁵⁷, “*Electric vehicles safety requirements*”) y abordan la seguridad de los ocupantes en caso de eventos térmicos que provoquen incendios, explosiones o humo. Su última regulación (GTR) se enfoca en estándares futuros para sistemas de seguridad activa que usan inteligencia de software para realizar pronósticos y diagnósticos para prevenir incendios de baterías (Kanakamedala y Ghantous, 2021; Busch, 2020).

La norma ISO 26262 concierne a la seguridad funcional a nivel automotriz, y por lo tanto tiene efectos en el diseño de los sistemas de control de las baterías para vehículos eléctricos (Marcos, 2021).

c) Norma ICE 62133

Las baterías de litio cuando se transportan o se exponen a temperaturas extremas representan un riesgo ambiental y son un peligro químico y eléctrico. Para abordar los estándares de seguridad para los productos que transportan y contienen baterías de litio, se introdujo la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 62133⁵⁸. La IEC 62133 define los requisitos y las pruebas para celdas secundarias y baterías que contienen electrolitos alcalinos u otros no ácidos y las baterías fabricadas con ellos. La norma IEC 62133 distingue entre pilas y baterías de níquel y de iones de litio. Para pilas y baterías de iones de litio, la norma IEC 62133 contiene las siguientes pruebas individuales:

⁵⁴ Véase más información en <https://unece.org/about-manual-tests-and-criteria>.

⁵⁵ Véase más información en <https://www.iso.org/standard/68383.html>.

⁵⁶ Véase más información <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pagelD=3178628>.

⁵⁷ Véase más información en http://www.sac.gov.cn/sacem/Standards/Release/202005/t20200526_346600.htm.

⁵⁸ Véase más información en <https://webstore.iec.ch/publication/70017>.

- 7.3.1 Cortocircuito externo (celda)
- 7.3.2 Cortocircuito externo (batería)
- 7.3.3 Caída libre
- 7.3.4 Aplastamiento (células)
- 7.3.6 Sobrecarga de la batería
- 7.3.7 Descarga forzada (celdas)
- 7.3.8 Prueba mecánica (baterías)

La segunda edición de IEC 62133-2:2017 eliminó algunos de los requisitos que cubre UN/DOT 38.3, como la vibración, el choque mecánico y la simulación de altitud de baja presión. Todas las baterías de iones de litio deben someterse a pruebas según UN 38.3 antes del envío. Estas pruebas someten las baterías y las celdas a las condiciones que experimentarían durante el envío y la manipulación, incluidas condiciones de temperatura extrema, pruebas de choque, impacto y cortocircuito para garantizar la estabilidad de las baterías y las celdas (TÜV, 2022).

d) Norma IEC 62660

La norma IEC 62660 “Celdas secundarias de iones de litio para la propulsión de vehículos eléctricos de carretera” consta de 3 partes que se explican a continuación (Engineering 360, 2022).

- i) Parte 1 de la IEC 62660 (IEC 62660-1). Especifica las pruebas de rendimiento y vida útil de las celdas secundarias de iones de litio utilizadas para la propulsión de vehículos eléctricos, incluidos los vehículos eléctricos de batería y los vehículos eléctricos híbridos. Este documento especifica los procedimientos de prueba para obtener las características esenciales de las celdas de iones de litio para aplicaciones de propulsión de vehículos en cuanto a capacidad, densidad de potencia, densidad de energía, vida de almacenamiento y ciclo de vida, que son indispensables para asegurar un nivel básico de rendimiento y obtener datos esenciales sobre las celdas para varios diseños de sistemas y packs de baterías. Se entiende que es lo que debe realizar el fabricante de las celdas para poder demostrar/certificar que son celdas apropiadas para su uso en vehículos eléctricos.
- ii) Parte 2 de la IEC 62660 (IEC 62660-2). Especifica los procedimientos de prueba para observar la confiabilidad y el comportamiento de abuso de las celdas secundarias de iones de litio y los bloques de celdas utilizados para la propulsión de vehículos eléctricos.
- iii) Parte 3 de la IEC 62660 (IEC 62660-3). Especifica los procedimientos de prueba y los criterios de aceptación para el rendimiento de seguridad de las celdas secundarias de iones de litio y los bloques de celdas utilizados para la propulsión de vehículos eléctricos. Este documento determina el rendimiento básico de seguridad de las celdas utilizadas en un pack de baterías o sistema bajo el uso previsto y el mal uso o incidente razonablemente previsible, durante el funcionamiento normal del vehículo eléctrico. Los requisitos de seguridad de la celda en este documento se basan en la premisa de que las celdas se utilizan correctamente en un pack o sistema de baterías dentro de los límites de voltaje, corriente y temperatura especificados por el fabricante de la celda (región operativa de la celda). Este documento no cubre la evaluación de la seguridad de las celdas durante el transporte y el almacenamiento.

Algunas notas sobre las IEC 62660-3, los requisitos de rendimiento de seguridad para los packs y sistemas de baterías de litio se definen en la Norma ISO 6469-1. Las especificaciones y los requisitos de seguridad para los packs y sistemas baterías de litio de ciclomotores y motocicletas eléctricas (*mopeds*

and motorcycles) se cubren en la norma ISO 18243. La norma IEC 62619 cubre los requisitos de seguridad para las celdas y baterías de litio para aplicaciones industriales, incluidas, por ejemplo, carretillas elevadoras, carros de golf y vehículos guiados automatizados. Las celdas, módulos, paquetes de baterías y sistemas de LIB están regulados por la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA) y la Organización Marítima Internacional (IMO) para el transporte aéreo y marítimo y, a nivel regional, por otras autoridades, principalmente para el transporte terrestre. Consultar IEC 62281 para obtener información adicional.

e) Norma UL 1642

Esta norma es el estándar de seguridad UL para baterías de litio⁵⁹. Estos requisitos cubren las baterías de litio primarias (no recargables) y secundarias (recargables) para uso como fuentes de energía en productos. Estas baterías contienen litio metálico, una aleación de litio o un ion de litio, y pueden consistir en una sola celda electroquímica o dos o más celdas conectadas en serie, en paralelo o ambas, que convierten la energía química en energía eléctrica mediante una reacción química irreversible o reversible. Estos requisitos cubren las baterías de litio destinadas a su uso en aplicaciones reemplazables por técnicos o reemplazables por el usuario. Estos requisitos están destinados a reducir el riesgo de incendio o explosión cuando se utilizan baterías de litio en un producto. La aceptabilidad final de estas baterías depende de su uso en un producto completo que cumpla con los requisitos aplicables a dicho producto. Estos requisitos también están destinados a reducir el riesgo de lesiones a las personas debido a incendios o explosiones cuando las baterías de litio reemplazables por el usuario se retiran de un producto y se desechan.

Estos requisitos cubren las baterías de litio reemplazables por técnicos que contienen 5 g o menos de litio metálico. Una batería que contiene más de 5 g de litio se juzga sobre la base del cumplimiento de los requisitos de esta norma, en la medida en que sean aplicables, y un examen y prueba adicionales para determinar si la batería es aceptable para los usos previstos. Estos requisitos cubren las baterías de litio reemplazables por el usuario que contienen 4 g o menos de litio metálico con no más de 1,0 g de litio metálico en cada celda electroquímica. Una batería que contenga más de 4,0 g o una celda que contenga más de 1,0 g de litio puede requerir un examen y prueba adicionales para determinar si las celdas o baterías son aceptables para los usos previstos. Estos requisitos no cubren el riesgo de toxicidad que puede resultar de la ingestión de una batería de litio o su contenido, ni el riesgo de lesiones a las personas que pueden ocurrir si se abre una batería para permitir el acceso al litio metálico.

f) Conjunto de normas IEC 62485

El conjunto de normas IEC 62485 "Requisitos de seguridad para baterías secundarias e instalaciones de baterías" especifican los requisitos básicos para baterías secundarias e instalaciones de baterías. Las normas IEC 62485 forman un conjunto de 6 partes⁶⁰ que se publicaron entre 2010 y 2020:

- i) Parte 1. Información general de seguridad. Esta parte de la Norma IEC 62485 especifica los requisitos básicos para baterías secundarias e instalaciones de baterías. En general, los requisitos y definiciones se especifican para baterías de plomo-ácido y níquel-cadmio. Pero para otros sistemas de batería con electrolito acuoso, estos requisitos pueden aplicarse en consecuencia (ver Partes 5 y 6). Los requisitos relacionados con la seguridad, la confiabilidad, la vida útil, la resistencia mecánica, la estabilidad del ciclo, la resistencia interna y la temperatura de la batería están determinados por varias aplicaciones y esto, a su vez, determina la selección del diseño y la tecnología de la batería. La norma cubre aspectos de seguridad teniendo en cuenta los peligros asociados con: electricidad (instalación, carga, descarga, etc.), electrolito, mezclas de gases inflamables,

⁵⁹ Véase más información en <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=37777>.

⁶⁰ Véase más información en <https://webstore.ansi.org/Search/Find?in=1&st=IEC+62485+>.

almacenamiento y transporte. Con respecto a la seguridad eléctrica, se hace referencia a IEC 60364-4-41.

- ii) Parte 2. Baterías estacionarias. Esta parte de la Norma IEC 62485 se aplica a baterías secundarias estacionarias e instalaciones de baterías con una tensión máxima de 1 500 V CC (nominal) y describe las principales medidas de protección contra los peligros mencionados antes. Esta Norma proporciona requisitos sobre aspectos de seguridad asociados con el montaje, uso, inspección, mantenimiento y eliminación. Cubre baterías de plomo-ácido y NiCd/NiMH. Ejemplos de las principales aplicaciones son: telecomunicaciones, operación de la central eléctrica, alumbrado central de emergencia y sistemas de alarma, fuente de poder ininterrumpida, arranque del motor estacionario, sistemas fotovoltaicos.
- iii) Parte 3. Baterías de tracción. Se aplica a baterías secundarias e instalaciones de baterías utilizadas para vehículos eléctricos, p. en carretillas industriales eléctricas (incluidas carretillas elevadoras, grúas, máquinas de limpieza, vehículos de guiado automático), en locomotoras alimentadas por batería, en vehículos eléctricos (por ejemplo, vehículos de mercancías, carros de golf, bicicletas, sillas de ruedas), y no cubre el diseño de dichos vehículos. Cubre baterías de dióxido de plomo-plomo (plomo-ácido), óxido de níquel-cadmio, óxido de níquel-hidruro metálico y otras baterías secundarias alcalinas. No cubre las baterías de litio que se cubren en sus propios estándares apropiados (Parte 5 y 6). Las tensiones nominales están limitadas a 1 000 V c.a. y 1 500 V c.c. respectivamente y se describen las principales medidas de protección contra los peligros en general por electricidad, emisión de gases y electrolitos. Proporciona requisitos sobre aspectos de seguridad asociados con la instalación, uso, inspección, mantenimiento y eliminación de baterías.
- iv) Parte 4. Baterías de plomo-ácido reguladas por válvula para uso en aparatos portátiles. Esta parte de la Norma IEC 62485 se aplica a los aspectos de seguridad asociados con el alojamiento, la disposición de los circuitos y el funcionamiento de pilas y baterías de plomo-ácido reguladas por válvulas secundarias en aparatos portátiles. Se especifican requisitos que obligan a los fabricantes de aparatos y baterías secundarias a evitar el uso indebido de las baterías durante el funcionamiento, a proporcionar medidas de protección que eviten lesiones a las personas en caso de fallo de la batería y a proporcionar información suficiente a los usuarios. Esta norma no se aplica a las celdas y baterías secundarias que contienen electrolitos alcalinos u otros no ácidos.
- v) Parte 5. Operación segura de baterías estacionarias de iones de litio. Esta parte de la Norma IEC 62485 se aplica a la instalación de una o más baterías secundarias estacionarias que tengan un voltaje de CC agregado máximo de 1.500 V a cualquier parte de CC de la red eléctrica y describe las principales medidas de protección durante el funcionamiento normal o en condiciones de falla esperadas contra los peligros generados por: electricidad, cortocircuitos, electrolito, emisión de gases, fuego y explosión. Este documento proporciona requisitos sobre aspectos de seguridad asociados con la instalación, uso, inspección y mantenimiento y eliminación de baterías de iones de litio utilizadas en aplicaciones estacionarias.

Este documento cubre las baterías estacionarias para aplicaciones industriales que se instalan en viviendas o edificios cerrados separados, así como las baterías estacionarias que se instalan en edificios públicos, oficinas y residencias privadas. Este documento también cubre el mantenimiento y la eliminación de baterías de iones de litio utilizadas en aplicaciones estacionarias. Las baterías que contienen metal de litio no están cubiertas por este documento.

Ejemplos de las principales aplicaciones son: telecomunicaciones, operación de la central eléctrica, alumbrado central de emergencia y sistemas de alarma, sistemas de alimentación ininterrumpida, arranque del motor estacionario, sistemas fotovoltaicos.

- vi) Parte 6. Operación segura de baterías de iones de litio en aplicaciones de tracción. Esta parte de la Norma IEC 62485 se aplica a las instalaciones de baterías utilizadas para vehículos eléctricos fuera de ruta o todoterreno y vehículos de usos especiales e industriales; no cubre el diseño de dichos vehículos. Ejemplos de las principales aplicaciones son: industriales, máquinas de limpieza, carretillas para la manipulación de materiales, por ejemplo, carretillas elevadoras, grúas, vehículos de guiado automático, plataformas elevadoras de propulsión eléctrica; otras aplicaciones, botes y barcos de propulsión eléctrica.

Este documento cubre los aspectos de seguridad de las instalaciones de baterías en dichas aplicaciones. Este documento no cubre los vehículos ferroviarios; para aplicaciones ferroviarias de tracción, consultar IEC 62928.

Este documento tampoco cubre las baterías ni las instalaciones de baterías para la propulsión de vehículos eléctricos de carretera. En el caso de que exista una variación de los requisitos entre este documento y los de una norma de producto relevante (por ejemplo, vehículos de mercancías, bicicletas, sillas de ruedas, carros de golf), entonces los requisitos de la norma de producto tienen prioridad.

Las celdas y baterías de iones de litio utilizadas en aplicaciones industriales de tracción están diseñadas para cumplir con los requisitos de seguridad de acuerdo con IEC 62619.

Los voltajes máximos están limitados a AC 1 000 V y DC 1 500 V, y se describen las principales medidas de protección contra riesgos, generalmente de electricidad, emisión de gases y electrolitos para prevenir incendios y explosiones.

Este documento proporciona requisitos sobre aspectos de seguridad asociados con la instalación, uso, inspección, mantenimiento y eliminación de baterías de iones de litio. Las baterías que contienen metal de litio no están cubiertas por este documento. Las normas mencionadas se pueden consultar en los links de descarga provistos en los pies de página respectivos.

G. El mercado del final de vida de las de litio y níquel-manganeso

La percepción popular acerca de la verdadera proporción de baterías de litio que se recicla es un tanto distorsionada, en parte debido a que la mayoría de las baterías que llegan al final de vida provienen actualmente de la electrónica de consumo, mientras que, para la mayoría de los vehículos eléctricos, que se vendieron en los últimos 3 a 5 años, sus baterías no alcanzan aun el final de vida. Por otro lado, el reciclaje se está haciendo primariamente en Asia (China y Corea) y comienza a hacerse en Europa y Estados Unidos de Norteamérica.

Circular Energy Storage (Edel, 2020) estima que el tamaño del mercado global de baterías recicladas podría alcanzar los 6.000 millones de dólares para 2030, con 1,2 millones de toneladas de baterías retiradas para reciclar. Por otro lado, Colthorpe, (2019) indica que China también tendrá la mayor parte del mercado, porque actualmente contribuye con el 57% de las baterías de final de vida de todo el mundo. Véase también Melin (2018.a).

Sumando los dos mercados de reciclaje y segunda vida el tamaño del mercado total ascendería a 45.000 millones de dólares hacia 2030. Prácticamente 1.000 GWh de baterías reacondicionadas, y de segunda vida estarán en uso globalmente hacia 2030, que, a un precio estimado en 45 dólares por kWh, por 12 años, equivalen al volumen de mercado mencionado (Colthorpe, 2019).

Por su parte, la consultora McKinsey calculó que el suministro de baterías de segunda vida solo para aplicaciones estacionarias podría superar los 200 gigavatios-hora por año para 2030, momento en el que "constituirá un mercado con un valor global superior a los 30.000 millones de dólares" (Hampel, 2022).

El caso de China merece mención aparte. Los vehículos de nueva energía (NEV, *New Energy Vehicles* en inglés), como se los llama en China, incluyen vehículos eléctricos tanto híbridos, enchufables y los de batería, todos los cuales tienen baterías de distintos tamaños. China experimentó un crecimiento explosivo de los vehículos de nueva energía entre 2015 y 2020, a tal punto que en el año 2021 se vendieron 3,3 millones de estos vehículos, lo que da una idea del desafío al que se enfrentan para la gestión de las baterías en desuso en unos años más (Hampel, 2022). La cifra mencionada solo cuenta los autos eléctricos y no incluye la gran variedad de otros vehículos eléctricos, incluidos actualmente más de 400.000 autobuses eléctricos, millones de bicicletas eléctricas y ciclomotores (muchos de los cuales utilizan baterías de plomo-ácido, y reutilizan baterías de otros autos eléctricos más poderosos), así como una creciente acumulación de vehículos eléctricos comerciales. El reciclaje y la utilización secundaria de baterías de vehículos retirados se han convertido en el punto álgido en el desarrollo de la industria de vehículos de nueva energía de China (Hampel, 2022).

El Ministerio de Industria y Tecnología de la Información (MIIT), encargado de la planificación industrial en toda la República Popular de China, dice que sus nuevas directivas sobre la reutilización y el reciclaje de baterías garantizarán una mayor protección ambiental, mejorarán la utilización de recursos y garantizarán el desarrollo saludable de la industria de vehículos de nueva energía. Esto no solo tiene sentido por razones geopolíticas y ambientales, sino también porque el MIIT percibe la reutilización y el reciclaje de baterías es un gran negocio (Hampel, 2022).

Algunas estimaciones prevén que el mercado de reciclaje de baterías en China alcanzará los 3.590 millones de euros para 2025, pero las cifras del valor de mercado y el volumen de materiales de baterías reciclados en este país varían enormemente. Parte de esta variación depende de si las cifras incluyen la industria de la reutilización, es decir, la segunda vida antes de que los materiales de las baterías pasen a la industria del reciclaje (Hampel, 2022).

A nivel global, por lejos la mayor cantidad de baterías fuera de uso de vehículos eléctricos que estarán disponibles para segunda vida en los próximos años estará concentrada en los mercados principales de estos vehículos (que arrancaron y se desarrollaron antes), principalmente en China, Europa y Estados Unidos de Norteamérica, y el resto del mundo queda bastante atrás de estos mercados (Melin, 2018.a).

Finalmente habrá que considerar también a largo plazo los volúmenes de baterías que provendrán del final de la segunda vida (Colthorpe, 2019), con destino a reciclaje. Entre las 2 vidas planteadas para las baterías de litio de vehículos eléctricos, es posible esperar un total de vida útil de entre 15 y 20 años.

El trabajo de Circular Energy Storage (Melin, 2022) también incluye proyecciones sobre como crecerán hasta 2030 las capacidades de reciclado por región medidas en toneladas de baterías que podrán procesar, así como datos de los precios de los materiales nuevos, por tipo de química de celdas, tomados de los mercados de metales, como el Shanghai Metal Market y el London Metal Exchange.

1. América Latina

¿Cuántas baterías habrá en un país de América Latina llegando al final de su vida útil y que estarán disponibles para reutilizar en segunda vida o para reciclar? ¿De qué clases serán esas baterías? Particularmente para esta región, las cuestiones de cuántas baterías en desuso y de qué clase se producirán, y a qué ritmo, en un mercado dado (un país, o una ciudad) y cuánto podrá convertirse en una dada cantidad de materiales recuperados y de qué clases, deberá ser objeto de estudios particulares de valoración de esas corrientes en cada país. No obstante, los análisis de la sección anterior no dejan

lugar a dudas respecto a donde se producirá la mayor actividad. Los mercados de los materiales valiosos, y las corrientes de residuos que las contienen, están y seguirán estando muy concentrados en China, que ostenta la dominancia mundial en esta materia, con una incipiente participación de la Unión Europea hacia el final de la década.

Sin embargo, en los mercados emergentes y todavía pequeños de vehículos eléctricos en América Latina no se debería descuidar la gestión de baterías fuera de uso, por pequeña que esta pueda resultar al principio, instalando el problema de las baterías fuera de uso al nivel de la gestión ambiental como prioridad y al menos preparando el marco regulatorio, los actores y las infraestructuras necesarias, para que el volumen creciente de baterías en desuso sea reinsertado en los circuitos productivos.

La gestión de los residuos de baterías de la movilidad eléctrica será influida por el grado de industrialización y avance de las cadenas de valor de las baterías en cada región. En el estudio de Hill (2019) se muestra un análisis de fortalezas y debilidades de la Unión Europea en la cadena de valor de las baterías, que aquí se reproduce en el cuadro 14. Se agrega un análisis análogo general para la región latinoamericana, la cual evidentemente se encuentra más atrasada en su desarrollo, tanto de los mercados de vehículos eléctricos como de sus baterías.

Cuadro 14
Resumen de fortalezas y debilidades de la cadena de valor de las baterías, comparando Unión Europea y América Latina

Eslabón de la cadena de valor de las baterías	Unión Europea			América Latina		
	Industria	Infraestructura	Políticas y Regulación	Industria	Infraestructura	Políticas y Regulación
Materias primas	débil	intermedio	fuerte	fuerte	fuerte	intermedio
Fabricación de componentes de celdas	intermedio	intermedio	fuerte	débil	débil	débil
Fabricación de celdas	intermedio	intermedio	intermedio	débil	débil	débil
Fabricación de packs	fuerte	fuerte	fuerte	intermedio	intermedio	débil
Fabricación de vehículos eléctricos	fuerte	fuerte	fuerte	intermedio	intermedio	débil
Re-uso en segunda vida	intermedio	intermedio	débil	intermedio	intermedio	débil
Reciclado	fuerte	fuerte	fuerte	débil	débil	débil

Fuente: Elaboración propia en base a Hill et al, 2019 para resultados de la Unión Europea.

Nota: Fuerte indica fortalezas clave que las futuras políticas y regulaciones deben continuar apoyando. Intermedio indica áreas en desarrollo y oportunidades que deberían ser monitoreadas y estimuladas. Débil indica debilidades y restricciones que nuevas políticas y regulaciones deben tratar.

Un análisis similar para cada país dentro la región podría mostrar algunas diferencias en el avance de fabricación de algunos modelos de vehículos eléctricos, sobre todo los livianos, y de sus packs, pero en general comparten la situación de debilidad en la producción de las celdas y sus componentes.

Dado el desarrollo y tamaño actual de los mercados internos de vehículos eléctricos en América Latina, es previsible que esta región no logre desarrollar, en lo que queda de esta década, una producción propia de baterías al nivel de celdas, que constituya la demanda natural de los materiales recuperados de baterías en desuso. Salvo que se diseñen programas muy consecuentes de exportación de baterías, que cuenten con las cuantiosas inversiones (en el orden de miles de millones de dólares) requeridas, y se logre una competitividad de clase mundial, en el caso de instalar plantas para el recupero de materiales, su mercado destino estaría en la exportación o en otras industrias con valores de pureza menos exigentes. No se descarta la posibilidad de elevar el valor de los materiales

recuperados, con al menos el siguiente paso en la cadena de producción de baterías, esto es, la producción de materiales activos para electrodos (por ejemplo, LiFePO_4), con destino de exportación.

Los tamaños de las flotas de vehículos eléctricos, sobre todo de autos eléctricos en cada país de la región hoy por hoy se cuentan por centenas, y son prácticamente inexistentes aun las baterías de vehículos eléctricos grandes de pasajeros, utilitarios, buses en condiciones de ser retiradas. La evolución próxima dependerá de los planes concretos de electrificación del transporte, con los incentivos que se prevean, de cada país.

Al menos 3 países de la región, que son Chile, Uruguay y Colombia, cuentan con programas de electrificación del transporte público, así que es esperable que en unos años el conjunto de baterías retiradas de colectivos eléctricos sea una posible fuente de baterías para segunda vida y más adelante cuando se esa vida se agote, para el reciclaje de sus materiales.

Por otro lado, en el espacio de la movilidad liviana en América Latina, es posible constatar en el presente, un flujo creciente de packs de baterías gastadas, provenientes de bicicletas, monopatinos, motos, scooters, y demás vehículos eléctricos livianos. Estas baterías se acumulan año tras año en distintos talleres de reparaciones (cuando no son directamente desechados como residuos), esperando el momento en que se sepa qué hacer y cómo proceder con ellos.

Es por lo tanto relevante y prioritario que los distintos países de la región, a la par de formular normativas para la gestión de los packs de vehículos eléctricos más pesados y que constituyen una corriente más concentrada, ordenada y rastreable, se vayan dictando normativas sobre la gestión de estos otros tipos de packs de la movilidad liviana, siendo una corriente más distribuida y desordenada. Hasta el momento en muchos países este tipo de gestión es deficitaria, a menudo con el mismo destino que las pilas de uso doméstico, tratadas como residuos peligrosos y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. En el mejor de los casos estos residuos tienen una incipiente recolección selectiva y reciclado, o en el peor de los casos, terminando, lamentablemente, en los rellenos sanitarios.

La gestión integral ambientalmente adecuada de las baterías en desuso, y en particular de las baterías retiradas de la movilidad eléctrica, es la señal de un Estado moderno, que se preocupa por un medio ambiente saludable y una economía sostenible.

IV. La regulación de la gestión integral de baterías retiradas de vehículos eléctricos

En capítulos anteriores se pudo apreciar la gran diversidad de formatos de los packs de baterías de los vehículos eléctricos, lo que al presente está impidiendo la estandarización de los procesos de reutilización y reciclaje. La diversidad de los mercados de estos vehículos, en el sentido de sus volúmenes, de las tipologías de vehículos y sus baterías, de la existencia o no de industrias que puedan ser receptoras de las baterías para una segunda vida, o de los posibles materiales a recuperar, configuran otras dimensiones del problema de disponer de las baterías en una estrategia de economía circular.

Por otro lado, al momento de encarar una gestión ambientalmente adecuada de las baterías fuera de uso, pasan al primer plano el conjunto de normativas y regulaciones particulares de cada nivel, ya sea ciudad, provincia, país o región, y lo que estas normas permitan o exijan, siendo un factor decisivo en el éxito de la gestión. El ámbito de las regulaciones de residuos, enmarcadas dentro de las políticas más generales del cuidado ambiental, contempla desde la definición de los residuos (ya sean residuos comunes o peligrosos o especiales), la clasificación de las baterías por sus tipos y usos, las condiciones en que una batería en desuso deja de ser considerada un residuo para convertirse en material reutilizable o a reciclar, hasta las condiciones concretas de su tratamiento, las aprobaciones ambientales, y las responsabilidades de los actores involucrados.

El panorama de regulaciones para la gestión de residuos de baterías de vehículos eléctricos se complica por su solapamiento con el marco regulatorio previo de residuos de pilas y baterías en general, existiendo una gran diversidad de clases y usos, y por las diferencias de su consideración entre distintas jurisdicciones dentro de un mismo país. Es así como, en algunos países, por ejemplo en Estados Unidos de Norteamérica, ciertas ciudades o estados como California o Nueva York pueden tener regulaciones más avanzadas que las existentes a nivel nacional o regional.

A los efectos de establecer contenidos mínimos y recomendaciones que se deberían tener en cuenta para la formulación de los conjuntos de normas y políticas que permitan una gestión exitosa, con reglas claras, ambientalmente adecuada y enfocada a la economía circular, de las baterías retiradas de los vehículos eléctricos, se hará una breve revisión del estado y/o características de las mismas en algunas regiones o países de interés, resumiendo los principales instrumentos vigentes y actividades recientes.

A nivel de regiones se tomará como el ejemplo de regulación más evolucionada a la de la Unión Europea, y se resumirán los desafíos que afrontan y las medidas principales que están tomando. Cabe mencionar, empero, que las problemáticas que se discuten actualmente en la Unión Europea, respecto a la gestión de las baterías en desuso de la movilidad eléctrica, tendrán características distintas, en cuanto al destino plausible para dichas baterías, siendo que la industrialización de vehículos eléctricos y baterías en esta región está mucho más avanzada, respecto a la situación de otras regiones menos industrializadas, como América Latina.

En toda la discusión actual de reforma de regulaciones en la Unión Europea se evidencia un gran esfuerzo para que el destino objetivo de sus residuos sea la recuperación de materiales dirigida hacia la cadena de valor sustentable de las baterías, dentro de los mismos mercados internos (Hill, 2019).

Por otro lado, en América Latina, algunos países se encuentran más avanzados que otros en la gestión ambientalmente adecuada de los residuos en general. En particular, en lo que atañe la gestión de baterías de la electromovilidad, el tema recién está tomando impulso en toda la región. No se cuenta con una cadena propia de producción de las baterías en la región, apenas se identifican los primeros estadios extractivos en la minería de algunos de sus materiales, aunque algunos países tienen algunos planes incipientes de llegar a producir las celdas de litio (Obaya y Céspedes, 2021).

Esto constituye una diferencia de situaciones de partida entre las regiones mencionadas, que un sistema de gestión de baterías deberá considerar en cuanto a la plausibilidad de las medidas que ordena. El objetivo primordial de una gestión ambientalmente adecuada de los residuos de baterías debería ser, en primer lugar, evitar cualquier clase de pasivos ambientales y riesgos para la población, y en segundo lugar, tender al ideal de la economía circular, en la medida de lo factible y lo realizable.

Dada la enorme variabilidad de las regulaciones sobre baterías de vehículos eléctricos, éstas deberían contener reglas claras, exigencias y procedimientos razonables, dentro de lo que es plausible y realizable en un mercado particular. En caso de que sean demasiado exigentes, se corre el riesgo de dificultar el desarrollo de la movilidad sustentable.

Respecto a los requisitos exigibles de las baterías de los vehículos eléctricos en cuanto a diseño, seguridad, calidad e información, etcétera, sería conveniente encontrar un equilibrio progresivo entre los objetivos de más corto plazo de implementar una gestión ambientalmente adecuada de los residuos y al mismo tiempo, estimular el crecimiento de la movilidad sustentable. Además de lograr una economía circular como objetivo de más largo plazo, donde la reutilización y el reciclaje de las baterías se establezcan definitivamente en cada mercado.

Como se mencionó al referir al cuadro 14, la circularidad de la gestión de baterías retiradas de la movilidad eléctrica será influida por el grado de industrialización y avance de las cadenas de valor de las baterías en cada región. Allí se mostró un análisis resumido de fortalezas y debilidades de la Unión Europea en la cadena de valor de las baterías, adaptado de (Hill et al, 2019), con el agregado de un análisis análogo para la región de América Latina, que se encuentra evidentemente más atrasada en su desarrollo, tanto en los mercados de vehículos eléctricos, como en la fabricación de sus baterías. En base a ese panorama, a los efectos de tomar en cuenta diferencias específicas en las regulaciones de residuos de baterías, originadas en las distintas situaciones de industrialización de las cadenas de valor de baterías, se resume en el cuadro 15 algunos aspectos clave que configuran estas situaciones.

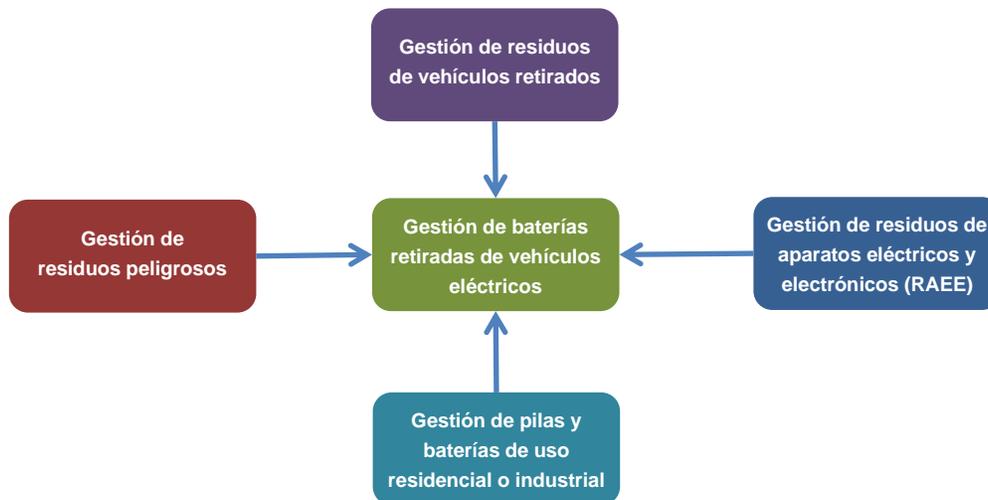
Cuadro 15
Diferentes aspectos que influyen en la gestión de baterías usadas

	Zona industrializada en vehículos eléctricos (Unión Europea, Estados Unidos de Norteamérica y China)	Zona no industrializada en vehículos eléctricos (América Latina, África, Medio Oriente)
¿Eliminar pasivos ambientales/ recolección y disposición ambientalmente adecuada?	Sí, prioritario	Sí, prioritario
Segunda vida y refabricación de packs ¿es plausible?	Sí, conveniente	Sí, conveniente
Reciclaje para recuperación de materiales, ¿es plausible?	Sí, prioridad de asegurar suministro de minerales críticos para la propia cadena de valor de baterías	Sí, con destino externo, u otras industrias. Son exportadores de materiales de minería primaria
¿Existen mega fábricas de celdas o de componentes? (como posibles receptores de materiales reciclados)	Sí, y una extensa ampliación de su capacidad ya planificada	No, salvo algunas plantas piloto, y no se nota una planificación de expansiones, ni inversiones
Destino plausible de materiales recuperados de reciclaje	Interno. Industria de baterías y otras industrias propias	Industria de baterías: Externo. Otras industrias: interno y externo

Fuente: Elaboración propia.

A menudo la gestión de los residuos de baterías de vehículos eléctricos es un caso particular dentro del contexto general de los sistemas de gestión de residuos, en el que puede haber solapamiento de varios ámbitos, y las consecuentes normativas para cada uno de ellos, como se esquematiza en el diagrama 10.

Diagrama 10
Ámbitos de la gestión de residuos que se relacionan con la gestión de las baterías de los vehículos eléctricos



Fuente: Elaboración propia.

En las formas modernas de gestión de residuos, en particular de los peligrosos y de las pilas y baterías, se ha ido adoptando el principio de responsabilidad extendida del productor, que enuncia de manera general la obligación que recae sobre el productor o importador o comercializador del bien que implicará un residuo, en las actividades de su recolección, disposición y/o reciclado (OECD, 2016).

Posiblemente el primer antecedente de un cuerpo normativo que aplicó un principio de responsabilidad extendida del productor respecto a la gestión pilas usadas fue el caso de Suiza, a fines de la década de los 80. En ese período se desarrollaron las directrices suizas sobre la gestión de residuos, que contenían objetivos específicos que más tarde se implementaron por medio de medidas estratégicas, en donde una de ellas era la aplicación del principio “el que contamina paga”. Al mismo

tiempo, los productores de pilas se unieron de forma voluntaria con el fin de recuperar las pilas, pagando una tarifa anticipada. En paralelo, en 1999, el gobierno suizo elaboró una ordenanza de tarifas anticipadas obligatorias para asegurar la recolección y tratamiento de las pilas, que se calculaban en relación con el peso de cada pila o acumulador (WSP Ambiental y RIGK Chile, 2020).

Las tarifas anticipadas obligatorias son exigidas por la Oficina Federal para el Ambiente (FOEN) a los fabricantes e importadores en base al volumen de productos puestos en el mercado que, tras ser utilizados por un gran número de portadores, se convierten en residuos y deben recibir un tratamiento especial o ser aptos para su recuperación. Así, aquellos fabricantes o importadores deben prepagar una tasa de eliminación a una organización privada designada y supervisada por la FOEN. Esta tasa se utiliza para financiar la eliminación de los residuos por parte de particulares o empresas públicas (WSP Ambiental y RIGK Chile, 2020).

Algo similar ocurre en Japón con el *Japan Portable Rechargeable Battery Recycle Center* (JBRC), desde los años 2000, a partir de la ley de promoción de la utilización efectiva de los recursos (*Promotion of the Effective Utilization of Resources*). Dicha ley ordena la identificación de las baterías reciclables en la etapa de fabricación indicando tipo de batería y los principales tipos de componentes metales primarios. Se establece un objetivo de reciclaje del 30% para baterías de litio y estimula que los fabricantes e importadores tengan un sistema de recuperación para los residuos. La Asociación de Baterías de Japón (*Battery Association of Japan*) provee recolección y reciclaje de baterías recargables portables a través del país bajo el JBRC (Roselló, 2020; Tasaki, 2014; Terazono, 2015).

Los sistemas de gestión de baterías usadas que se implementan en cada país pueden ser complejos, y suelen involucrar la participación de algún órgano central de coordinación y ejecución, como el *GRS Batterien* en Alemania. En este trabajo no es el objetivo describir en profundidad tales sistemas de gestión, sino mostrar las particularidades técnicas de las baterías de los vehículos eléctricos que afectarán a las posibles regulaciones de su gestión, con vistas a una estrategia de economía circular.

A. Las clasificaciones de los residuos de baterías

Existe una enorme disparidad de clasificaciones de baterías como residuos en distintas partes del mundo, incluso con cierto grado de solapamiento. Estas clasificaciones son según el sector de su uso: residencial, industrial, movilidad; por su aplicación: portátiles, automotrices, movilidad eléctrica, acumulación estacionaria, etc.; por sus químicas (Pb-ácido, Ni-Cd, Ni-MH, LIB, etc.); por su tipo: primarias, secundarias, recargables; y según su peso, por ejemplo, 2 a 5 kg, y su capacidad, por ejemplo, 2 kWh, etc. Aquí cabe simplemente mencionar algunos tratamientos de ejemplo, como el Estados Unidos de Norteamérica, de la Unión Europea, y Japón, así como mencionar la actividad e información de algunas asociaciones civiles como Call2Recycle o RethinkWaste, o la Asociación de Baterías de Japón, de donde se pueden extraer datos más completos sobre este tema. A continuación, se sigue parcialmente el reporte de Roselló (2020) y algunas citas allí referidas.

La Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea define las pilas, acumuladores y baterías, en tres categorías. El enfoque de estas categorías considera tanto el mercado de automoción, mercado industrial y posconsumo domiciliario. Las categorías son las siguientes:

- i) Baterías de automoción: aquellas que se destinan al arranque, encendido o alumbrado de vehículos, sea cual sea su tecnología (ejemplo: baterías de Pb-Ácido).

- ii) Baterías industriales: incluyen las pilas y acumuladores empleados para el suministro de electricidad de emergencia; las pilas y acumuladores empleados en trenes o aviones y las pilas y acumuladores empleados para usos exclusivamente profesionales, y las pilas y acumuladores empleados en relación con paneles solares, fotovoltaicos y demás aplicaciones de energía renovable. Incluyen también las pilas y acumuladores empleados en vehículos eléctricos, tales como coches eléctricos, sillas de ruedas, bicicletas, vehículos de aeropuerto y vehículos de transporte automático.
- iii) Pilas y acumuladores portátiles: pilas selladas que cualquier persona pueda llevar en la mano sin dificultad y que no sean ni pilas o acumuladores de automoción ni pilas o acumuladores industriales. Incluyen las pilas de única celda (tales como AA y AAA) y las pilas y acumuladores empleados por consumidores o profesionales en teléfonos móviles, ordenadores portátiles, herramientas eléctricas inalámbricas, juguetes y electrodomésticos tales como cepillos de dientes, máquinas de afeitar y aspiradoras manuales (con inclusión de los equipos similares empleados en escuelas, tiendas, restaurantes, aeropuertos, oficinas u hospitales) y toda pila o acumulador que los consumidores puedan emplear en electrodomésticos habituales.

En síntesis, para la Directiva 2006/66/CE de la Unión Europea como bloque, las baterías de los vehículos eléctricos, incluyendo los livianos, son consideradas baterías industriales. En países de otras regiones puede haber definiciones complementarias o distintas sobre las baterías de los vehículos eléctricos.

Más allá de las particularidades del tratamiento que se les da a los residuos de las baterías de vehículos eléctricos en distintas jurisdicciones, debe quedar claro que son residuos peligrosos, que comportan riesgos de incendio y de contaminación, y cuyo manejo, en particular en las etapas de recolección y acopio o preparación para transporte, debe hacerse con normas y precauciones específicas. En las últimas secciones de este capítulo y el que sigue se darán recomendaciones básicas al respecto de su manejo orientadas a formular sistemas de gestión integral de baterías en desuso de los vehículos eléctricos.

B. Algunos ejemplos de situaciones regulatorias de baterías

El extenso universo de regulaciones de pilas y baterías, que pueden o no incluir a las baterías de los vehículos eléctricos, al menos de los livianos puede ser más complejo que lo necesario para el alcance de este trabajo. Por lo que se mantendrá la exposición al nivel de una lista de hitos comentados, que de ninguna manera pretende ser exhaustiva, sino ejemplificadora, sobre todo en el caso de la Unión Europea.

1. Estados Unidos de Norteamérica

A nivel nacional existe la ley de baterías recargables y que contienen mercurio (*Mercury-Containing and Rechargeable Battery Act* (1996)). La ley federal requiere con ciertas excepciones, que las baterías usadas de níquel-cadmio (Ni-Cd) y plomo (Pb) se manejen como desechos universales. La norma universal de residuos prohíbe a los manipuladores y/o contratistas deshacerse de las baterías de Ni-Cd y Pb de desecho y además indica que estas baterías deben enviarse para su reciclaje. Fue sancionada con el propósito de eliminar el uso de mercurio en las baterías, así como permitir la recolección y el reciclaje de las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) usadas, las baterías pequeñas de plomo-ácido selladas (SSLA) y otras baterías reguladas. Por la época, no menciona a las baterías de litio y tampoco existe una ley más actualizada a nivel nacional sobre el tema, aunque sí hay normativas a nivel de los Estados.

Las baterías de litio están reguladas como sustancias peligrosas en el Código de Regulaciones Federales, título 49, parágrafos 173.185 y 175.10, que establecen una gran cantidad de requisitos para su

tratamiento y su transporte⁶¹. Adhiere a las definiciones de la sección 38.3 del Manual de Pruebas y Criterios de UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), que es una referencia estándar en lo que hace a las definiciones tratamiento de mercancías peligrosas para su transporte, entre ellas el apartado 38.3 especifica los procedimientos que han de seguirse para la clasificación de las pilas y baterías de litio metálico y de iones de litio (ONU, 2019).

La ley de reciclaje de baterías y minerales críticos (*Battery and Critical Mineral Recycling Act*) fue pasada al Senado en mayo de 2021 por el Senador Angus King, y tiene como objetivo disminuir la dependencia de Estados Unidos de Norteamérica de las importaciones de minerales críticos que son cruciales para la tecnología de energía limpia. Sin embargo, al momento no fue aprobada, y tiene poca oportunidad de serlo⁶², habiéndose incorporado parte de sus previsiones en la reciente ley de inversiones de infraestructura y empleos (H.R.3684, *Infrastructure Investment and Jobs Act*) firmada por el presidente Biden en noviembre de 2021, y que es una ley marco estableciendo definiciones y partidas presupuestarias para una gran cantidad de asuntos distintos⁶³.

En las secciones 40207 de procesamiento y fabricación de baterías, y 40208 del programa de reciclaje y aplicaciones de segunda vida para baterías de vehículos de motor eléctrico se establecen una gran cantidad de definiciones sobre los términos relacionados, a los materiales para baterías, minerales críticos, segunda vida y reciclaje de baterías, entre muchos otros. Además, se establecen compromisos para crear programas con financiamiento explícito en la ley, estableciendo los plazos en los que las autoridades de aplicación deberán generar esos programas.

La organización sin fines de lucro Call2Recycle fue fundada en 1994 por el conjunto de actores de la industria de baterías para abordar el tratamiento de la legislación basada en el principio de responsabilidad extendida del productor. En su página web se puede ver un mapa del estado de regulaciones de residuos de baterías en los distintos estados del país (Call2Recycle)⁶⁴.

En California, desde 2006 se prohíbe la eliminación de desechos sólidos de las baterías recargables, incluyendo NiCd, Ni-MH, LIB, y Pb-ácido selladas, debido al contenido de materiales peligrosos. RethinkWaste es una organización local del condado de San Mateo, involucrada en recolección y reciclaje de baterías, a través de su centro ambiental de Shoreway, y que publica información muy importante y en forma didáctica a la población sobre el tratamiento de baterías (RethinkWaste, web)⁶⁵.

En el Estado de Nueva York, se sancionó en 2010 la Ley de Baterías Recargables, la que incluye la prohibición de desechar baterías recargables (incluyendo Ni-Cd, Ni-MH, LIB, Pb-ácido, y cualquier otra batería o paquete de baterías recargable de menos de 11 kg). La ley requiere que los fabricantes de baterías recargables cubiertas que comercializan en el Estado de Nueva York recolecten y reciclen las baterías recargables a través de un programa financiado por el fabricante sin costo para los consumidores (DEC, web). Los consumidores del estado de Nueva York pueden devolver las baterías recargables a los minoristas que las venden para su manejo y reciclaje adecuados al final de su vida útil.

Aparte de la situación regulatoria en el país, es de mencionar la actividad de la Asociación de Baterías Recargables Portátiles (PRBA por sus siglas en inglés), que representa a la industria de las baterías portátiles, y desde los años 90 trabaja en programas de reciclaje y estandarización. Entre otras acciones, en 2010 y 2011 esta Asociación⁶⁶ organizó una coalición de fabricantes de baterías de consumo y productos que funcionan con baterías, aerolíneas y otros intereses comerciales, e intervino en una

⁶¹ Para más información véase <https://www.prba.org/areas-of-focus/regulations-and-standards/federal/>.

⁶² Para más información véase <https://www.govtrack.us/congress/bills/117/s1918>.

⁶³ Para más información véase <https://www.govtrack.us/congress/bills/117/hr3684>.

⁶⁴ Para más información véase <https://www.call2recycle.org/recycling-laws-by-state/>.

⁶⁵ Para más información véase <https://www.rethinkwaste.org/>.

⁶⁶ Para más información sobre centros de reciclaje y las regulaciones y estándares federales y estatales véase <https://www.prba.org/>.

normativa del Departamento de Transporte sobre baterías de litio. También logró asegurar una disposición en la Ley de Reforma y Modernización de la Autoridad Federal de la Aviación de 2012 firmada por el presidente Obama en 2012 que garantiza que las regulaciones de transporte de materiales peligrosos de baterías de litio de Estados Unidos de Norteamérica para el transporte aéreo estén armonizadas con los estándares internacionales. La armonización de las reglamentaciones sobre materiales peligrosos en este país mejora el comercio y minimiza los costos y otras cargas del cumplimiento de reglamentaciones de transporte múltiples o inconsistentes.

2. Unión Europea

Se le dedicará la mayor atención al caso europeo por ser el más evolucionado en información, el más transformacional en sus metas enfocadas a la economía circular y la neutralidad en carbono, y el más complejo por su alcance geográfico. La evolución normativa de pilas y acumuladores en el espacio de la Unión Europea⁶⁷. (entonces la Comunidad Económica Europea) tiene su comienzo en 1991 con la directiva 91/157/CEE, la cual tuvo por objeto consensuar las legislaciones de los estados miembros sobre la valorización y eliminación controlada de productos que contengan pilas y sustancias peligrosas. Hacia 1993, los países miembros de la Unión Europea tuvieron su primera prohibición de comercialización de pilas alcalinas de manganeso (Mn) destinadas a la utilización prologada en condiciones extremas (bajo 0 °C o encima de 50 °C) y todas las otras pilas alcalinas con contenido de mercurio (Hg) superior al 0,0025% en peso, exceptuando las pilas de tipo botón y compuestas. Dicha directiva fue la primera en establecer requisitos mínimos de etiquetado que permitiera distinguir a las pilas del resto de los residuos, indicando su recolección por separado, reciclaje en caso de factibilidad, y contenido de metales pesados. A su vez, la Directiva posibilitó el desarrollo de programas para la reducción de metales pesados, el fomento de la comercialización de pilas con menor contenido de materias peligrosas, y la obligación, de parte del consumidor, de la eliminación de las pilas por separado (WSP Ambiental y RIGK Chile, 2020).

Luego de la entrada en vigor de la Directiva 91/157/CEE, los países de la Unión Europea fueron fundando sus principales sistemas de gestión, por ejemplo, en Alemania, en 1998 GRS Batterien; en España, en 2000 Ecopilas; en Bélgica en 1995, BEBAT y comenzaron con la implementación y ajuste de la operación de sus sistemas. No hubo una actualización relevante en el contexto de pilas, acumuladores y/o baterías a nivel general de la Unión Europea (WSP Ambiental y RIGK Chile, 2020), hasta 2006 en que entra en vigor la Directiva 2006/66/EC. A partir de allí otras normativas y reglamentos sobre pilas y acumuladores en Europa se han ido sucediendo, con enmiendas y complementos de la directiva 2006/66/EC.

Actualmente hay varias directivas del Parlamento Europeo y del Consejo sobre residuos que atañen directa o indirectamente al manejo de baterías de vehículos eléctricos, y que orientan su gestión hacia las metas del Plan de Acción de Economía Circular, en el marco del Pacto Verde Europeo: Baterías sostenibles para una economía circular y climáticamente neutra⁶⁸ del que se reproduce el siguiente extracto:

“La Comisión Europea propone hoy modernizar la legislación de la Unión Europea sobre baterías, y presenta su primera iniciativa de las acciones anunciadas dentro del Plan de Acción para la Economía Circular⁶⁹. Unas baterías que sean más sostenibles a lo largo de todo su ciclo de vida resultan clave para los objetivos del Pacto Verde Europeo ⁷⁰] y para contribuir a alcanzar el objetivo de contaminación cero. Estas baterías promueven la sostenibilidad competitiva y son necesarias para el transporte ecológico,

⁶⁷ El sitio primario de información en línea sobre la regulación de los residuos de baterías y acumuladores en esta región es el siguiente https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en.

⁶⁸ Para más información véase https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2312.

⁶⁹ Para más información véase https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_420.

⁷⁰ Para más información véase https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es.

para la energía limpia y para lograr la neutralidad climática de aquí a 2050. La propuesta aborda las cuestiones sociales, económicas y medioambientales relacionadas con todos los tipos de baterías.

Las baterías comercializadas en la Unión Europea deben ser sostenibles, de alto rendimiento y seguras a lo largo de todo su ciclo de vida. Esto se traduce en baterías producidas con el menor impacto medioambiental posible, utilizando materiales obtenidos con pleno respeto de los derechos humanos y de las normas sociales y ecológicas. Las baterías deben ser duraderas y seguras y, al final de su vida útil, reutilizarse, remanufacturarse o reciclarse, de forma que los materiales valiosos se reincorporen a la economía.

[...] A partir del 1 de julio de 2024, solo podrán comercializarse las baterías de vehículos eléctricos e industriales recargables que cuenten con una declaración de huella de carbono.

Para cerrar el círculo y mantener los materiales valiosos utilizados en las baterías durante el mayor tiempo posible en la economía europea, la Comisión propone establecer nuevos requisitos y objetivos sobre el contenido de materiales reciclados y la recolección, el tratamiento y el reciclado de las baterías en la parte final de su vida útil. Con ello, se garantizaría que la economía no pierda las baterías industriales, de automóviles o de vehículos eléctricos una vez prestado su servicio.

Para mejorar significativamente la recogida y el reciclado de baterías portátiles, el porcentaje actual de recogida, equivalente al 45%, debería ascender al 65% en 2025 y al 70% en 2030, de forma que la economía no pierda los materiales de las baterías que utilizamos en los hogares. Otras baterías (las industriales, de automóviles o de vehículos eléctricos) deben recogerse íntegramente. Deben reciclarse todas las baterías recogidas y alcanzarse altos niveles de recuperación, en particular de materiales valiosos como el cobalto, el litio, el níquel y el plomo.

El Reglamento propuesto establece un marco que facilitará la reutilización de las baterías de los vehículos eléctricos para que puedan tener una segunda vida, por ejemplo, como sistemas fijos de almacenamiento de energía o como parte de la red eléctrica como recurso energético.

El uso de nuevas tecnologías de la información, como el pasaporte para baterías y el espacio de datos asociado, será fundamental para un intercambio de datos seguro, una mayor transparencia en el mercado de las baterías y la trazabilidad de las baterías de gran tamaño a lo largo de su ciclo de vida. Permitirá a los fabricantes desarrollar productos y servicios innovadores como parte de la doble transición ecológica y digital.

Mediante sus nuevas normas sobre la sostenibilidad de las baterías, la Comisión también promoverá a escala mundial la transición ecológica y establecerá un plan de acción para nuevas iniciativas en el marco de su política de productos sostenibles.”

La directiva 2006/66/EC sobre baterías y acumuladores y residuos de baterías y acumuladores, es el principal y único documento de legislación de la Unión Europea dedicado exclusivamente a baterías, por el que se deroga la anterior Directiva 91/157/CEE.

También la directiva 2012/19/UE, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), menciona su contenido de baterías.

Ambas directivas han sido modificadas por la directiva (UE)2018/849 del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que también se modifica la directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil.

La directiva (UE) 2018/849, por un lado, consolida el principio de jerarquía de residuos establecido en la directiva 2008/98/CE sobre los residuos, instando a la adopción de las medidas necesarias que permitan garantizar la aplicación práctica del orden de prioridades de la jerarquía de residuos. Por otro lado, establece que la comunicación fiable de datos relativos a la gestión de residuos es primordial para una aplicación eficiente de la normativa y para garantizar la comparabilidad de datos entre los estados

miembros, por lo que encomienda a éstos utilizar las normas más recientes desarrolladas por la Comisión y la metodología desarrollada por las correspondientes autoridades nacionales competentes responsables de la aplicación de dichas directivas.

Algunos elementos mencionables de la directiva 2006/66/EC son:

- La prohibición de ciertos metales en las baterías (Hg, Cd, Pb).
- El registro obligatorio del importador/fabricante de la batería.
- El etiquetado obligatorio y registro/marca de capacidad.
- El reporte obligatorio por el fabricante en cuanto a ventas, por química de batería.
- La responsabilidad del productor en la recolección. Se fija un objetivo de 45% en la tasa de recolección para 2016, que sería revisado por normativa posterior.
- La prohibición de la disposición o incineración de la batería.
- La obligación de reciclar todo tipo de baterías industriales y portátiles.
- Requerimientos mínimos para instalaciones de reciclaje en términos de: 1. Manejo de la instalación, 2. Eficiencia del proceso de reciclaje, con la finalidad de aumentar la tasa de materiales recuperados (75 % para Ni-Cd, 65% para Pb, 50 % para todas las otras baterías y acumuladores).

Otras medidas complementarias a la directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo:

- Decisión de la Comisión 2008/763/CE, establece una metodología común para el cálculo de las ventas anuales de pilas y acumuladores portátiles a los usuarios finales
- Decisión de la Comisión 2009/851/CE, establece un cuestionario para los informes de los Estados miembros sobre la aplicación de la directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre pilas, acumuladores y pilas usadas y acumuladores
- Reglamento (UE) 1103/2010 de la Comisión, se establecen normas relativas al etiquetado de la capacidad de los equipos portátiles secundarios (recargables) y baterías y acumuladores para automóviles
- Reglamento (UE) 493/2012 de la Comisión, se establecen normas detalladas relativas al cálculo del reciclado eficiencias de los procesos de reciclaje de pilas y acumuladores usados.

En 2019 se revisó el cumplimiento de la directiva 2006/66/EC, y los resultados de la evaluación se plasmaron en un informe de evaluación⁷¹ y en un reporte⁷² de la Comisión al Parlamento y el Consejo (9/4/2019), de donde surge que no se llegó a cumplir la tasa de recolección del 45 % en el 2016 salvo en algunos estados miembro. Muchas de las baterías terminaban en la corriente equivocada de residuos, por ejemplo, residuo municipal. No obstante, la mayoría de las baterías se destinaba al reciclaje. Se evaluó también la efectividad (grado de cumplimiento de objetivos) y la eficiencia (costos y recursos) en la implementación de la Directiva. Como resultado de esas revisiones el 10 de diciembre de 2020 la Comisión presentó una propuesta de reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a las baterías y residuos de baterías, por el que se deroga la directiva 2006/66/CE y se enmienda el Reglamento (UE) 2019/1020 (European Commission, 2020).

⁷¹ Para más información véase https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/evaluation_report_batteries_directive.pdf.

⁷² Para más información véase https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/report_implementation_batteries_directive.pdf.

El reglamento UE 2019/1020⁷³, puesto en vigencia en 16/07/2021, es un reglamento que introduce restricciones relativas a la vigilancia del mercado y la conformidad de los productos, fortaleciendo la estructura regulatoria de aceptación de productos dentro del espacio de la UE, definiendo “productos sustentables”, afectando también a las baterías que se comercializan en la Unión Europea⁷⁴.

La propuesta de 2020 intenta modificar la directiva 2006/66/CE para asegurar que el marco legal de baterías de la Unión Europea regula efectivamente todo el ciclo de vida de las baterías, desde el origen hasta su reciclaje, en respuesta al Plan de Economía Circular, y como parte del “Plan Estratégico de Acción de Baterías”, publicado en mayo de 2018. Esta propuesta contiene una variedad de requisitos y restricciones para minimizar el impacto ambiental de las baterías. Promueve un uso más eficiente de los recursos elevando las tasas de recolección y reciclaje de baterías portátiles, enfocándose en recuperar cobalto, litio, níquel y plomo de todas las baterías recicladas. Los fabricantes también deberán proporcionar información sobre la cantidad de contenido reciclado en las baterías, y el proceso seguirá una metodología armonizada (cuyos detalles a diciembre de 2021 no estaban disponibles) (UOL, 14/12/2021).

La propuesta también detalla las restricciones sobre el uso de sustancias peligrosas en las baterías, específicamente mercurio y cadmio, así como los requisitos de etiquetado para abordar la presencia de más del 0,002 % de cadmio o más del 0,004 % de plomo. A partir de julio de 2023, estos porcentajes generarán un marcado adicional con el símbolo químico del metal en cuestión: Cd o Pb.

El cronograma propuesto para implementar cambios adicionales a los requisitos para colocar baterías industriales y de vehículos eléctricos en el mercado de la Unión Europea, sin importar el país de origen es el siguiente:

- A partir de julio de 2024 se exigirá declaración de huella de carbono.
- Para enero de 2026, cada batería industrial y batería de vehículo eléctrico con una capacidad superior a 2 kWh tendrá un “pasaporte de batería” individual vinculado a la información sobre las características de cada tipo y modelo de batería, proporcionando datos valiosos para los recicladores y empresas de segunda vida. Un Sistema de Intercambio Electrónico (EES) en forma de una base de datos de baterías en línea que enumera información detallada sobre todos los fabricantes de baterías y sus tipos de baterías colocados en el mercado puede complementar el pasaporte.
- A partir de enero de 2026, estas baterías deben presentar una etiqueta de clase de rendimiento de intensidad de carbono (detalles por anunciar).
- A partir de enero de 2027, las baterías de vehículos industriales y eléctricos con almacenamiento interno deberán declarar su contenido de Co, Pb, Li y Ni reciclados.
- A partir de julio de 2027 deberán cumplir unos umbrales máximos de carbono aún por definir.
- A partir de enero de 2030, estas baterías deberán cumplir con los umbrales mínimos de contenido reciclado (12% de Co, 85% de Pb, 4% de Li y 4% de Ni).
- A partir de enero de 2035, estos umbrales aumentarán aún más (20% de Co, 85% de Pb, 10% de Li, 12% de Ni).

Todos los operadores económicos que comercializan baterías, incluidos los fabricantes de baterías, los importadores, los distribuidores, los representantes autorizados y los proveedores de servicios logísticos, son responsables de garantizar el cumplimiento del reglamento. A través de esta

⁷³ Para un resumen del reglamento véase <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/LSU/?uri=CELEX%3A32019R1020> y para el reglamento completo véase <https://www.boe.es/doue/2019/169/L00001-00044.pdf>.

⁷⁴ Para más información véase <https://www.redeweb.com/articulos/el-nuevo-reglamento-2019-1020/>.

nueva propuesta, que entrará en vigor con la publicación del documento legal final, el mercado de las baterías será más transparente. Facilitará el desarrollo de productos innovadores y una transición más fluida hacia una economía más sostenible a través de la trazabilidad de las baterías a lo largo de su ciclo de vida (UOL, 14/12/2021).

La más notoria y reciente de las actividades regulatorias sobre las baterías y sus residuos se está produciendo actualmente en el seno del Parlamento Europeo, cuya Comisión de Medio Ambiente publicó en febrero 2022 un reporte⁷⁵ sobre la propuesta de 2020. Se considera a este evento importante, porque está afectando al proceso legislativo que sigue la propuesta. Se cita a continuación un extracto de una nota periodística reciente (Residuos Profesional, 2022), con algunas modificaciones propias entre corchetes (no es literal).

La Comisión de Medio Ambiente adoptó el 10/02/2022 una nueva posición sobre las normas propuestas para regular todo el ciclo de vida de las baterías, desde su diseño hasta el final de su vida útil a partir de la Propuesta 2020. Los eurodiputados mostraron acuerdo con el planteamiento de la Comisión de revisar la legislación actual para tener en cuenta los avances tecnológicos y modificaron las disposiciones en varios ámbitos, incluida la introducción de una nueva categoría de baterías para medios de transporte ligeros, como las bicicletas eléctricas. Además, respaldaron las normas propuestas sobre una declaración y etiqueta de la huella de carbono, un valor máximo para la huella de carbono del ciclo de vida, así como niveles mínimos de cobalto, plomo, litio y níquel recuperados de los residuos para su reutilización en nuevas baterías.

Para 2024, las baterías portátiles de los electrodomésticos, como los teléfonos inteligentes, y las baterías para medios de transporte ligeros (LMT) deberán estar diseñadas para que los consumidores o los operadores independientes puedan retirarlas y sustituirlas de forma fácil y segura.

En el informe, los eurodiputados piden objetivos de recogida más estrictos para las baterías portátiles (70% para 2025, frente a la propuesta original de la Comisión del 65%; y 80% para 2030 en lugar del 70%). También introducen unos índices mínimos de recogida para las baterías de medios de transporte ligeros (75% para 2025 y 85% para 2030). Todos los residuos de baterías de automóviles, industriales y de vehículos eléctricos deben ser recogidos.

Según la diputada Simona Bonafè indica que “Por primera vez en la legislación europea, el reglamento sobre las baterías establece un conjunto integral de normas para regular todo el ciclo de vida del producto, desde la fase de diseño hasta el final de su vida útil. Esto crea un nuevo enfoque para impulsar la circularidad de las baterías e introduce nuevas normas de sostenibilidad que podrían convertirse en una referencia para todo el mercado mundial de las baterías[...] Para alcanzar los objetivos del Pacto Verde y atraer inversiones, los colegisladores deben avanzar hacia una rápida adopción de normas y plazos claros y ambiciosos” (Residuos Profesional, 2022).

Se espera que el informe sea aprobado por el pleno en marzo y constituirá la posición negociadora del Parlamento con los gobiernos de la Unión Europea sobre la forma final de la legislación.

La Asociación Europea de Gestores de Residuos (FEAD) ha emitido un comunicado en el que celebra que los contenidos reciclados obligatorios, como propuso inicialmente la Comisión Europea, se mantengan sin cambios. En su documento de posición⁷⁶, la organización afirma que el contenido reciclado obligatorio es una señal de mercado crucial para crear una fuerte demanda de reciclados y desencadenará inversiones en nuevas tecnologías e infraestructura de reciclaje. En consecuencia, los usuarios de reciclado se beneficiarían de capacidades de suministro a largo plazo. También reduciría la dependencia de Europa de materias primas de terceros países, evitaría posibles situaciones de escasez

⁷⁵ Para más información véase https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2022-0031_EN.html.

⁷⁶ Para más información véase <https://fead.be/position/mandatory-recycled-content-for-batteries/>.

en el futuro, diversificaría el suministro tanto de fuentes primarias como secundarias, y mejoraría la eficiencia de los recursos y la economía circular.

No obstante, la FEAD ha expresado su preocupación por el aumento significativo de los niveles de recuperación de material para el litio (del 35% al 70% en 2026; del 70% al 90% en 2030) exigidos en el anexo XII, parte C del nuevo reglamento.

Peter Kurth, presidente de FEAD, asegura que “la recuperación material debe establecerse de manera realista y aumentarse progresivamente. Los niveles adoptados hoy para el litio generan preocupación dentro de nuestra industria, ya que las tecnologías necesarias no estarán en el mercado antes de 2025. Una tasa de recuperación del 90% en 2030 será problemática. Instamos al legislador de la UE a establecer plazos y objetivos más realistas, que puedan coincidir con el despliegue de nuevas tecnologías e inversiones” (Residuos Profesional, 2022).

No está claro aún qué forma final tendrá la propuesta 2020 que sigue un proceso vivo de enmiendas, opiniones y consensos. Lo que queda claro es que es muy compleja la combinación de aspectos que debe abarcar, siendo que las baterías son el nodo central de una red de dependencias. Estas van desde los planes estratégicos de la Unión Europea para posicionarse en la fabricación del componente clave de los vehículos eléctricos, pasando por las metas ambientales, la protección al consumidor⁷⁷ y a los mercados internos en relación a las posibilidades de exigir huella de carbono y producto sostenible a las baterías que están importando, principalmente de Asia, la circularidad de los materiales críticos que Europa no posee, la gestión de los residuos que contienen metales peligrosos, las reacciones de las entidades del sector de gestión de residuos y del reciclaje, las tecnologías disponibles y sus avances previsibles, entre otros.

3. Lista europea de residuos

Por un lado, las baterías están clasificadas, pero también como residuos tienen una clasificación. La clasificación de los residuos se basa en la lista europea de residuos (Decisión 2000/532/CE de la Comisión-versión consolidada) y el anexo III de la Directiva 2008/98/CE. La lista de residuos (LoW, *list of wastes* por sus siglas en inglés) proporciona una terminología común a nivel de la Unión Europea para la clasificación de residuos para facilitar la gestión de residuos, incluso para residuos peligrosos.

La asignación de códigos LoW sirve en una amplia variedad de actividades, incluido el transporte de desechos, permisos de instalación (que a menudo también se refieren a códigos de desechos específicos) o como base para las estadísticas de desechos. Según la Decisión 2000/532/CE, la lista de residuos debe revisarse periódicamente sobre la base de nuevos conocimientos y, en particular, de los resultados de la investigación. La última modificación es la decisión de la Comisión 2014/955/UE, que siguió a un estudio específico sobre la revisión de la lista de residuos europeo (Roselló, 2020).

⁷⁷ Parte de los aportes y enmiendas a la Propuesta vinieron del Comité de Mercado Interno y Protección al Consumidor. Véase el artículo “OPINION on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020 - PE695.236v02-00” en línea en <https://euagenda.eu/news/629494>.

4. España

Recién en 2021 en España se modifica la legislación para adaptarla a los nuevos desarrollos de la Unión Europea en materia de residuos de los nuevos tipos de baterías, mediante el real decreto 27/2021.

La directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y por la que se deroga la directiva 91/157/CEE, fue incorporada a la legislación española mediante el real decreto (RD) 106/2008, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos.

Por su parte, la directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos ha sido transpuesta a la legislación española por el real decreto 110/2015, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, el cual, desarrollaba la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, en la materia.

Ambas directivas fueron modificadas por la directiva (UE) 2018/849, por la que también se modifican la directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil. Esta directiva consolida el principio de jerarquía de residuos establecido en la directiva 2008/98/CE, instando a la adopción de las medidas necesarias que permitan garantizar la aplicación práctica del orden de prioridades de la jerarquía de residuos. Por otro lado, la directiva (UE) 2018/849, establece que la comunicación fiable de datos relativos a la gestión de residuos es primordial para una aplicación eficiente de la normativa y para garantizar la comparabilidad de datos entre los estados miembros, por lo que encomienda a éstos utilizar las normas más recientes desarrolladas por la Comisión y la metodología desarrollada por las correspondientes autoridades nacionales competentes, responsables de la aplicación de dichas directivas.

Entonces, el real decreto de 27/2021 tiene por objeto modificar el RD 106/2008 y el RD 110/2015, con el fin de incorporar a la legislación española la directiva (UE) 2018/849, y velar por el principio de precaución y prevención en la gestión de los residuos de pilas, acumuladores y baterías y de aparatos eléctricos y electrónicos. Además, se pretende una mejora en la gestión de los residuos de pilas y acumuladores y de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos estableciendo normas más claras que incrementen el nivel de seguridad jurídica.

En el apartado 1, del RD 27/2021 introduce nuevos códigos a la lista europea de residuos (LER) para la identificación de residuos de pilas, acumuladores y baterías considerados peligrosos. Se trata de una codificación propia de ámbito estatal cuyo objeto es que no se puedan diluir en la categoría genérica de "otras pilas y acumuladores" unos residuos que deben distinguirse, por su peculiaridad y características, en su recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento. Esta previsión se completa con un anexo V en el que se detallan dichos códigos.

Las baterías de litio utilizadas en movilidad eléctrica están consideradas residuos peligrosos. Su gestión está regulada en el real decreto 27/2021, que traspone la directiva europea al respecto y menciona directamente la peligrosidad de este material (BOE, 2021). También es el caso de las baterías de ion de litio de móviles y tabletas, que pueden llegar a generar incendios. Son enviadas a las mismas plantas de fuera de España, particularmente hacia Alemania, Francia y Bélgica, pero son los ciudadanos quienes deben cooperar con la gestión de su recolección, y depositar los dispositivos en un punto limpio previsto para tal fin.

5. China, ¿incentivos al reciclaje de baterías necesarios?

La República Popular de China, contiene el mercado de baterías más grande del mundo, y a la vez, el mercado de reciclaje de baterías más grande del mundo, por lo que merece, una sección aparte. Las regulaciones son difíciles de encontrar en otro lenguaje que no sea chino y se debe apelar a artículos traducidos. Para una revisión de las regulaciones en China se consultó en particular los trabajos de Li et al. (2020), Bird et al. (2022)

y el artículo de Hampel (2022)⁷⁸. Los dos primeros autores coinciden en que las lecciones de los aciertos y errores en los distintos aspectos de las regulaciones en China pueden servir de caso de estudio, y proveer una hoja de ruta para las experiencias regulatorias de otros países en desarrollo.

Algunas de las regulaciones de gestión de residuos en China incluso afectan a las de otros países; por ejemplo, la "Nota sobre asuntos relacionados a la prohibición total de importaciones de residuos sólidos"⁷⁹, sancionada en 2017, limitó la importación de ciertas clases específicas de residuos; luego, en 2020 la prohibición se extendió a todos los tipos de residuos de otros países. Esta regla en la práctica implica que el reciclaje de baterías de litio en los demás países debe ser transferido de China a otras naciones con similares costos laborales, o bien, que los países se ven obligados a desarrollar sus capacidades de reciclaje locales. Los costos de transporte pueden ser una parte substancial de los costos de reciclaje, así que la regulación restrictiva de residuos sólidos de China en efecto provee razones para desarrollar el reciclaje de baterías de litio en otros países (Bird, 2022).

En este país, el uso de baterías en segunda vida se traduce como uso de cascada, gradiente o escalera, que también se refiere a la política china de "primero el uso más urgente". La escalera de la segunda vida en China indica principalmente usos de las baterías usadas en vehículos eléctricos livianos, más lentos, seguido de numerosas aplicaciones estacionarias de almacenamiento de energía. Aunque el término "segunda vida" es bien conocido fuera de China, hasta ahora los demás países no han utilizado esta escala de priorización de escalera (Hampel, 2022).

Según las estadísticas de la industria, el total de baterías eléctricas fuera de servicio de China alcanzó unas 200.000 toneladas en 2020, y la cifra aumentará a unas 780.000 toneladas en 2025 (Global Times, 2021)⁸⁰. Desde 2018, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información (MIIT, por su sigla en inglés) viene requiriendo que las empresas automotrices y de baterías construyan más de 10 000 centros de recolección y reciclaje en todo el país, cifra que fue superada en lo que va de 2022 (Hampel, 2022).

Desde 2018 comenzó la primera tanda de regulaciones de reciclaje de baterías de vehículos de nueva energía (NEV-*New Energy Vehicles*, como se los llama en China). Ese año el gobierno chino enumeró una lista inicial de cinco empresas de reciclaje reconocidas oficialmente para esa tarea, también hizo responsable a los fabricantes de automóviles⁸¹ por el reciclaje de las baterías de sus vehículos, y estipuló directivas para que los fabricantes de vehículos eléctricos asuman un papel más activo en el reciclaje de baterías. Se puso en funcionamiento una "Plataforma de gestión de la trazabilidad" para ayudar a supervisar y gestionar el proceso. Luego, en julio del mismo año, China seleccionó 17 ciudades y regiones para lanzar un programa piloto de reciclaje de baterías para los vehículos eléctricos usados. Actualmente, dos empresas importantes, Brunp y GEM, representan alrededor del 50% de todo el negocio oficial de reciclaje de baterías en China. La lista oficial de empresas de reciclaje ha crecido recientemente a un total de 47 empresas reconocidas. Brunp es una subsidiaria de CATL, que desde hace dos años logró escalar al primer puesto como mayor productor de baterías del mundo. En octubre del año 2021, CATL también anunció que construirá su propia planta de reciclaje (Hampel, 2022).

A la par de esto, en China ha surgido una multitud de negocios de reciclaje más pequeños, no oficiales y a menudo informales. Para las empresas que llevan las baterías a su reciclaje final, los pequeños recicladores suelen ser más baratos que las empresas de reciclaje autorizadas oficialmente. Para los usuarios de vehículos eléctricos, estos pequeños recicladores pagan más las baterías, desde que muchas veces se saltan los controles ambientales, y tienen costos menores. Estas empresas y talleres más pequeños no necesariamente recuperan todos los recursos valiosos, por ejemplo, el Co y el Ni, y a

⁷⁸ Para más información véase <https://www.electrive.com/2022/01/29/battery-reuse-recycling-expands-to-scale-in-china/>.

⁷⁹ En inglés, "Notice on Matters Related to the Total Ban on Solid Waste Import" http://www.xinhuanet.com/english/2020-11/27/c_139547665.htm.

⁸⁰ Para más información véase <https://www.globaltimes.cn/page/202106/1226776.shtml>.

⁸¹ Siguiendo el principio de responsabilidad extendida al productor del residuo.

menudo eliminan de manera inadecuada esos materiales a la vez preciosos y peligrosos para el medio ambiente. Por lo tanto, la tasa de recolección de los recicladores calificados es más baja, lo que eleva los costos de estos recicladores, y exagera la ya escasa viabilidad comercial de estas plantas. Finalmente, el reciclaje informal dificulta la conciencia de los usuarios acerca de la importancia ambiental del correcto tratamiento (Li et al, 2020).

Actualmente, las estimaciones de medios chinos informan que solo alrededor del 30% al 40% de los materiales de las baterías se reciclan. Al mismo tiempo, la tecnología existente en China, como informan tanto en empresas como en trabajos académicos, en teoría es capaz de recuperar más del 80% de los diferentes componentes de las baterías, lo que significa que las bajas tasas de recuperación actuales se deben más a la falta de estandarización de los sistemas, fallas en regulaciones, y vías informales de gestión, que a una inmadurez tecnológica. No obstante, como en el caso de las asociaciones público-privadas en otros países, mejorar la tecnología de reciclaje es uno de los grandes objetivos de las directivas del gobierno chino.

También en la primera ronda de directivas de 2018 el gobierno chino alentó los modelos comerciales de "internet + reciclaje", que implican una combinación de nuevos modelos de negocios en línea para la reutilización y el reciclaje combinados con servicios IoT, que incluyen elementos como software, IA y *big data*. Estos sistemas y modelos nuevos de negocios elevan la eficacia del flujo de materiales entre fabricantes, municipios, consumidores y empresas comercializadoras de baterías de segunda vida y materiales reciclados.

El cambio más significativo comenzó a mediados de 2021 cuando el gobierno chino publicó el 14° Plan Quinquenal 2021-2025 del país, centrado principalmente en las industrias de transporte eléctrico en todos los aspectos, desde energía y materias primas, hasta fabricación, reutilización y reciclaje en un plan de desarrollo de economía circular. Éste establece el objetivo de construir un sistema de reciclaje de baterías más completo hasta 2025. Durante los siguientes seis meses hasta las últimas directivas en diciembre de 2021, el gobierno chino ha establecido pautas para la transformación deseada, y reiteró la importancia de la innovación y el desarrollo de modelos comerciales de "internet + reciclaje" (Hampel, 2022).

Los gobiernos locales también han comenzado a promover el sector de reciclaje de baterías de vehículos de nueva energía. Por ejemplo, la provincia de Jiangsu ha establecido 907 centros de reciclaje de estas baterías y Shanghai ha iniciado un sistema de seguimiento y regulación del ciclo de vida completo para estas baterías.

En agosto de 2021, se enfocó la utilización secundaria de baterías de vehículos de nueva energía cuando el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información emitió la directiva denominada "Medidas de gestión para la utilización gradual de baterías de vehículos de nueva energía", entre otras. Estas directivas contemplan la colaboración entre los departamentos nacionales y regionales y las empresas y la industria con regulaciones que establecen las disposiciones para la trazabilidad y la responsabilidad de las industrias de segunda utilización en cascada o escalera, incluyendo vehículos eléctricos más lentos, energía de respaldo de radio-bases, acumulación de energías renovables, centros de carga de vehículos eléctricos, entre otras. Aquí, el gobierno chino se compromete a fomentar la adopción de modelos comerciales de arrendamiento (*leasing*), la utilización a gran escala de flotas y otros modelos que faciliten el reciclaje de las baterías al final de la vida útil.

Es de notar que el gobierno chino viene anticipándose ya desde 2012 al problema del tratamiento de residuos de la entonces incipiente industria de vehículos de nueva energía, que ocasionarían sus fuertes políticos de incentivos a la movilidad eléctrica, habiendo generado una serie de documentos y políticas para guiar y facilitar la recolección y el tratamiento de sus residuos. Entre ellas destacan una serie de estándares y códigos nacionales que fueron introducidos entre 2015 y 2020, que se resumen en el cuadro 16, según Li et al. (2020). Es posible que hasta 2022 hayan aparecido nuevos estándares, pero los más relevantes para la industria del reciclaje ya están contenidos entre los mencionados.

Cuadro 16
Estándares y códigos nacionales para el tratamiento de residuos de vehículos eléctricos

Fecha emisión	Estándares y códigos	Emisor
Mayo 2015	Lithium-ion traction battery pack and system for electric vehicles Part 1: Test specification for high power applications, GB/T 31467.1-2015 Part 2: Test specification for high energy applications, GB/T 31467.2-2015 Part 3: Safety requirements and test methods, GB/T 31467.3-2015	Standardisation Administration of China
Mayo 2015	Life cycle requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 31484-2015	Standardisation Administration of China
Mayo 2015	Safety requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 1485-2015	Standardisation Administration of China
Mayo 2015	Electrical performance requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 31486-2015	Standardisation Administration of China
Mayo 2017	Aluminium and aluminium alloys plates, sheets, and strips for cans and caps of new energy power batteries: GB/T 33824-2017	Standardisation Administration of China
Mayo 2017	Recycling of traction battery used in electric vehicle – Dismantling specification: GB/T 33598.2-2017	Standardisation Administration of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine
Julio 2017	Coding regulation for automotive traction battery: GB/T 34014-2017	Standardisation Administration of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine
Julio 2017	Dimension of traction battery for electric vehicles: GB/T 4013-2017	Standardisation Administration of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine
Julio 2017	Recycling of traction battery used in electric vehicle – Test of residual capacity: GB/T 34015-2017	Standardisation Administration of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine
Marzo 2020	Technical specifications of battery management system for electric vehicles: GB/T 38661-2020	Standardisation Administration of China, State Administration for Market Regulation
Marzo 2020	Recycling of traction battery used in electric vehicle Part 1: Packing and transporting, GB/T 38698.1-2020 Part 2: Materials recycling requirements, GB/T 33598.2-2020	Standardisation Administration of China, State Administration for Market Regulation
Marzo 2020	Recycling of traction battery used in electric vehicle – Echelon use Part 2: Removing requirements, GB/T 34015.2-2020	Standardisation Administration of China, State Administration for Market Regulation
Mayo 2020	Electric vehicles traction battery safety requirements: GB 38031-2020	Standardisation Administration of China, State Administration for Market Regulation

Fuente: Tomado de Li et al, (2020).

Nota: GB: Mandatorio, GB/T: Voluntario.

Las medidas provisionales para la gestión del reciclaje y utilización de baterías eléctricas de vehículos de nueva energía⁸², sancionadas en 2018 y revisadas en diciembre de 2021, consolidaron aún más las políticas y regulaciones existentes hasta ese momento para el tratamiento de desechos de baterías de vehículos eléctricos y proporcionaron un marco de política general para promover el tratamiento de desechos de baterías de vehículos eléctricos, compatible con la aspiración del país de electrificación del transporte.

Los aspectos clave de estas medidas provisionales son: 1) Los fabricantes de vehículos eléctricos son responsables del desperdicio de baterías de vehículos eléctricos y tratamiento, basado en el concepto de responsabilidad extendida del producto; 2) se alienta a los fabricantes de baterías a diseñar baterías de manera que sean fáciles de desmontar, y también se les exige que proporcionen a los fabricantes de vehículos eléctricos los detalles técnicos necesarios para el tratamiento de la batería al final de su vida útil; 3) se recomienda la aplicación en cascada o escalera de baterías vehículos eléctricos de desecho; y 4) el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información y otros departamentos

⁸² En inglés "Interim Measures for the Management of Recycling and Utilization of Power Batteries of New Energy Vehicles".

relevantes se hacen responsables de seguir avanzando en la estandarización del tratamiento de baterías de desecho y de implementar un sistema de información para regular este proceso (Li et al, 2020).

En diciembre de 2021, junto con otros departamentos relevantes, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información actualizó el plan de "Medidas Provisionales para la Gestión del Reciclaje y la Reutilización de Baterías de Energía de vehículos de nueva energía". Esto incluyó la implementación de la gestión de trazabilidad del ciclo de vida completo de las baterías e incluye proyectos piloto en Beijing, Tianjin, Hebei y otras 17 regiones, así como la participación de China Tower Company⁸³, así como directivas prioritarias de utilización en cascada para promover la cooperación interregional y la sinergia de la cadena industrial (Hampel, 2022).

Las deficiencias de las políticas existentes identificadas en el trabajo de Li et al, (2020) incluyen:

- falta de disposiciones claras para baterías históricas y huérfanas;
- ningún objetivo cuantificado para la recolección de baterías;
- definición poco clara del alcance de la autoridad entre varias agencias centrales y locales involucradas en la regulación del tratamiento de baterías descartadas;
- requisitos poco claros para la auditoría y verificación de datos para el seguimiento de todo el ciclo de vida de las baterías vehículos eléctricos;
- consideración limitada de los desafíos para asegurar la cooperación de las partes interesadas;
- falta de especificación explícita de los mecanismos para financiar el tratamiento de residuos de baterías.

Debido a estas fallas regulatorias, sumadas a la falta de estandarización general de las baterías de los vehículos eléctricos, en cuanto a formatos y químicas, los costos del reciclado de baterías, asumidos por los fabricantes de estos vehículos, redundan en más altos costos totales de los vehículos eléctricos, que no es una situación favorable al desarrollo de la movilidad eléctrica, y en una baja rentabilidad de la industria del reciclaje. En este contexto los fabricantes en China están pidiendo el soporte de las políticas de incentivos para los primeros años de la industria del reciclaje (Global Times, 2021).

Como se puede apreciar, de manera acorde con la complejidad y la dimensión de la mayor industria y economía de vehículos eléctricos del planeta, las autoridades de China han ido creando un cuerpo normativo que les llevó unos 10 años poner en práctica, que todavía dista mucho de ser perfecto, y cuya metodología es ir detectando y corrigiendo los errores e imperfecciones a medida que van avanzando, creando la experiencia y generando conocimiento.

China está considerando la revisión total del uso de baterías de litio de segunda vida en sistemas de almacenamiento de energía a gran escala (no está clara qué escala es considerada "gran escala), en medio de una serie de incendios en estas instalaciones en 2021. La interrupción de su uso continuará hasta que se desarrolle un avance en la tecnología de gestión de la consistencia de las baterías, y un sistema de prueba y evaluación del rendimiento de la batería de potencia firme, según informes del grupo de medios de China Caixing. El cese del uso de baterías secundarias se produce después de que la Administración Nacional de Energía emitiera un borrador de informe "Reglamento para la gestión de nuevos proyectos de almacenamiento de energía" el 22/06/2021 (Crompton, 2021).

⁸³ Con sede en Beijing, el mayor proveedor de servicios de infraestructura de torres de telecomunicaciones.

6. América Latina

En América Latina las regulaciones respecto a los posibles modos de gestión de las baterías de la movilidad eléctrica recién están comenzando a discutirse en algunos de los países, dado el estado incipiente de la movilidad eléctrica. Por la inexistencia de un circuito productivo de las baterías, en primera instancia se enfocan en la eliminación de pasivos ambientales, para luego progresivamente introducir las opciones de economía circular.

Dado el nivel de ingresos medios de la región, es de esperar que el principal modo de movilidad eléctrica que esté produciendo más pronto mayor cantidad de baterías en final de vida sea el sector de la movilidad liviana, que a la vez producirá un patrón más desordenado de los residuos de baterías, que el que se puede esperar proveniente de la industria automotriz.

Es de destacar que también existe en algunos países de la región un movimiento hacia las conversiones de autos de combustión usados a autos eléctricos, lo que en inglés se da en llama *retrofit*, y se define como la adición de nuevas tecnologías o características a sistemas más viejos. En el caso de los autos, lo que por ahora es un movimiento minoritario, de unos pocos vehículos al año, que tiene un fundamento ecológico, en la prolongación de la vida útil de los autos, y un fundamento económico, en que resulta más barato que comprar un auto eléctrico nuevo. Esto podría convertirse con el tiempo en un fenómeno más masivo, sobre todo si es apoyado y bien regulado por los Estados. Existen ya algunos reglamentos de las conversiones en discusión, y recientemente se formuló una propuesta desde la CEPAL conteniendo elementos para un marco regulatorio para acelerar la inversión en electromovilidad mediante la reconversión de vehículos que usan combustibles fósiles (CEPAL, 2021).

Este sector de las conversiones podría ser otra fuente de baterías que llegarán al final de vida en algunos años, y sería conveniente que se lo incluya también en la regulación de la gestión integral de las baterías, considerando que resulta ser un modo más económico y ecológico, para alcanzar la movilidad eléctrica entre los sectores de menores recursos, que la compra de autos eléctricos nuevos.

En particular, en el caso de sus baterías, siendo a menudo ensambladas en forma artesanal por los propios talleres de conversión, por una cuestión de los costos y la singularidad sus diseños, no suelen ni pueden cumplir los requisitos de homologación o estándares que cumplen las baterías que fabrican o implementan las automotrices, para sus vehículos fabricados en grandes series.

Por las mismas razones, sería poco plausible esperar que su diseño sea pensado para facilitar la reutilización y el reciclaje, a menos que se logre un consenso de pautas mínimas de diseño con los constructores. Es un tema que se discute actualmente en varios países de la región, dado que por otro lado, ciertos requerimientos de seguridad de las baterías deberían ser garantizados a los usuarios.

7. Chile

Para obtener datos de la situación de Chile en el tema de residuos y responsabilidad extendida del productor se contó con la colaboración de Beatriz Pulido Monckeberg, Coordinadora de Comunicaciones del Ministerio del Medio Ambiente.

Actualmente, Chile no cuenta aún con una regulación vigente específica para baterías de electromovilidad asociada a la responsabilidad extendida del productor. En términos generales los roles y obligaciones de los actores vinculados a la aplicación de la responsabilidad extendida, incluidos los generadores, están determinados por lo establecido en la ley 20.920 promulgada en 2016 que establece el marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje⁸⁴.

⁸⁴ Para más información véase <https://www.bcn.cl/lleychile/navegar?idNorma=1090894>.

Adicionalmente, a modo de referencia los expedientes de los decretos de responsabilidad extendida del productor que se encuentran publicados están en línea⁸⁵, para otros tipos de residuos, como neumáticos y envases y embalajes, o que están en proceso de elaboración, como aceites lubricantes, pilas y aparatos eléctricos y electrónicos. Se ha elaborado un estudio particular para la gestión de pilas y baterías secundarias que se puede encontrar en WSP Ambiental y RIGK Chile (2020).

El Ministerio del Medio Ambiente, está preparando una norma específica para la reutilización y reciclaje de baterías de la electromovilidad (Taborelli, 2022), de acuerdo con su Estrategia Nacional de Electromovilidad y los principios de economía circular. Según Marcelo Fernández, Subsecretario del Medio Ambiente, "Las baterías corresponden a uno de los seis productos prioritarios REP definidos en la normativa. Es el único de los seis cuyo proceso regulatorio aún no se inicia. En parte, esto se debe a que, junto al Ministerio de Energía y con el apoyo de la GIZ (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional) estamos desarrollando un estudio sobre el crecimiento exponencial de las baterías de ion litio a consecuencia de la electromovilidad y del almacenamiento de energías renovables" (Taborelli, 2022). Según la comunicación con el Ministerio del Medio Ambiente, el estudio denominado "Asistencia técnica para desarrollo de antecedentes para fomento de segundo uso y reciclaje de baterías de electromovilidad", se encuentra en pleno desarrollo con apoyo de GIZ y se espera que el informe final de dicho estudio se encuentre validado por las contrapartes técnicas del Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Energía, a fines de marzo de 2022.

8. Uruguay

Parte de esta información fue obtenida de consultas particulares con Silvana Martinez, de la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA) del Ministerio de Ambiente de Uruguay, y Emiliano Roselló, del Programa MOVÉS (Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay

Como marco general está vigente la ley N° 19.829 de gestión integral de residuos⁸⁶, la cual incluye dentro de los residuos especiales a los residuos de baterías y pilas. El artículo 5 también establece la necesidad de que exista reglamentación específica para este tipo de residuos. En el artículo 41 se establece la responsabilidad extendida del fabricante e importador en la gestión de los residuos especiales.

En cuanto a las baterías, lo vigente hasta el momento es el decreto 373/003, que regula el manejo y disposición de baterías plomo-ácido usadas o a ser desechadas⁸⁷. A febrero de 2022, se está trabajando en una propuesta de modificación de este decreto que abarca a las baterías de vehículos eléctricos, y que se encuentra a revisión en la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA) del Ministerio de Medio Ambiente (MOVÉS, 2022).

Uno de los puntos clave que se espera de la nueva reglamentación es la instrumentación de la responsabilidad extendida del importador/fabricante de la batería, luego de que esta cumplió su vida útil. En caso de no existir capacidades nacionales para una adecuación y 2da vida, o eventual reciclaje y disposición final, el importador/fabricante de la batería deberá asegurarse de que dicha valorización sea realizada en el exterior.

El marco general de residuos se encuentra formulado en el documento llamado "Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022-2032", confeccionado por el Ministerio de Ambiente (MINAMB, 2021), y que contiene información sobre el tratamiento de baterías, aunque al momento principalmente las de plomo-ácido de uso automotriz, y menciona que se están haciendo estudios para incorporar las nuevas baterías de litio de los vehículos eléctricos.

⁸⁵ Para más información véase <https://rechile.mma.gob.cl/>.

⁸⁶ Para más información véase <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19829-2019>.

⁸⁷ Para más información véase <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/373-2003>.

Según este plan, a los efectos de regular la gestión de los residuos de baterías, se adoptó la estrategia de agruparlos en dos categorías, según su uso. La primera categoría incluye las baterías, acumuladores y supercapacitores de uso en la movilidad convencional y eléctrica y en el almacenamiento estacionario de energía. Estas tecnologías alcanzan a baterías plomo-ácido, litio-ion, níquel-metal-hidruro. El segundo grupo comprende el resto de las baterías y es abordado dentro de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Estos residuos se incluyen en una reglamentación específica que está en vías de elaboración.

El decreto 373/003 actualmente regula la gestión de las baterías de plomo ácido, que se gestionan a través de "Planes Maestro", y se despachan a centros de reciclaje en el exterior, a través del Convenio de Basilea. En los últimos años su destino fue en Israel. El decreto se encuentra en proceso de modificación, debido a que han aparecido en el mercado nacional otras tecnologías para el almacenamiento de energía, como resultado de las políticas energéticas y de cambio climático que se están desarrollando y, especialmente, por las relacionadas a la promoción de la movilidad eléctrica. Por ello, este decreto deberá actualizarse para incluir en su alcance a todas las baterías utilizadas en la flota vehicular, incluidas en particular las baterías de litio-ion.

De la consulta con la funcionaria Silvana Martinez, surge que, en relación con la gestión de las baterías, actualmente hay algunos operadores con autorización, que tienen como destino la exportación de las baterías. Actualmente se encuentra en trámite la solicitud de autorización para la instalación de una planta de procesamiento de baterías para la recuperación de los materiales. Por lo tanto, hasta que se obtengan las autorizaciones correspondientes, el destino previsto en el corto plazo es la exportación en el marco del Convenio de Basilea. En cuanto a las de baterías de los vehículos eléctricos y otras que puedan ser reutilizadas, la política ambiental está alineada a la promoción del segundo uso y la intención es generar el marco para que este destino sea viable.

En paralelo se está elaborando el marco reglamentario para la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, por lo que desde esta corriente también se impulsa la construcción de capacidades de gestión locales para el reuso, reciclaje y otras formas de valorización.

La política nacional que se viene desarrollando en gestión de residuos y que está evidenciada en el Plan Nacional se encuentra alineada a la estrategia de economía circular y por tanto la propuesta de normativa busca promover el uso de tecnologías que faciliten los procesos posteriores de reuso y valorización de materiales, dejando abierto el marco para establecer prohibiciones o limitaciones a determinados desarrollos o contenido de sustancias.

9. Colombia

La resolución 1297/2010 fue presentada en respuesta a un estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo (2008) sobre la gestión de residuos de pilas primarias y secundarias, las cuales tenían un final desconocido o destino en vertederos y rellenos sanitarios. Este país ya contaba con iniciativas mediante una política establecida en el 2005 para residuos con manejo especial, promoviendo la adopción de sistemas de retorno de productos posconsumo a cargo de los fabricantes e importadores, iniciando con plaguicidas en 2007, medicamentos en 2010 y baterías de Pb-Ácido en 2011.

Al presente, Colombia no tiene legislación específica sobre las baterías de los vehículos eléctricos con destino a una economía circular, aunque se enmarcan en la normativa general de residuos. Se está trabajando en la generación de un documento específico de vehículos eléctricos (Portaluppi, 2021).

Hay un par de empresas operando con los residuos de estas baterías. Altero, es una de ellas, se dedica al reciclaje de las baterías con métodos térmicos y electromecánicos, con los cuales recuperan los materiales y metales base como el cobre y el aluminio que luego son comercializados dentro del país para procesos de manufactura (Portaluppi, 2021). La otra empresa es Batx, que se dedica a reutilizar las

baterías de los vehículos eléctricos en una segunda vida, para la prestación de servicios energéticos (Portaluppi, 2021.a).

C. Los actores involucrados en el ciclo de vida de las baterías de vehículos eléctricos

La producción de las baterías de vehículos eléctricos ocurre en una industria con una alta integración vertical y distribuida globalmente (Obaya, 2021) que suele involucrar empresas con bases operativas en distintos países. Los esfuerzos por estandarizar las características, y en particular los diseños de *packs* pensados para ser reciclados todavía están en su infancia, e impera una gran variedad de formatos y modelos, con restricciones dadas por los propios diseños de los EV.

En lo que hace a la producción de las celdas en sí, en el diagrama 5 del capítulo I se mostraron las operaciones de su fabricación. Dependiendo del grado de integración entre las fábricas de celdas y las de packs (si es una producción dedicada), y de éstas con las de vehículos eléctricos, se podría establecer la cadena entera de trazabilidad. A menudo este es el caso de los vehículos eléctricos grandes, que tienen una producción de baterías integrada hasta sus propias celdas, pero no es el caso de los vehículos eléctricos livianos, donde las fábricas pueden comprar packs genéricos, o hacer sus propios packs con celdas genéricas.

Considerando la actividad en América Latina, los diversos actores de la cadena de producción y uso de las baterías de los vehículos eléctricos, que de alguna manera u otra interaccionan con las baterías en algún momento, incluyen lo siguiente:

- Fabricantes de celdas normalmente extranjeros, debido principalmente a las enormes inversiones (miles de millones de dólares) necesarias para las mega y giga-factorías.
- Fabricantes ensambladores de packs, tanto locales como extranjeros.
- Fabricantes armadores de vehículos eléctricos, tanto locales como extranjeros.
- Importadores y comercializadores de baterías.
- Importadores y comercializadores de vehículos eléctricos.
- Integradores y servicios técnicos de vehículos eléctricos, que suelen reparar/reconvertir también las baterías.
- Usuarios finales de primera vida que son dueños de vehículos eléctricos.
- Integradores de segunda vida que arman instalaciones nuevas con baterías reacondicionadas.
- Usuarios finales de segunda vida que son dueños de instalaciones que contengan baterías de segunda vida.
- Transportadores de residuos peligrosos que llevan las baterías desde puntos de recolección.
- Centros de tratamiento y recicladores, destrucción y recuperación de materiales.

Todos estos actores tendrán en algún momento una relación distinta con las baterías de los vehículos eléctricos, inclusive caracterizada por tiempos de retención distintos. Los sistemas de gestión de baterías deberán contemplar los circuitos que recorre una batería a lo largo de su vida útil, o sea, por qué manos pasa y cuánto tiempo se retiene en cada etapa, para poder estimar las acciones necesarias, como el manejo de la información, que aseguren que esa batería sea canalizada correctamente hacia el sistema de gestión cuando termine su uso.

Se da el caso de algunos comercializadores de vehículos eléctricos livianos (scooters o monopatines) donde estos productos podrían tener tiempos de permanencia en los locales de venta que exceden lo recomendado y contribuyendo al envejecimiento de las baterías. Esto aumentaría los riesgos y disminuiría las posibilidades de segunda vida de las baterías, en caso de que los clientes o usuarios no reciban las instrucciones adecuadas sobre los procedimientos para disponer de la batería al final de su vida. También se dará el caso de transferencias de vehículos eléctricos entre usuarios, donde el usuario final de segunda vida se enfrentará eventualmente (varios años después de su adquisición) el final de vida de su batería.

Estos ejemplos bastan para considerar una regulación que también tenga en cuenta la conducta de los usuarios, tanto en de la primera como de la segunda vida y no solamente a los productores, importadores y comercializadores de las baterías.

Por ello, los esfuerzos de incrementar la documentación obligatoria (por ejemplo, manuales de instrucciones incluyendo la disposición de la batería, redactada en formato estandarizado) y la trazabilidad de estos EV y sus baterías podrían mejorar la situación, es decir, las tasas de recolección, la facilidad de la clasificación y la eficiencia del reciclaje.

D. La responsabilidad extendida al productor/importador de las baterías

La normativa de distintos países basada en general en el principio de responsabilidad extendida al productor implica que los productores del residuo deben hacerse cargo del costo que acarrea la contaminación y su remoción (WSP Ambiental y RIGK Chile, 2020; OECD, 2016). La OECD ve este enfoque de política ambiental donde la responsabilidad del productor sobre un producto se extiende a la etapa post-consumidor del ciclo de vida del producto. En la práctica, la responsabilidad del productor involucra a los fabricantes asumiendo su responsabilidad para recolectar productos al final de su vida, y por clasificarlos antes de su tratamiento final, idealmente en reciclaje. Este esquema puede permitir a los productores el ejercicio de su responsabilidad proveyendo los recursos financieros requeridos y/o tomando a su cargo los aspectos operacionales y organizacionales del proceso, de parte de los municipios. Pueden hacer esto en forma individual o colectiva (OECD, 2016).

Para el caso de las baterías de los vehículos eléctricos, se puede observar que dada la variedad de actores que tienen interacción con las baterías a lo largo de su vida útil, los distintos actores podrían considerarse productores del residuo en distintas etapas o circunstancias. Normalmente se restringe la definición del productor al que introduce el objeto, en este caso la batería, en el mercado por primera vez; y a quien se le exige una acción concreta como pagar tasas o tarifas de recolección, etc., pero en este caso la cuestión de la definición puede complicarse por los otros actores involucrados.

Se dan situaciones que pueden requerir la revisión de este concepto. Si el usuario final o dueño de un vehículo eléctrico no dispone bien de su batería, la cual termina en un relleno sanitario, poco podrá hacer el productor o el actor que introdujo esa batería en el mercado. De modo que es posible que las particularidades de las baterías de los vehículos eléctricos como posibles residuos con un circuito complejo, estén indicando la necesidad de un sistema de gestión integral específico para poder controlar a las baterías en todo su uso, y elevar sus tasas de recuperación para que sean enviadas a segunda vida o reciclado.

En principio una regulación práctica debería considerar y convocar a todos los actores que interactúan con las baterías para lograr que cada uno asuma su cuota de responsabilidad en un sistema de gestión integral de estas baterías. Esto se puede lograr mediante la aplicación de distintos incentivos y procedimientos, por ejemplo, tasas a productores para pagar costos de disposición, incentivos a usuarios para ejecutar una correcta disposición, y condiciones adversas si no lo hacen.

Algunos problemas con distintos actores como posibles productores en el sentido de responsabilidad extendida, que colocan baterías en el mercado, o con los usuarios que las retienen por tiempos prolongados, pueden dar lugar a los siguientes problemas de implementación:

- La venta de los vehículos eléctricos que haya sido producida por un comercializador de internet que no tenga base en el país. Por ello, todos los vehículos eléctricos que contienen baterías como posibles residuos peligrosos pueden ser identificados ya al nivel de la aduana y del proceso de importación.
- Seguimiento de los consumidores, sobre todo de vehículos eléctricos livianos, al no ser fácilmente rastreados o fiscalizados, ya que no se les exige matrícula. Al menos a cierto nivel como bicicletas eléctricas, debería ser factible registrar/rastrear su tenencia hasta su disposición adecuada. Esto requiere programas de seguimiento, bases de datos y concientización del usuario.

Para los packs de baterías de vehículos más grandes resulta más fácil hacer su seguimiento, lo que no significa que se esté haciendo, ya que en general estos son registrados con su debida matrícula. Se podrá avanzar un paso más creando bases de datos de los usuarios de estos vehículos eléctricos a los efectos de un seguimiento de sus baterías, por ejemplo, a través de las distintas transferencias de los vehículos entre dueños.

E. La recolección de pilas y packs de litio sueltos, peligro de incendio en los contenedores

El caso de la recolección de pilas de litio sueltas, y de packs provenientes de vehículos eléctricos livianos, que los dueños puedan descartar por su cuenta, implica un riesgo posiblemente mayor que el caso de la recolección, más ordenada y pautada, de los packs de autos eléctricos y de los vehículos eléctricos más grandes.

La acumulación desordenada de las pilas y packs con conductores expuestos puede dar lugar a incendios por la compresión o aplastamiento, o el cierre ocasional de circuitos eléctricos a través de los metales de las propias baterías, más aún cuando conservan parte de su carga. De hecho, se han reportado varios casos de incendio dentro de tales contenedores de recolección y en plantas de tratamiento (EPA, 2021; Mock, 2020; Stokes, 2019, RethinkWaste, 2018).

Algunos ejemplos de difusión de disposición adecuada, puede consultarse en el trabajo de RethinkWaste (2021 y 2018) y en San Mateo County (2019). También la Asociación de Baterías de Japón ha realizado un ejemplar trabajo de concientización de la población por medio de varias medidas, entre ellas exigir a los fabricantes de las pilas el etiquetado indicativo del tipo de batería. Para ello, usan el símbolo de "reciclable" con tres flechas al que se agrega una palabra con la química de la batería y un color distintivo, junto con instrucciones y, en lo posible, las facilidades para aislar las pilas, mediante cintas adhesivas o bolsas de plástico. Esta Asociación provee recolección y reciclaje de baterías recargables portables a través del *Japan Portable Rechargeable Battery Recycling Centre* (JBRC).

Respecto al etiquetado de las baterías no hay un estándar internacional seguido por todos los países. Sin embargo, es común usar el símbolo ISO de "reciclable" con tres flechas (ISO 7000, símbolo 1135) con el nombre del tipo de química de la batería escrito abajo (Ni-MH, Ni-Cd, Li-ion, Pb-ácido, etc.), como es el caso en Japón, que se muestra en la fila de abajo del diagrama 9.

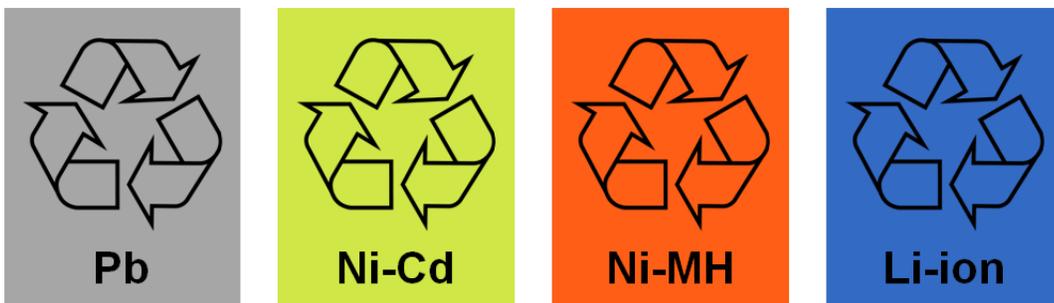
De estas experiencias pueden extraerse recomendaciones de políticas para el manejo seguro de las pilas y packs de baterías de litio de la movilidad eléctrica, en el contexto general del tratamiento de pilas recargables de otros usos residenciales:

i) Identificar las clases de baterías es necesario, por lo cual, se requiere instrumentar con los fabricantes e importadores, un sistema de etiquetado adecuado.

ii) Dar claras instrucciones y facilidades a la población sobre cómo identificar y manejar los tipos de pilas reciclables, y en particular las de litio, a través del etiquetado correspondiente, y la generación de contenidos de información didáctica como manuales y sitios web, al estilo de (RethinkWaste, 2018) y (San Mateo County, 2019).

iii) Agregar símbolos de advertencia y peligro de incendio y/o riesgo eléctrico incluso por alta tensión cuando corresponda. Estos símbolos deberían estar presentes en todos los contenedores y lugares donde se manipulen o acopien baterías de litio.

Diagrama 11
Ejemplos de etiquetas de advertencia e identificación de tipos de baterías reciclables en Japón



Fuente: Tomadas de Wikimedia commons y Tasaki, 2014.

Un posible inconveniente reportado en los estudios de la implementación de la directiva 2006/66/EC sobre baterías y sus desechos, es la falta de espacio en las pilas pequeñas para su etiquetado (European Commission, 2019.b). Esto no sería un problema para la gestión de packs de baterías de la movilidad eléctrica ya que disponen de un volumen suficiente, mayor al de la batería típica de una notebook, que ya tiene espacio suficiente para su etiquetado.

Sin embargo, si se trata de celdas sueltas genéricas, las que se encuentran a menudo en los packs de vehículos eléctricos livianos como bicicletas o scooters, es usual que no lleven ninguna clase de etiquetas, aparte del marcado a tinta de las celdas. Incluso hay celdas que no tienen ni siquiera una cobertura plástica (vaina termo-contráctil) sobre su carcasa metálica, por lo cual habría que tener un mayor control sobre este aspecto de las celdas que componen los packs. Los packs como un todo, en cambio, normalmente son etiquetados con información del fabricante, rara vez con los símbolos de reciclaje.

Será conveniente que las baterías de litio tengan un tratamiento diferenciado en la recolección y su traslado, debiendo ser identificadas, separadas y aisladas eléctricamente. Por ejemplo, mediante cintas o bolsas con cierre, esto permitiría minimizar los riesgos antes mencionados, y que la población en general esté alertada y consciente de su manejo.

F. Mecanismos de trazabilidad desde el origen

Existen distintos mecanismos de trazabilidad o rastreo que permiten conocer la historia o trayectoria de una batería, y contribuyen a una gestión más efectiva y eficiente, lo que se puede hacer extensivo a las baterías provenientes de los vehículos eléctricos. Las tecnologías actuales de trazabilidad de productos permiten recabar información muy útil para la toma de decisiones, como la concentración de los productos por región o época del año en un dado lugar.

En primer lugar, se recurre al etiquetado de los productos (etiquetas, códigos de barras, códigos QR), que en el caso de las baterías debería cumplir al menos dos funciones. Por un lado, elevar la tasa de recolección, dando alguna información mínima al usuario sobre qué tipo de baterías se trata, para que preste atención a su posible descarte en el lugar correcto y previsto. Para ello, debería existir un lugar previsto que sea apropiado, accesible y bien identificado. Además, debería acompañarse con capacitación permanente del usuario, mediante información bien clara y didáctica. Es decir, se debería contar con un sistema de gestión integral de las baterías. Por otro lado, el etiquetado cumple la función de elevar la trazabilidad de las baterías para, llegado el momento, facilitar la gestión para los usos de segunda vida y reciclaje.

El etiquetado es un requisito para los productores e importadores de las baterías, y esto plantea algunos desafíos. En primera instancia, será al productor o importador del vehículo eléctrico a quien se le exija este requisito. En las baterías de los vehículos eléctricos hasta en los más chicos, no existen restricciones de espacio para una o varias etiquetas, y no agregan un costo apreciable.

Una etiqueta inteligente, por ejemplo, con códigos de barras, o QR o RFID que estén ligados a sistemas informáticos bien mantenidos, puede ayudar al reconocimiento automático de los packs, de sus módulos internos y de las celdas, en las plantas de tratamiento. En principio no hay ningún impedimento para el etiquetado hasta el nivel de celdas; aun en el caso de las celdas más chicas que se usan en movilidad eléctrica, que a menudo son las celdas cilíndricas tipo 18650, el espacio es suficiente para un código QR, así como para un código de barras.

Los sistemas de información contenida en las bases de datos accesibles por QR o en los RFID pueden servir para obtener la historia de la batería y ayudar a decidir su envío a segunda vida o a la disposición final en reciclaje. El etiquetado QR es la práctica que se estará exigiendo en la Unión Europea a través de la propuesta de 2020 que se comentó anteriormente.

Como se mencionó en la sección B de este capítulo, la trazabilidad de una batería hasta las celdas dependerá del grado de integración del productor del vehículo eléctrico con la fábrica de packs y de ésta con la fábrica de celdas. Si la producción de celdas es dedicada, como es usual en el caso de la industria automotriz, la trazabilidad puede darse hasta el nivel de las celdas individuales. Algunas automotrices como Tesla Motors guardan trazabilidad de las partidas de celdas que utilizan en sus packs. La fecha de producción de una batería es uno de los parámetros para tener en cuenta para calcular su estado de salud.

Distinto es el caso de los productores de vehículos eléctricos livianos, que pueden fabricarlos con packs genéricos adquiridos a terceros, o fabricar sus propios packs con celdas genéricas. En ese caso el productor del vehículo será a quien se puede exigir que sus packs implementen mecanismos de trazabilidad y etiquetado QR, como mínimo al nivel de los packs.

G. Criterios de aceptación y clasificación de baterías en desuso

En cada instalación o planta de procesamiento la aceptación de las baterías en desuso ya sea para segunda vida o reciclaje puede tener distintos requerimientos. Entre estos requerimientos está el tipo de baterías, el tamaño y el estado en que se aceptarán, y el destino ya sea segunda vida o reciclaje.

En principio las plantas que reacondicionen o ensamblen nuevos packs de baterías para su uso en segunda vida con celdas o partes de packs usados de autos eléctricos o más pesados, probablemente lo harán en convenio con las empresas automotrices. Estas podrían ser las prestatarias de servicios de transporte dueñas de flotas de colectivos, o los fabricantes o productoras de las baterías, por lo que la transferencia de tales baterías responderá a un contrato entre privados. Será el integrador de segunda vida que reacondiciona el pack el encargado de ensayar el estado de salud y demás condiciones en las que recibe las baterías.

Salvo en el caso de una batería proveniente de un choque o siniestro vial con destrucción parcial, las baterías de los vehículos eléctricos grandes en general llegarán a la planta dentro de su auto eléctrico, que simplemente acusará una autonomía reducida respecto a la autonomía nominal inicial, por lo demás se encontrará en una condición física íntegra.

En cambio, en el caso de los vehículos eléctricos livianos, es probable que las baterías lleguen a la planta ya extraídas de sus vehículos originales, en distintos estados de desarmado, porque suelen quitarles las piezas útiles en los talleres para armar nuevas baterías, reemplazando las celdas con celdas nuevas. Por lo tanto, lo más probable en este caso es que lleguen a la planta conjuntos de celdas gastadas, soldadas entre sí, usualmente con conductores expuestos, lo que representa un gran riesgo de cortocircuito. Clasificar las baterías que llegan a la planta provenientes de estos vehículos livianos, en los estados mencionados, puede representar un verdadero desafío, si no se conoce su origen y no hay mecanismos de trazabilidad implementados.

La clasificación de los packs de los vehículos eléctricos más grandes no presentará desafíos, por cuanto su origen e historia será más fácil de rastrear, mediante las relaciones con los productores originales de las baterías, que estarán bien identificados. Toda la industria automotriz está produciendo vehículos eléctricos con packs que se preparan con mecanismos de trazabilidad para la gestión del final de vida.

Todo lo dicho apunta a que será conveniente considerar 2 tipos de corrientes bien diferenciadas de las baterías: las de los vehículos eléctricos livianos, que de hecho son una categoría de baterías ahora reconocida en la propuesta de 2020 de la Unión Europea, y las de los vehículos eléctricos grandes, con distintas tipologías, y distintos métodos para su tratamiento.

H. Aprobación de instalaciones de procesamiento

Si bien no se puede establecer criterios específicos de aprobación de las instalaciones de procesamiento, sin el conocimiento previo de las corrientes de baterías que recibirá, y dada la diversidad de escenarios posibles en los distintos países, sí se pueden dar pautas generales.

Para la aprobación de las instalaciones de procesamiento de las baterías sería conveniente que se realice previamente una doble auditoría, por un lado, una de seguridad e higiene en el trabajo, y por otro, una de impacto ambiental.

En términos de seguridad e higiene, para el conjunto de prácticas estandarizadas, lo relevante y específico de las plantas de baterías es la cuestión de los riesgos de incendios y escapes químicos propios del trabajo con baterías de litio de vehículos eléctricos, como ya se vio en el capítulo III, y las capacidades para trabajos con alta tensión eléctrica.

Recuadro 3
Es importante no acumular baterías de litio sin su correcto aislamiento

En ninguna circunstancia debe permitirse la acumulación de pilas o celdas o packs con la posibilidad de que queden conductores al descubierto, de que sus aislantes (vainas plásticas) puedan rasgarse, o de que puedan ser aplastadas o comprimidas. Esta fue la causa de incendios en varias ocasiones en contenedores y acumulaciones de baterías en plantas de reciclado; véase EPA (2021); Mock (2020); Stokes (2019) y, RethinkWaste (2018). En caso de tener que acumular estas baterías, debe asegurarse distancias cortafuegos prudentiales, y mecanismos de desactivación o pasivación de las baterías.

Fuente: Elaboración propia

Por un lado, se buscará aplicar métodos que minimicen los riesgos de inicio y corten la propagación de incendios ocasionados por la acumulación de baterías de litio, que como se vio antes contienen materiales muy inflamables. Las baterías recibidas, en caso de que tengan celdas o packs con polos o conductores expuestos, deben llegar a las plantas de forma convenientemente aisladas (bolsas, cintas adhesivas, etc.). De lo contrario, se debería disponer de una instancia o etapa de aceptación en la que se realice el aislamiento, o bien, se destine el material declarado para recuperar a su reciclaje bajo condiciones seguras, por ejemplo, desactivación dentro de piletas de salmuera, etc. cómo se describió en el capítulo III.

Adicionalmente las instalaciones deben contar con los sistemas de control de incendios adecuados, muros y cerramientos cortafuegos, y extractores para la evacuación de posibles fugas de gases tóxicos, resultado de la combustión de las celdas. También son importantes las normas de seguridad e higiene sobre el trabajo seguro de los empleados, que pasan por la ropa e implementos de trabajo, respetar los espacios amplios que se requieren al manejar este tipo de baterías, contar con duchas de emergencia, etc.

En términos ambientales, como punto de partida se suele exigir como en cualquier industria, la confección y aprobación de un estudio de impacto ambiental por una entidad idónea y autorizada en la jurisdicción. Este estudio deberá contener una línea de base ambiental con la descripción de la situación ambiental antes del emprendimiento y una declaración de actividades que relate los impactos detectados de las mismas, así como un plan de gestión ambiental para la remediación de los impactos que se declaran.

Un requisito adicional sería establecer un sistema de gestión ambiental que cumpla la norma ISO 14.001, procurando así reducir los impactos ambientales y cumplir con la legislación en materia ambiental.

En el caso de plantas de reacondicionamiento de packs para segunda vida, los impactos ambientales podrían ser insignificantes, en relación con lo que podrían ser los impactos de una planta de reciclaje. En caso de simplemente desarmar y volver a armar baterías con celdas que en ningún momento son abiertas o destruidas, puede que resulten corrientes de sólidos para descarte o reciclaje, en general, metales comunes producto de las carcasas, aunque también podrían resultar algunos potencialmente peligrosos, como celdas completas arruinadas, que podrían pasar a la planta de reciclaje. Poco o nada de efluentes líquidos o emisiones gaseosas se prevén para las operaciones de reacondicionamiento para segunda vida. Su impacto ambiental será verdaderamente insignificante.

En el caso de plantas de reciclaje, se procurará estudiar previamente los procesos particulares (térmicos, mecánicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, etc.) que se piensa llevar a cabo. Esto con el fin de calcular sus posibles impactos ambientales, entre ellos, residuos sólidos y efluentes líquidos y gaseosos y buscar la manera de modificar esos procesos para que se reduzcan dichos impactos, incluido el consumo de energía (que se puede certificar con la ISO 50.001 de eficiencia energética), todo lo cual requerirá de una cierta componente de investigación y desarrollo.

Se resalta nuevamente que éste es un rubro relativamente nuevo y que presenta mucha variabilidad, por lo cual será necesaria la investigación y desarrollo para la optimización de los procesos en las plantas.

Dada la diversidad y la novedad de estos procesos, no se puede esperar que las plantas se diseñen en base a conocimientos ya establecidos, sin un estudio previo de las corrientes de baterías y sus componentes a ser recicladas. Por supuesto que hay empresas de países industrializados, como las mencionadas en el capítulo III, que ya tienen experiencia y un cuerpo de especialistas formados, que podrían ofrecer plantas llave en mano.

No obstante, dado que todavía hay una ventana de oportunidad y tiempo, del orden de unos pocos años, hasta que el volumen de baterías retiradas de los vehículos eléctricos sea muy apremiante. Se puede optar por movilizar y emplear a los profesionales locales, permitiendo y apoyando que se construya la experiencia con I+D local, lo cual será indudablemente provechoso para la generación de empleo calificado, y una parte esencial del objetivo de desarrollo sostenible en la región latinoamericana.

V. Conclusiones y recomendaciones para una gestión integral de baterías con una estrategia de economía circular

Para que las nuevas tecnologías de movilidad eléctrica realmente representen un paso adelante en el cuidado del medio ambiente, es necesario que el elemento principal que impulsa esta transición, sus baterías, sean un producto sostenible que pueda ser reutilizado al final de su primera vida útil, y finalmente reciclado con una alta recuperación de sus materiales, para ser insertados de nuevo en los circuitos productivos, alimentando la economía circular.

La movilidad eléctrica está avanzando a pasos gigantes, y las baterías al final de su vida útil pronto formarán montañas ⁸⁸de residuos, peligrosos y contaminantes, si los estados no se ocupan de liderar, incentivar y dirigir, a las empresas y al público, a los efectos de elevar la tasa de recolección diferenciada, y de formar las capacidades de reutilización y de reciclaje, para de este modo volver a insertarlas baterías en circuitos productivos por vía de la segunda vida o de su reciclaje.

Las normativas sobre la gestión de baterías retiradas de la movilidad eléctrica son muy recientes y/o están en preparación en muchos países del mundo, la región de Latinoamérica no es una excepción.

A modo de conclusiones, algunas consideraciones resultado de este trabajo para tener en cuenta en la redacción de futuras regulaciones para los sistemas de gestión de baterías retiradas de los vehículos eléctricos, con vistas a una economía circular, deberían incluir lo siguiente:

- En este trabajo se identifica, en línea con los desarrollos en la Unión Europea la clase de los vehículos eléctricos livianos como posibles productores de una corriente de baterías retiradas

⁸⁸ En una entrevista reciente a Ajay Kochhar, cofundador y director general de Li-Cycle, una innovadora empresa reciclaje de baterías de litio en Estados Unidos de Norteamérica, se refirió a un "tsunami entrante" de baterías de litio gastadas. Con la previsión de que las ventas mundiales de los vehículos eléctricos aumenten de 1,7 millones en 2020 a 26 millones en 2030, es fácil imaginar que pronto estaremos inundados de baterías gastadas (Kumagai, 2021).

que será más dispersa y difícil de recolectar de manos de sus dueños, que las baterías de los vehículos eléctricos grandes⁸⁹, como los autos, utilitarios y colectivos eléctricos, que serán más fáciles de rastrear y gestionar. Se propone por lo tanto que las regulaciones tomen en cuenta diferencias en estos dos sectores originadores de baterías (vehículos eléctricos livianos y grandes), considerando el efecto de sus particularidades en la gestión integral de baterías.

- El cuadro 2 del capítulo I muestra una guía de los pesos y volúmenes aproximados de las baterías de distintos tipos de vehículos eléctricos.
- En forma análoga al tratamiento de pilas y baterías de uso residencial o industrial, la tasa de recolección de baterías de vehículos eléctricos livianos aumentará en proporción a los esfuerzos de campañas permanentes de concientización y capacitación de los usuarios, su cooperación para la recolección puede ser aumentada mediante estímulos y sanciones. Por ejemplo, mediante un sistema de depósito a cuenta de su devolución, con certificados, o alguna forma de que el usuario valore a la batería como un recurso reciclable, y a la vez peligroso.
- El Estado también debe hacer sus deberes al crear las capacidades de gestión que como mínimo separen el tratamiento de las baterías del tratamiento de los otros residuos, porque, si se exige al usuario la disposición separada, para que luego un sistema de gestión inexistente o defectuoso mezcle de nuevo las baterías en otras corrientes de residuos, el mensaje que se da a la población es decepcionante, además de las pérdidas económicas y los mayores pasivos ambientales que se ocasionan.
- Todo el mundo debe saber que las baterías se reciclan. Los usuarios y los comerciantes, que a veces también las descartan, por ejemplo, arruinadas por demasiado tiempo en espera en el negocio, o como residuos de reparaciones de baterías defectuosas.
- Todas las baterías de litio y de Ni-MH son en última instancia reciclables. Para una dada batería o lote, se intentará en primer lugar decidir si puede extenderse su vida útil sirviendo para una segunda vida, y de no ser el caso, deberán ir a reciclaje. Esta es la primera decisión en el algoritmo de la gestión de las baterías.
- La decisión sobre si un cierto lote de baterías puede ser destinado a reacondicionamiento para segunda vida, o irá directo al reciclaje, dependerá de la cantidad y calidad, del tamaño y del estado (el estado físico general, y el estado de salud), y de la homogeneidad de las baterías que se reciben en ese lote. En el capítulo III se dieron algunas pautas y ejemplos de los ensayos usuales para tener en cuenta en la creación de capacidades o instalaciones de integración de baterías de segunda vida.
- La separación por límites de peso o por límites de capacidad no es suficiente para la decisión sobre cuál de los caminos tomar con una dada batería de litio, por todos los otros parámetros vistos en el punto anterior. Por ejemplo, una batería de escasos 0,5 kWh (36 V x 14 Ah), que bien puede pesar 3,2 kg, proveniente de una bicicleta eléctrica o monopatín, probablemente no tenga otro destino plausible que el reciclaje. Sin embargo, si se trata de un lote de muchos packs iguales en la misma condición, que puedan ser reacondicionados, quizá puedan salvarse de la trituradora, y ser puestos a trabajar juntos bajo un nuevo sistema de control, formando tal vez una batería de varios kWh para una aplicación estacionaria de baja potencia. En el caso de vehículos eléctricos livianos es entonces difícil establecer a priori cierto límite de tamaño de batería para decidir si va a segunda vida o a reciclaje.

⁸⁹ Aquí se ha reservado la palabra “pesados” para la clase particular de vehículos eléctricos grandes usualmente identificada con transporte pesado de pasajeros (buses, colectivos) o mercancías y camiones.

- Las baterías de vehículos eléctricos más grandes no presentan ese problema. A priori se destinarían todas a segunda vida, a menos que estén defectuosas o destruidas, en cuyo caso irán a reciclaje. Pero las tecnologías propietarias contenidas en los BMS, en particular el software, usualmente requieren autorizaciones, y habrá que realizar convenios con las automotrices productoras de esos vehículos eléctricos, para poder intervenir en su reprogramación o reconfiguración, si es que se pretende reutilizarlas sin desarmarlas.
- Dada la diversidad de formatos y tipos de celdas y packs, la falta de estandarización de los packs que tiene su raíz en la diversidad de formas y prestaciones de los vehículos eléctricos, y la novedad de los procesos seguidos en plantas de reacondicionado de packs (segunda vida) o de reciclaje, resulta un buen desafío para la informática y la robótica asistida por las nuevas tendencias de IA (visión y manipulación), tratar de automatizar los procesos de tratamiento de las baterías, sobre todo para desarmar packs hasta el nivel de separar las celdas, y abrir éstas para desplegar los electrodos, en el caso del reciclaje directo o selectivo. Este es un tema de I+D muy candente, y abre oportunidades de empleo calificado, para los ingenieros y profesionales de IT locales.
- Las plantas de reciclaje deberán implementar los procesos más innovadores, limpios y eficientes, tanto en el consumo de energía como en la tasa de recuperación de metales. Los impactos ambientales de los procesos hidrometalúrgicos y químicos se prevén mayores que los impactos de procesos térmicos, pirometalúrgicos, electromecánicos y electromagnéticos. Aquí también la I+D local puede ayudar a desarrollar procesos innovadores. Si hay algo que tiene América Latina en abundancia es cerebros jóvenes formados en buenas universidades esperando la oportunidad de contribuir y ser valorados en sus propios países. Esto no es un tema menor para el camino del desarrollo sostenible, y por eso se lo trae a las conclusiones.
- Naturalmente, no todos los países tendrán ventajas o facilidades para fabricar celdas de litio, al menos en forma competitiva, pero sí será más probable que puedan fabricar los packs, tanto nuevos como de segunda vida, y en caso de reciclaje canalizar los materiales reciclados a otras industrias o exportarlos a la industria de reciclaje del exterior.

En base a estos considerandos para la formulación de políticas que permitan acrecentar las capacidades de gestión de las baterías de los vehículos eléctricos, poniendo en práctica una estrategia de economía circular, se pueden sugerir una cantidad de medidas agrupadas en ejes de gestión, como se resumen en el cuadro 17. La lista no pretende ser exhaustiva, sino una línea de base de partida, para comenzar a organizar los sistemas de gestión para que se orienten a los objetivos planteados.

Cuadro 17

Algunas medidas a considerar, agrupadas en ejes de gestión de baterías retiradas de vehículos eléctricos

Ejes de la gestión	Medidas
Aumento de la tasa de recolección	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar el sistema de gestión integral de baterías retiradas de vehículos eléctricos y sus residuos, si no está implementado aún. Dotarlo de presupuesto adecuado y explícita competencia y alcance de la autoridad de aplicación. - Formular metas para aumentar la tasa de materiales recuperados del reciclaje. - Implementar campaña permanente de concientización y capacitación de los usuarios de vehículos eléctricos sobre sus baterías, sus peligros, y su correcta disposición, dentro del marco general de la gestión de baterías. - Aplicar incentivos y sanciones a los usuarios para que colaboren en la disposición final de sus baterías (por ejemplo, depósito a cuenta, estampilla de colaboración con gestión de residuo, etc.) - Crear Puntos de Recolección con contenedores bien diferenciados mediante cartelería y señalética. - Facilitar el encintado de los bornes o embolsar las baterías, previniendo incendios. Información didáctica disponible y actualizada. Trabajar con los talleres y vendedores de bicicletas y motocicletas. - Obligar al fabricante, importador o comercializador de etiquetar con símbolo "reciclable" y datos relevantes de la batería, con etiquetas estandarizadas, en todos los packs de baterías de vehículos eléctricos, y adjuntar información sobre forma de disposición de esta en las etiquetas y en los manuales. - Adoptar sistemas de clasificación de baterías, y considerar las baterías de los vehículos eléctricos livianos como una corriente separada de la corriente de baterías de los vehículos grandes, con distintos métodos de tratamiento. - Exigir que la transferencia de los vehículos eléctricos entre usuarios sea permitida solamente si va acompañada de la transferencia de los manuales de usuario con indicaciones sobre la disposición de las baterías, y todas las etiquetas originales.
Responsabilidad extendida para el productor y los importadores o comercializadores	<ul style="list-style-type: none"> - Deber de informar al sistema de gestión los detalles de las baterías puestas en el mercado, sus cantidades, tipos, químicas, peligrosidad, datos de fabricantes, fechas de producción, lotes, ensayos, certificaciones, en qué vehículo eléctrico se incluyen, etc. mediante formularios en línea, estandarizados, de actualización periódica. - Imponer pagos al sistema de gestión, de las tarifas de disposición proporcionales al volumen de las baterías puestas en el mercado. - Obligar al fabricante a etiquetar con código QR dirigido a una URL con información estandarizada sobre cada batería, con detalles sobre su fabricante, su importador y su comercializador, el tipo de batería, sus elementos químicos, peligrosidad, etc. - Reglamentar y fiscalizar los requisitos de seguridad en las instalaciones de los fabricantes, importadores, comercializadores. - Exigir manuales de usuario de calidad estandarizada, en el lenguaje del país con traducción correcta, con información normalizada, sobre las baterías incluyendo las instrucciones de disposición final al principio del manual. - Exigir que la transferencia de los vehículos eléctricos entre empresas sea permitida solamente si va acompañada de la transferencia de los manuales de usuario y todas las etiquetas originales.
Aumento de la trazabilidad de las baterías	<ul style="list-style-type: none"> - Exigir a fabricantes / importadores / comerciantes de vehículos eléctricos grandes implementar mecanismos informáticos de trazabilidad de las baterías de sus vehículos, generando y enviando datos normalizados a la base de datos del sistema de gestión. - Implementar el sistema base de información en línea del sistema de gestión de baterías, donde se pueda almacenar y consultar en línea la trayectoria de las baterías que llegan o funcionan dentro de vehículos eléctricos.
Incremento de las capacidades de reacondicionado para la segunda vida	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivar la creación de capacidades y las decisiones de inversión del sector privado en plantas de reacondicionado e integradores de segunda vida. - Incentivar la expansión del mercado de baterías de segunda vida creando la demanda receptora de estas baterías en acumulación estacionaria de energía. - Reglamentar y fiscalizar los requisitos de seguridad en las plantas de reacondicionado de segunda vida, y sobre sus productos (baterías).
Aumento de las capacidades de reciclaje de baterías	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivar la creación de capacidades y las decisiones de inversión del sector privado en plantas de reciclaje. - Incentivar la producción local de celdas y sobre todo componentes de celdas (materiales activos, electrodos, etc.) que puedan constituir la demanda de materiales reciclados. - Incentivar la exportación de materiales reciclados, y los productos hechos con ellos, creando mercados receptores. - Reglamentar y fiscalizar los requisitos de seguridad en las plantas de reciclaje. - Formular metas para aumentar la tasa de materiales recuperados del reciclaje y fiscalizar el cumplimiento de las metas. - Aumentar la eficiencia de reciclaje en energía, rendimiento e impactos ambientales, mediante programas de subsidios.

Ejes de la gestión	-	Medidas
Reducción del impacto ambiental de las plantas de reciclaje	-	Verificar el cumplimiento de leyes ambientales, e incentivar la reducción de los impactos ambientales en las plantas de reciclaje.
Aumento de la I+D aplicada a los procesos de segunda vida y reciclaje en programas piloto	-	<ul style="list-style-type: none"> - Financiar y subsidiar proyectos para desarrollar y construir plantas piloto con laboratorios de desarrollo (no únicamente académicos) de procesos eficientes para el reciclaje de baterías, con el fin de elevar la eficiencia de recuperación y disminuir los impactos ambientales, creando capacidades locales. - Financiar proyectos de desarrollo de baterías de segunda vida, en particular proyectos de la integración de datos entre los BMS y los equipos de conversión de energía. - Desarrollo de software para packs de baterías de litio e interfaces de usuario para las baterías de segunda vida. - Aumentar la difusión sobre la importancia de la I+D en los procesos de refabricación para segunda vida y de reciclaje de baterías de los vehículos eléctricos.

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- Aleman, C. (2022) "Fire at Taylor recycling plant likely caused by ignited lithium-ion battery" <https://www.kvue.com/article/news/local/taylor-recycling-plant-fire-lithium-ion-battery/269-edfdc2f9-7711-4bc2-8007-e1a09b1fc213>.
- Amadeo, K. (2022) "Oil price history – Highs and Lows since 1970", *The Balance*, [en línea] <https://www.thebalance.com/oil-price-history-3306200>.
- Atwell, C. (2018) "Six Lithium-ion Battery Chemistries: Not all Batteries are Created Equal" [en línea] <https://www.electronicdesign.com/technologies/alternative-energy/article/21199536/six-lithiumion-battery-chemistries-not-all-batteries-are-created-equal>.
- Autopista.es (31/03/2017), "Probamos los Volkswagen Golf más eficientes: e-Golf y GTE" https://www.autopista.es/pruebas-de-coches/probamos-los-volkswagen-golf-mas-eficientes-e-golf-y-gte_145721_102.html.
- Bas Bjorn (2020), canal de Youtube, "BMW i3 60Ah Battery Pack Disassembly" [en línea] (Parte 1), <https://www.youtube.com/watch?v=LB6WI8cRzgs&t=1s> y Parte 2). <https://www.youtube.com/watch?v=w6108vPFgAY>.
- Ballantyne A.D., Hallett J.P., Riley D.J., Shah N., Payne D.J. (2018) "Lead acid battery recycling for the twenty-first century", *Royal Society Open Science*, 5: 171368 [en línea] <https://doi.org/10.1098/rsos.171368>.
- Barcia, R. (2022), "Ventas 2021: Los 10 Vehículos Híbridos y Eléctricos más vendidos en Uruguay", *Autoblog Uruguay*, [en línea] <https://www.autoblog.com.uy/2022/02/ventas-2021-los-10-vehiculos-hibridos-y.html>.
- Bellan, R. (2021) "Ford's \$30B investment in electric revs up in-house battery R&D", *TechCrunch*, <https://techcrunch.com/2021/05/26/fords-30b-investment-in-electric-revs-up-in-house-battery-rd/>.
- Benchmark Mineral Intelligence (2020.a), "China is building one battery Gigafactory a week; the US one every four months: Simon Moores" <https://www.benchmarkminerals.com/membership/china-is-building-one-battery-gigafactory-a-week-the-us-one-every-four-months-simon-moores/>.
- _____ (2020.b) "China controls sway of Electric Vehicle Power through Battery Chemicals, Cathode and Anode Production" [en línea] <https://www.benchmarkminerals.com/membership/china-controls-sway-of-electric-vehicle-power-through-battery-chemicals-cathode-and-anode-production/>.

- Bird R., Baum Z.J., Xiang Yu & Jia Ma (2022), "The Regulatory Environment for Lithium-Ion Battery Recycling" *ACS Energy Lett.*, 2022, 7, 2 [en línea] <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02724>.
- Bloomberg NEF (*Bloomberg New Energy Finance*) (2021.a), *EVO Electric Vehicle Outlook 2021* [en línea] <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>.
- _____ (2021.b) *Bloomberg Law*, [en línea] <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/electric-vehicles-to-drive-massive-battery-demand-bnef-chart>.
- _____ (2021.c) <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>.
- _____ (2021.d) "BloombergNEF's global EV outlook 2021: Commercial vehicles" [en línea] <https://www.bloomberg.com/professional/blog/bloombergnefs-global-ev-outlook-2021-commercial-vehicles/>.
- _____ (2020) <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
- BOE (Boletín Oficial del Estado, España) (2021), Real Decreto 27/2021, [en línea] <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-796>.
- Bohlsen (2021) "2021 looks likely to be a great year for EVs, especially Li-Ion battery manufacturers" [en línea] <https://seekingalpha.com/article/4411026-2021-looks-likely-to-be-great-year-for-evs-especially-battery-manufacturers>.
- Bower, G. (2018) "Tesla Panasonic Quietly Outmaneuver All Lithium Battery Manufacturers" [en línea] <https://insideevs.com/news/338268/tesla-panasonic-quietly-outmaneuver-all-lithium-battery-manufacturers/>.
- Brown, R. (2021) "Zinc-ion batteries are a scalable alternative to Lithium-ion" *Power Magazine* [en línea] <https://www.powermag.com/zinc-ion-batteries-are-a-scalable-alternative-to-lithium-ion/>.
- Busch, J. (2020) "New GB Standard GB 18384-2020 about Electric Vehicles Safety Requirements" [en línea] <https://www.china-certification.com/en/new-gb-standard-gb-18384-2020-about-electric-vehicles-safety-requirements/>.
- Call2Recycle, [en línea] <https://www.call2recycle.org/recycling-laws-by-state/>.
- Castelvecchi, D. (2021) "Electric cars and batteries: how will the world produce enough?", *Nature*, News Feature, Aug 17, 2021 [en línea] <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02222-1>.
- CEA (Clean Energy Association) (2021) ESS Supplier Market Intelligence Program H1 2021 [en línea] <https://www.cea3.com/cea-blog/energy-storage-system-supplier-market-intelligence-report-h1-2021>.
- _____ (2021.b) <https://www.cea3.com/cea-blog/lithium-ion-battery-cell-production-capacity-exceed-2500-gwh-by-2025>.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2020) "Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad" (LC/SES.38/3-P/Rev.1), Santiago, 2020. [en línea] <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46227-construir-un-nuevo-futuro-recuperacion-transformadora-igualdad-sostenibilidad>.
- _____ (2021), "Propuesta de marco regulatorio para acelerar la inversión en electromovilidad mediante la reconversión de vehículos que usan combustibles fósiles", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/129) [en línea] https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47369/4/S2100609_es.pdf.
- Circle Economy, (2022). "The Circularity Gap Report" [en línea] <https://www.circularity-gap.world/global>
- Clerc J., Pereira A.M., Alfaro C. y Yunis, C. (2021) "Economía circular y valorización de metales: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos", *serie Medio Ambiente y Desarrollo*, N° 171 (LC/TS.2021/151), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [en línea] <https://cepal.org/es/publicaciones/47429-economia-circular-valorizacion-metales-residuos-aparatos-electricos-electronicos>.
- Colthorpe, A (2022) "Overcoming the great disconnect in the battery storage supply chain" *Energy Storage News*, [en línea] <https://www.energy-storage.news/overcoming-the-great-disconnect-in-the-battery-storage-supply-chain/>.

- _____(2020) "Renault batteries find 'megawatt-scale' 2nd life use in Belgium" *Energy Storage News*, [en línea] <https://www.energy-storage.news/renault-batteries-find-megawatt-scale-2nd-life-use-in-belgium/>.
- _____(2019) "China to 'dominate recycling and second life battery market worth US\$45bn by 2030'" *Energy Storage News*, [en línea] <https://www.energy-storage.news/china-to-dominate-recycling-and-second-life-battery-market-worth-us45bn-by-2030/>.
- Conzen, J. (2019) "Addressing Safety Concerns At Energy Storage Systems Using Lithium-Ion Technology" [en línea] <https://www.jensenhughes.com/insights/addressing-safety-concerns-at-energy-storage-systems-using-lithium-ion-technology>.
- Comisión Europea (2020) "Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular" [en línea] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_420.
- CONPES 3934 (2018) (Consejo Nacional de Política Económica y Social), "Política de Crecimiento Verde", Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia, [en línea] <https://www.anla.gov.co/eureka/normatividad/politicas/2243-conpes-3934-de-2018-politica-de-crecimiento-verde>.
- ____3943 (2018) "Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire", [en línea] <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>.(COP26, 2021) Sitio oficial [en línea] <https://ukcop26.org/>.
- ____<https://unfccc.int/conference/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021>.
- ____<https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/cambio-climatico/2021-11-10/una-treintena-de-paises-y-6-grandes-fabricantes-se-alian-para-terminar-con-el-coche-de-combustion-en-2035.html>.
- Crompton, P. (2021), "China on verge of banning large-scale ESSs using second-life lithium-ion batteries" *Batteries and Energy Storage Technology (Best) Magazine*, [en línea] <https://www.bestmag.co.uk/china-verge-banning-large-scale-esss-using-second-life-lithium-ion-batteries/>.
- ____(2016) "2nd-life EV batteries to form largest storage system of its kind" [en línea] <https://www.bestmag.co.uk/2nd-life-ev-batteries-form-largest-storage-system-its-kind/>.
- Davies, C. (2017) "BMW's Battery Graveyard Gives EV Cast-Offs A Second Life" [en línea] <https://www.slashgear.com/bmws-battery-graveyard-gives-ev-cast-offs-a-second-life-26505613>.
- DEC (Department of Environmental Conservation, NY State) <https://www.dec.ny.gov/chemical/72065.html>
- Deign, J. (2018) "Lithium-ion's end of life is not the dead end you think", *Energy Storage Report* [en línea] <http://energystoragereport.info/lithium-ions-end-of-life-is-not-the-dead-end-you-think/>.
- De Miguel, C., Martínez, K., Pereira, M. y Kohout, M., (2021) "Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/120), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47309-economia-circular-america-latina-caribe-oportunidad-recuperacion-transformadora>.
- Diekmann, J.; Hanisch, C.; Froböse, L.; Schällicke, G.; Loellhoeffel, T.; Fölster, A.; Kwade, A (2017). "Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes" (2017), *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, A6184–A6191 [en línea] <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0271701jes/pdf>.
- DOE (Department of Energy), (2021) "DOE Announces \$209 Million for Electric Vehicles Battery Research" [en línea] <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-209-million-electric-vehicles-battery-research>.
- ____(2021.a), "National Blueprint for Lithium Batteries 2021-2030" [en línea] <https://www.energy.gov/ee/vehicles/articles/national-blueprint-lithium-batteries>.
- ____(2021.b), "FOTW [Fact of the Week] #1217, December 20, 2021: Thirteen New Electric Vehicle Battery Plants Are Planned in the U.S. Within the Next Five Years" [en línea] <https://www.energy.gov/ee/vehicles/articles/fotw-1217-december-20-2021-thirteen-new-electric-vehicle-battery-plants-are>.
- Doughty, D. H. & Roth, E. P. (2012), "A general discussion of Li ion battery safety". *Electrochem. Soc. Interface* 21, 37–44. [en línea] <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F03122if>.
- EAF0 (European Alternative Fuel Observatory) [en línea] <https://www.eafo.eu/knowledge-center/european-vehicle-categories>.
- EEA (European Environment Agency) (2021) [en línea] <https://www.eea.europa.eu/ims/co2-performance-of-new-passenger>.

- Edel, Dan (2019), "Recycled Lithium Battery Market Could Reach \$6 Billion by 2030" [en línea] <https://www.intelligentliving.co/recycled-lithium-battery-market-reach-6-billion-2030/>.
- Ellen MacArthur Foundation (2015), "Delivering the Circular Economy: A Toolkit for Policymakers" [en línea] <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-toolkit-for-policymakers>.
- Els, F. (2022), "Add another 1m tonnes to annual copper demand from EVs", *Mining.com* [en línea] <https://www.mining.com/add-another-1m-tonnes-to-annual-copper-demand-from-evs/>.
- Enel (2022) "Enel launches innovative "Second Life" storage system for used electric car batteries in Melilla, Spain", [en línea] <https://www.enel.com/media/explore/search-press-releases/press/2022/03/enel-launches-innovative-second-life-storage-system-for-used-electric-car-batteries-in-melilla-spain->.
- EU Raw Materials, (2020) [en línea] https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.
- Enernews (2021), "Electromovilidad: Expertos alertan escasez de metales" [en línea] <http://enernews.com/nota/338907/autos-electricos-expertos-alertan-escasez-de-metales>.
- Engineering 360 (recup. 2022) [en línea] <https://standards.globalspec.com/topics/lithium-ion-battery-IEC-standards>.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2021), "An Analysis of Lithium-ion Battery Fires in Waste Management and Recycling" [en línea] https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-08/lithium-ion-battery-report-update-7.01_508.pdf.
- European Commission (2022) "European Commission and U.S. Department of Energy support collaboration between the European Battery Alliance and U.S. Li-Bridge Alliance to strengthen supply chain" [en línea] https://ec.europa.eu/growth/news/european-commission-and-us-department-energy-support-collaboration-between-european-battery-alliance-2022-03-14_en.
- _____ (2020) "Proposal for a Regulation of The European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020" (10/12/2020) [en línea] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:798:FIN>.
- _____ (2019.a), "Commission Staff Working Document on the Evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC", (09/04/2019) [en línea] https://ec.europa.eu/info/news/commission-publishes-evaluation-eu-batteries-directive-2019-apr-09-0_en.
- _____ (2019.b) "Report From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions on the implementation and the impact on the environment and the functioning of the internal market of Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC" [en línea] https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/report_implementation_batteries_directive.pdf.
- Fitzgerald, G., Mandel, J., Morris, J. and Touati, H. (2015) "The Economics of Battery Energy Storage: How multi-use, customer-sited batteries deliver the most services and value to customers and the grid." Rocky Mountain Institute (RMI), [en línea] <https://rmi.org/insight/the-economics-of-battery-energy-storage-how-multi-use-customer-sited-batteries-deliver-the-most-services-and-value-to-customers-and-the-grid-executive-summary/>.
- Flexer V., Baspineiro C.F., Galli C.I., (2018) "Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing", *Science of the Total Environment*, [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>.
- GES (German Energy Solutions Initiative) (2017), "Flexibilizing the grid and storing green electricity with used traction batteries: the BMW storage farm in Leipzig" [en línea] <https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/EN/News/2019/20190131-bmw-storage-leipzig.html>.
- Gibb, K. (2015) "A Look Inside Apple iPhone 6 Plus Battery" [en línea] <https://www.eetimes.com/a-look-inside-apple-iphone-6-plus-battery/4/>.
- Gilmour, Jim (2017), "Battery failure on a Toyota Prius", *Auto Technician*, Aug.21, 2017, [en línea] <https://autotechnician.co.uk/battery-failure-on-a-toyota-prius-by-jim-gilmour/>.

- Global Battery Alliance (2021), "A Framework for the Safe and Efficient Global Movement of Batteries" [en línea] <https://www.globalbattery.org/media/action-partnerships/energy-access/downloads/wef-battery-alliance-opportunity-statement-2021.pdf>.
- Global Times (2021), "China's EV battery recycles to peak in 2025, requiring policy support" [en línea] <https://www.globaltimes.cn/page/202106/1226776.shtml>.
- Gobierno de Colombia (2019) "Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica" [en línea] <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>.
- _____ (2018), "Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022", Departamento Nacional de Planeación de Colombia, [en línea] <https://www.dnp.gov.co/DNPN/Paginas/Plan-Nacional-de-Desarrollo.aspx>.
- Gobierno de Uruguay, (2021), [en línea] <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/omnibus-electricos-evitaron-consumo-615000-litros-combustible-durante-primer>.
- Guangjin Zhao (2017) "Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries", Wiley & Sons.
- Hampel, C. (2022) "Battery reuse & recycling expands to scale in China", *Electrive*, [en línea] <https://www.electrive.com/2022/01/29/battery-reuse-recycling-expands-to-scale-in-china/>.
- _____ (2020) "Renault presents two second-life battery projects", *Electrive*, [en línea] <https://www.electrive.com/2020/10/21/renault-presents-two-second-life-battery-projects/>.
- Hannan, M.A.; Hoque, M.M.; Hussain, A.; Yusof, Y.; Ker, P.J. (2018) "State-of-the-art and energy management systems of Li-ion batteries in EV applications: Issues and recommendations". *IEEE Access* 2018, 6, 19362–19378 [en línea] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8320763>.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., Anderson, P. (2019), "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles", *Nature* 575, 75–86 [en línea] <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
- Hill, N., Clarke, D., Blair, L., Menadue, H. (2019), "Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles", Publications Office of the European Union, Luxembourg, [en línea] <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117790>.
- Holland, M. (2018) "2018 Leaf Vs Long Journeys — Can It Take The Heat?" [en línea] <https://cleantech.nica.com/2018/07/16/2018-leaf-vs-long-journeys-can-it-take-the-heat/>.
- Hübner, J. (recuperado 2022) "VW Hybrid Battery Packs", *Openinverter.org*, [en línea] https://openinverter.org/wiki/VW_Hybrid_Battery_Packs.
- Huisman, J., Leroy, P., Tertre, F., Ljunggren Söderman, M., Chancerel, P., Cassard, D., Løvik, A.N., Wäger, P., Kushnir, D., Rotter, V.S., Mähltz, P., Herreras, L., Emmerich, J., Hallberg, A., Habib, H., Wagner, M., Downes, S. (2017), *Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report*, December 21, 2017, Brussels, Belgium [en línea] http://prosumproject.eu/sites/default/files/DIGITAL_Final_Report.pdf.
- ICA (International Copper Alliance) (2021) "Responsible Copper: #Environment Infographic" [en línea] <https://copperalliance.org/resource/responsible-copper-environment-infographic/>.
- _____ (2021.b) "Circular Economy" [en línea] <https://copperalliance.org/policy-focus/society-economy/circular-economy/>.
- _____ (2020), "EV Motors Boost Copper Demand" [en línea] <https://copperalliance.org/es/resource/ev-motors-boost-copper-demand/>.
- _____ (2019), "2.3 Million Tonne Energy Storage Boost for Copper" [en línea] <https://copperalliance.org/>.
- IEA (International Energy Agency) (2021), *Global EV Outlook 2021*, [en línea] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- Irle, Roland (2022) "Global EV Sales for 2021" *EV-Volumes.com*, visitado Feb.2022, [en línea] <https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>.
- ITDP (Institute for Transportation and Development Policy) (2019) "The Electric Assist: Leveraging E-Bikes and E-Scooters for More Livable Cities" [en línea] <https://www.itdp.org/publication/electric-assist/>.
- Jacoby, Mitch (2019) "It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries" [en línea] <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>.

- JATO (2022.a) European EV press Release (2022.02.02) "In 2021, Battery Electric Vehicles made up one in ten new cars registered in Europe" <https://www.jato.com/in-2021-battery-electric-vehicles-made-up-one-in-ten-new-cars-registered-in-europe/>.
- _____ (2022.b) (2022.01.24) <https://www.jato.com/the-golf-topped-the-market-strong-results-for-tesla/>.
- _____ (2022.c) "European demand for BEVs and PHEVs overtakes diesels in March 2022" <https://www.jato.com/european-demand-for-bevs-and-phevs-overtakes-diesels-in-march-2022/>.
- Kanakamedala S. y Ghantous D. (2021) "Electric Vehicles: The Perilous State of Battery Safety" *Medium* [en línea] <https://medium.com/batterybits/electric-vehicles-the-perilous-state-of-battery-safety-4efa85bc6b4>.
- Kane, M. (2018) "Nissan LEAF 40-kWh Battery: Deep Dive", *inside EVs*, [en línea] <https://insideevs.com/news/338432/nissan-leaf-40-kwh-battery-deep-dive/>.
- Kelleher Environmental (2019), "Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles: The Technical, Environmental, Economic, Energy and Cost Implications of Reusing and Recycling EV Batteries", Project Report prepared for the American Petroleum Institute, [en línea] <https://kelleherenvironmental.com/projects/energy-climate-change/>.
- Kim, M. S. (2020) "Lithium Metal Anode for Batteries" [en línea] <http://large.stanford.edu/courses/2020/ph240/kim1/>.
- Kim Byung-wook (2021) "Samsung SDI logs record battery R&D spending in 2020", *The Korea Herald*, <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210309001035>.
- Kong, L., Li, C., Jiang, J. & Pecht, M. (2018), Li-ion battery fire hazards and safety strategies. *Energies* 11, 2191 (2018), [en línea] <https://doi.org/10.3390/en11092191>.
- Kumagai, J. (2021), "Lithium-Ion Battery Recycling Finally Takes Off In North America And Europe", *IEEE Spectrum* [en línea] <https://spectrum.ieee.org/lithiumion-battery-recycling-finally-takes-off-in-north-america-and-europe>. Traducción al español en *World Energy Trade* [en línea] <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/electricidad/el-reciclaje-de-baterias-de-iones-de-litio-finalmente-despega-en-america-del-norte-y-europa>.
- Kwade, A. y Diekmann, J. (Ed.) (2018) "Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way" Springer, [en línea] <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9>.
- Lambert, Fred (2016) "Breakdown of raw materials in Tesla's batteries and possible bottlenecks" [en línea] <https://electrek.co/2016/11/01/breakdown-raw-materials-tesla-batteries-possible-bottleneck/>.
- _____ (2021) "13 battery gigafactories coming to the US by 2025 – ushering new era of US battery production" [en línea] <https://electrek.co/2021/12/27/13-battery-gigafactories-coming-us-2025-usher-new-era/>.
- Lansink, A. (2018), "Challenging changes: connecting waste hierarchy and circular economy", *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 36, N° 10, Thousand Oaks, SAGE Publications [en línea] <https://doi.org/10.1177/0734242X18795600>.
- _____ (2017) "Challenging Changes – Connecting Waste Hierarchy and Circular Economy", *The Netherlands: LEA Nijmegen*.
- Lee, A. (2022) "China's New Wave of Electric Car Battery Giants Are Going Public", *Bloomberg* (recuperado de: <https://finance.yahoo.com/news/china-wave-electric-car-battery-104206395.html>).
- Lehmann, Harry (editor) (2018), "Factor X. Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources", Springer, [en línea] <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50079-9>.
- Li, W., Yang, M., Long R., Mamaril K., and Chi, Y. (2020), "Treatment of Electric Vehicle Battery Waste in China: a review of existing policies", *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* [en línea] <https://doi.org/10.3846/jeelm.2021.14220>.
- Liang An (Ed.) (2019) "Recycling Of Spent Lithium-Ion Batteries: Processing Methods And Environmental Impacts", Springer, [en línea] <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31834-5>.
- Maluf, N. (2015) "Inside The Battery Of A Nissan Leaf" [en línea] <https://qnovo.com/inside-the-battery-of-a-nissan-leaf/>.
- _____ (2015.b) "Is there enough Lithium?" [en línea] <https://qnovo.com/is-there-enough-lithium/>.
- _____ (2015.c) "The inner sanctum of a battery & fast charging" [en línea].
- Manthey, N. (2018) "Renault to install Europe's largest 2nd life battery storage", *Electrive*, [en línea] <https://www.electrive.com/2018/09/26/renault-to-install-europes-largest-2nd-life-battery-storage/>.

- Marcos, D., Garmendia, M., Crego, J., Cortajarena, J.A. (2021) "Functional Safety BMS Design Methodology for Automotive Lithium-Based Batteries", *Energies*, 14, 6942 <https://doi.org/10.3390/en14216942>.
- Martinez-Laserna, E., Sarasketa-Zabala, E., Stroe, D.I., Swierczynski, M., Warnecke, A., Timmermans, J.M., Goutam, S., Rodriguez, P. (2016) "Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, [en línea] <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855090>.
- Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badedo, J., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Goikoetxea, A. (2018), "Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art", *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 93, 701–718, [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>.
- Melin, Hans Eric (2021), "The lithium-ion battery life cycle report". [En línea, bajo suscripción] <https://circularenenergystorage.com/>.
- _____ (2018.a) "The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study", World Economic Forum [en línea] https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf.
- _____ (2018.b) [en línea] <https://circularenenergystorage.com/articles/2018/8/15/why-asia-is-dominating-the-lithium-ion-battery-recycling-market>.
- _____ (2022) "There is no such thing as status que in battery reuse and recycling" [en línea] <https://circularenenergystorage.com/articles/2022/2/25/there-is-no-such-thing-as-status-que-in-battery-reuse-and-recycling>.
- Mercedes-Benz (2016) "World's largest 2nd-use battery storage is starting up" [en línea] <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Worlds-largest-2nd-use-battery-storage-is-starting-up.xhtml?oid=13634457>.
- Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., Yokochi, A., (2019) "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements", *Energies* 12(6):1074 [en línea] <https://doi.org/10.3390/en12061074>.
- Millikin, Mike (2021) "BloombergNEF: battery metals rebounding; by 2030, annual Li-ion battery demand to pass 2TWh" *Green Car Congress* [en línea] <https://www.greencarcongress.com/2021/07/20210701-bnef.html>.
- Mining Press (2022.a) (17/02/2022), "Litio subió 400%: Fabricantes en problemas" [en línea] <https://miningpress.com/nota/344848/litio-subio-400-fabricantes-en-problemas>.
- _____ (2022.b) (08/02/2022) "Electromovilidad impulsa a níquel, cobalto y litio" [en línea] <https://miningpress.com/relacionada/80bc99b39c9b76013a0a2967ecb1a16c/electromovilidad-impulsa-a-niquel-cobalto-y-litio>.
- MINAMB (2021.a) Ministerio de Ambiente de Uruguay, "Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022 – 2032" [en línea] <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/uruguay-ya-cuenta-plan-nacional-gestion-residuos>.
- _____ (2021.b) "Estrategia Climática de Largo Plazo de Uruguay" [en línea] <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/estrategia-climatica-largo-plazo-uruguay>.
- Mock, J. (2020), "Recycling Plants Are Catching On Fire, And Lithium-Ion Batteries Are To Blame", *The Verge*, [en línea] <https://www.theverge.com/2020/2/28/21156477/recycling-plants-fire-batteries-rechargeable-smartphone-lithium-ion>.
- Morris, C. (2015) "AKASOL supplies battery systems for Cologne e-buses" *Charged Electric Vehicles Magazine*, [en línea] <https://chargedevs.com/newswire/akasol-supplies-battery-systems-for-cologne-e-buses>.
- MOVE (2019) [en línea] <https://movelatam.org/la-sociedad-civil-latinoamericana-define-hoja-de-ruta-para-acelerar-la-movilidad-sostenible-en-la-region/>.
- MOVÉS (2022) [en línea] <https://moves.gub.uy/iniciativa/reglamentacion-de-baterias/>.
- Na Jiao (2018), "China Tower can 'absorb' 2 million retired electric vehicle batteries" *IdTechEx* [en línea] <https://www.idtechex.com/de/research-article/china-tower-can-absorb-2-million-retired-electric-vehicle-batteries/15460>.
- Nagpure, S. (2020) "New Horizons in global battery R&D and investments" *Emerging Technology News*, [en línea] <https://etn.news/energy-storage/new-horizons-in-global-battery-r-d-and-investments>.
- NFPA (National Fire Protection Association) (2016), "Lithium ion batteries hazard and use assessment" Forum [en línea] <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Hazardous-Materials/Lithium-ion-batteries-hazard-and-use-assessment>.

- Nelson, Benjamin (2015), canal de Youtube: BenjaminNelson. "Taking apart a Nissan LEAF battery pack" Parte 1. [en línea] <https://www.youtube.com/watch?v=hodDHJKzX78> y parte 2. <https://www.youtube.com/watch?v=aRhHleEucro>.
- Noya, C. (2020) "Rumor. Nissan comenzará a instalar pack de 40 kWh en los LEAF de primera generación con la batería degradada", *foro coches eléctricos* [en línea] <https://forococheselectricos.com/2020/01/rumor-nissan-comenzara-a-instalar-pack-de-40-kwh-en-los-leaf-de-primera-generacion.html>.
- Nissan, (2019) [en línea] https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html.
- Northvolt, (2021) "Northvolt produces first fully recycled battery cell – looks towards establishing 125,000 ton/year giga recycling plant" [en línea] <https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>.
- Obaya, M. y Céspedes, M. (2021) "Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: implicaciones para los países del triángulo del litio", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/58), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. Forum [en línea] https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46943/S2100250_es.pdf.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2016) "Extended Producer Responsibility. Updated Guidance for Efficient Waste Management" [en línea] <https://www.oecd.org/environment/waste/extended-producer-responsibility-9789264256385-en.htm>.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas), (2021) "La COP26 se cierra con un acuerdo climático "de compromiso", pero insuficiente, dice António Guterres" [en línea] <https://news.un.org/es/story/2021/11/1499972>.
- _____ (2019) Manual de Pruebas y Criterios (Manual of Tests and Criteria), publicado por UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) [en línea], <https://unece.org/about-manual-tests-and-criteria> (allí se puede obtener una versión en español del Manual).
- Pagliari M. y Meneguzzo F. (2019) "Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight" *Heliyon* [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>.
- Paul, Sonali, (2022) "Factbox: World faces shortage of lithium for electric vehicle batteries", Reuters, 21/01/22 [en línea] <https://www.reuters.com/technology/world-faces-shortage-lithium-electric-vehicle-batteries-2022-01-21/>.
- Penke, M. (2021) "How China's mines rule the market of critical raw materials" (Deutsche Welle) [en línea] <https://www.dw.com/en/how-chinas-mines-rule-the-market-of-critical-raw-materials/a-57148375>
- _____ (2021.b) Metodología y Datos en "Critical Raw Materials", <https://github.com/dw-data/crm>.
- Pettigrew, S. y Delgado, O. (2022), ICCT (International Council on Clean Transportation) "¿Puede Colombia convertirse en el Líder de Transporte Limpio de América Latina?" [en línea] <https://theicct.org/latam-colombia-transporte-limpio-feb22/>.
- PNUMA (2021) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). "Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe 2020". Oficina para América Latina y el Caribe, Panamá [en línea] www.movelatam.org/informe2020 o bien <https://movelatam.org/4ta-edicion>.
- _____ (2020). "Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe 2019". Oficina para América Latina y el Caribe, Panamá [en línea] <https://movelatam.org/transicion/>.
- Portaluppi, A. (2021) ""Caso testigo": Altero recicla las primeras baterías de movilidad eléctrica en Colombia" *Portal Movilidad* [en línea] <https://portalmovilidad.com/caso-testigo-altero-recicla-las-primeras-baterias-de-movilidad-electrica-en-colombia/>.
- _____ (2021.a) "Batx: la empresa colombiana que reutiliza baterías de vehículos eléctricos para almacenamiento" *Portal Movilidad* [en línea] <https://portalmovilidad.com/batx-la-empresa-colombiana-que-reutiliza-baterias-de-vehiculos-electricos-para-almacenamiento/>.
- PRBA (Portable Rechargeable Battery Association) [en línea] <https://www.prba.org/>.
- Programa MOVÉS (2022), "Hacia un sistema de movilidad urbana eficiente y sostenible en Uruguay" [en línea] <https://moves.gub.uy/>.
- Programa SUBITE (2022), Ministerio de Industria y Energía de Uruguay, [en línea] <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/convocatorias/subite-programa-incorporacion-vehiculos-electricos-1a-convocatoria>.

- Pyper, J. (2015) "Automakers on Second-Life Batteries for the Grid 'We Want a Foot in the Door of This Market'" *Greentech Media* [en línea] <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Automakers-on-Second-Life-Batteries-For-the-Grid-We-Want-a-Foot-in-the-Do>.
- Raad, J. (2022), "Macroeconomic Themes ~ Graphite Stock Picks - February 2022", *Barclay Pearce Capital*, [en línea] <https://www.barclaypearce.com.au/blog/macroeconomic-themes-graphite-stock-picks-february-2022>.
- Rajzman, N. (2021), "Oportunidades y desafíos para la minería en Argentina. Estudio de caso: mercado global de cobre". *Documentos de Trabajo del CCE* N° 6, abril de 2021, Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación, Rep. Argentina [en línea] https://back.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/03/dt_6_-_oportunidades_y_desafios_para_la_mineria_en_argentina.pdf.
- Randall, C. (2021), "CATL presents sodium-ion battery design" [en línea] <https://www.electrive.com/2021/07/29/catl-presents-sodium-ion-battery-design/>.
- Rankin, Malique (2022) "Plant manager: Lithium battery explosion sparked shred yard fire" [en línea] <https://www.wtsp.com/article/news/local/lithium-battery-explosion-sparked-shred-yard-fire-manatee-county/67-38ebeae8-2e4e-46b1-8b93-4c99a2630a03>.
- Rathi, A. (2021) "Iron battery breakthrough could eat Lithium's lunch" *Bloomberg*, [en línea] <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-30/iron-battery-breakthrough-could-eat-lithium-s-lunch>.
- Reid, G. & Julve, J. (2016), "Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies" (BEE), *Bundesverbandes Erneubare Energie & Hannover Messe* [en línea] https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf.
- Rethink Waste (2021), <https://rethinkwaste.org/residents/hard-to-recycle/rethink-batteries-2021/>.
- _____ (2018), "Got Batteries?" [en línea] https://issuu.com/news_review/docs/batt_081718.
- _____ (2017), "Shoreway Operations and Contract Management" [en línea] https://rethinkwaste.org/wp-content/uploads/legacy_media/111617-shoreway-operations.original.pdf.
- Residuos Profesional (2022), "La Comisión de Medio Ambiente del Parlamento Europeo adopta nuevas normas sobre el ciclo de vida de las baterías" [en línea] <https://www.residuosprofesional.com/pe-adopta-normas-ciclo-de-vida-baterias/>.
- Rincón Jaramillo, D. (2022) "Colombia. Marco normativo para el cambio de la matriz energética de la movilidad urbana" [en línea] <https://la.network/colombia-marco-normativo-para-el-cambio-de-la-matriz-energetica-en-materia-de-transporte-las-tecnologias-vehiculares/>.
- Rojas, N. Y., (2007) "Aire y problemas ambientales de Bogotá", Foro Nacional Ambiental, [En línea] <https://foronacionalambiental.org.co/publicaciones/detalle/documento-de-politica-publica-no-18-aire-y-problemas-ambientales-de-bogota/>.
- Roselló, Emiliano (2020), "Evaluación sobre distintas clasificaciones de los residuos de Baterías de Litio" Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente del Uruguay. No publicado.
- San Mateo County (2019), "Final Resting Place", San Mateo County Environmental Health Services [en línea] https://issuu.com/news_review/docs/smbatt_032019.
- Samsung (2017), "Galaxy Note 7: What We Discovered" [en línea] <https://news.samsung.com/global/infographic-galaxy-note7-what-we-discovered>.
- Sheng-Lun L., Kuo-Lin H., I-Ching W., I-Cheng C., Yi-Ming K., Chung-Hsien H. & Chitsan L. (2016), "Characterization of Spent Nickel-Metal Hydride Batteries and a Preliminary Economic Evaluation of the Recovery Processes" *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 66:3, 296-306, [en línea] <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2015.1131206>.
- Smee, Jess (2017), "Cobalt mining conditions cast shadow over electric transport dreams", *Deutsche Welle (DW)* [en línea] <https://www.dw.com/en/cobalt-mining-conditions-cast-shadow-over-electric-transport-dreams/a-41370039>.
- Smith Corona (2022) "Your 2022 Guide to Lithium Battery Labels" [en línea] <https://www.smithcorona.com/blog/2022-guide-to-lithium-battery-labels/>.
- StartUS (2020) Startus Insight [en línea] <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-battery-recycling-startups-impacting-the-energy-industry/>.

- Statista, (2021) "Electric Cars Boost Metal Demand" [en línea] <https://www.statista.com/chart/23842/metal-demand-increase/>.
- Steward, D., Mayyas, A. & Mann, M., (2019), "Economics and challenges of Li-ion battery recycling from end-of-life vehicles", *Procedia Manufacturing*, 33, 272–279 [en línea] <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.033>.
- Stokes, A. (2019) "A Little Battery, A Lot of Harm" contenido en San Mateo County (2019).
- Sustainable Bus (2021) "Lithium-ion battery technology in e-buses, according to BMZ Poland" [en línea] <https://www.sustainable-bus.com/news/bmz-poland-lithium-ion-battery-technology-electric-buses/>.
- Taborelli, M. (2021.a) "Chile presentó su estrategia nacional de movilidad sostenible", *Energía Estratégica*, <https://portalmovilidad.com/chile-presento-su-estrategia-nacional-de-movilidad-sostenible/>.
- _____. (2021.b) "El detalle de las medidas en electromovilidad de la estrategia de movilidad sostenible de Chile", *Energía Estratégica*, [en línea] <https://portalmovilidad.com/el-detalle-de-las-medidas-en-electromovilidad-de-la-estrategia-de-movilidad-sostenible-de-chile/>.
- _____. (2022), "El Gobierno de Chile define regulación para segunda vida de baterías de vehículos eléctricos", *Energía Estratégica*, [en línea] <https://portalmovilidad.com/el-gobierno-de-chile-define-regulacion-para-segunda-vida-de-baterias-de-vehiculos-electricos/>.
- Tasaki, T. (2014) "The Recycling Scheme for Compact Rechargeable Batteries in Japan - under the Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources" [en línea] https://www.oecd.org/environment/waste/EPR_Japan_battery.pdf.
- Tedjar, F. (2013), "Challenge for Recycling Advanced EV Batteries" (Recupyl), at International Battery Association Meeting 2013 [en línea] <http://congresses.icmab.es/iba2013/images/files/Friday/Morning/Farouk%20Tedjar.pdf>.
- Terazono A., Oguchi M., Iino S., Mogi S. (2015) "Battery collection in municipal waste management in Japan: Challenges for hazardous substance control and safety", *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.038>.
- TN (2022) "Siete de cada diez jóvenes están de acuerdo con prohibir los autos nafteros y diésel desde 2030" [en línea] <https://tn.com.ar/autos/novedades/2022/05/18/siete-de-cada-diez-jovenes-estan-de-acuerdo-con-prohibir-los-autos-nafteros-y-diesel-desde-2030/>.
- Transport & Environment, 2022 "Battery Electric Cars climbed to 9% of sales in 2021, driven by EU targets" [en línea] <https://www.transportenvironment.org/discover/battery-electric-cars-climb-to-9-of-sales-driven-by-eu-targets/>
- _____. (2019), *Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025* [en línea] https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2019_07_TE_electric_cars_report_final.pdf.
- Transporte Carretero (2020) "Ficha Técnica: Yutong Híbrido - La opción vigente y rentable para el transporte" [en línea] <https://www.transportecarretero.com.uy/noticias/vehiculo-del-mes/yutong-hibrido.html>
- TÜV (recup. 2022) [en línea] <https://www.tuvsud.com/en-us/industries/mobility-and-automotive/automotive-and-oem/automotive-testing-solutions/battery-testing/iec-62133>.
- Uhde, H. y Spurná, V. (2021) "Can Aluminium-air batteries outperform Li-ion for EVs?" (EnergyPost.eu) [en línea] <https://energypost.eu/can-aluminium-air-batteries-outperform-li-ion-for-evs/>.
- UNCTAD (2020), *Commodities at a glance. Special issue on strategic battery raw materials* [en línea] https://unctad.org/system/files/official-document/ditccom2019d5_en.pdf.
- UNESCO (2019) "Colombia: Ley N° 1.955/2019. Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad y Bases del Plan Nacional" <https://siteal.iiep.unesco.org/bdnp/3682/ley-ndeg-19552019-plan-nacional-desarrollo-2018-2022-pacto-colombia-pacto-equidad-bases> (En esta referencia se encuentra dicho Plan Nacional).
- UOL (2021) "Proposal for a New Battery Directive" [en línea] <https://www.ul.com/news/proposal-new-battery-directive>.
- U.S. Geological Survey (2021), "Mineral commodity summaries 2021", [en línea] <https://doi.org/10.3133/mcs2021>.
- Voelcker, J. (2007). "Lithium batteries take to the road". *IEEE Spectrum*, 44(9), 26–31 [en línea] <https://ieeexplore.ieee.org/document/4296454>.

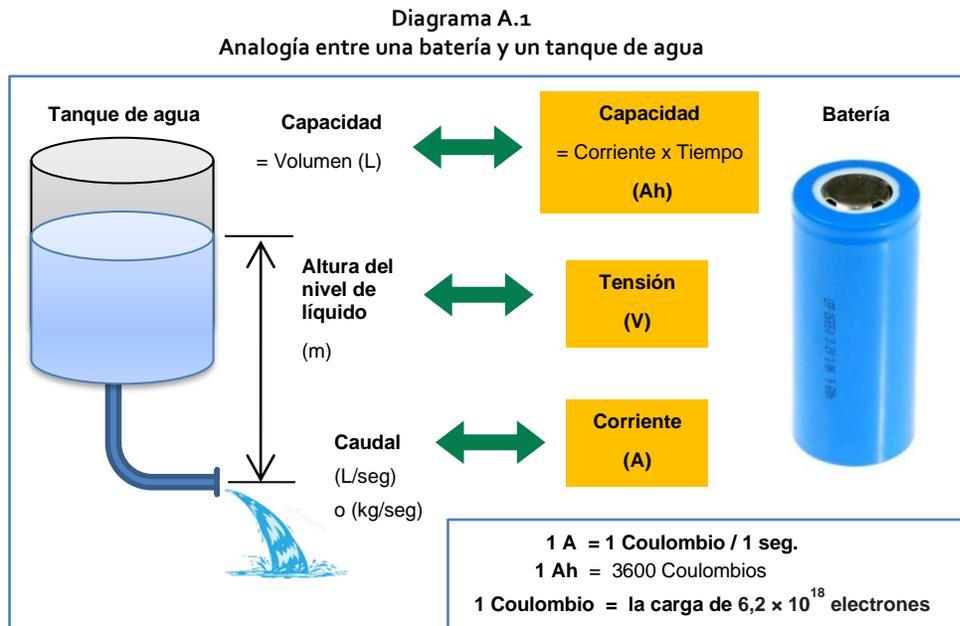
- VW Newsroom (2021) [en línea] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/e-mobility-3921> [en línea] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/id5-in-series-production-volkswagen-successfully-transforms-zwickau-site-into-an-electric-vehicle-production-plant-7748>.
- Wang M. M., Zhang C. C., Zhang F. S. (2016), "An environmental benign process for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries by mechanochemical approach" *Waste Manag*, 51, 239 (2016) [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.006>.
- Wang Y., Chen R., Chen T., Lv H., Zhu G., Ma L., Wang C., Jin Z., Liu J. (2016), "Emerging non-lithium ion batteries", *Energy Storage Materials*, Volume 4, 2016, [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.04.001>.
- Wayland, M. (2021) "Tesla will change the type of battery cells it uses in all its standard-range cars" CNBC, [en línea] <https://www.cnbc.com/2021/10/20/tesla-switching-to-lfp-batteries-in-all-standard-range-cars.html>.
- WeberAuto (2018.a) "Chevrolet Bolt EV 57kWh Extracción de batería" [en línea] <https://www.youtube.com/watch?v=N3G8JGsEjPA>.
- _____ (2018.b) "Desmontaje de la batería del Chevrolet Bolt EV" [en línea] https://www.youtube.com/watch?v=ssU2mjiNi_Q&t=18s.
- Weyerer, G. (2021), "Battery recycling gains speed as new EU regulation pushes investment", *Deutsche Welle*, [en línea] <https://www.dw.com/en/battery-recycling-gains-speed-as-new-eu-regulation-pushes-investment/a-57933200>.
- WHO (2017) "Recycling used lead-acid batteries: health considerations" <https://www.who.int/publications/i/item/recycling-used-lead-acid-batteries-health-considerations>.
- Wood Mackenzie (2022) "Global lithium-ion battery capacity to rise five-fold by 2030, supply to remain tight until 2023" [en línea] <https://www.woodmac.com/press-releases/global-lithium-ion-battery-capacity-to-rise-five-fold-by-2030/>.
- WSP Ambiental y RIGK Chile (2020), "Asesoría para la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile Producto Prioritario Pilas, Informe Final", Ministerio del Medio Ambiente, Chile. Disponible [en línea] <https://rechile.mma.gob.cl/expedientes-para-pilas/> (Estudio 7.).
- Xinhua Silk Road Database (2021), "China boosts battery recycling amid decommissioning surge" [en línea] <https://en.imsilkroad.com/p/325385.html>.
- Zagorodny, J. P. (2022), "La movilidad eléctrica requiere el desarrollo de la minería sustentable" [en línea] <https://www.cronista.com/columnistas/la-movilidad-electrica-requiere-el-desarrollo-de-la-mineria-sustentable/>.
- Zenn, Roland (2021.a), "Li-on Battery Gigafactories in Europe (January 2021)" [en línea] <https://www.oroel.net/insights/li-on-battery-gigafactories-in-europe-january-2021>.
- _____ (2021.b), "Deployed Lithium Batteries in Electric Cars H1 2021 Results" [en línea] <https://www.oroel.net/insights/roland-zenn-lithium-battery-market-h1-2021>.
- Zhu, J., Mathews, I., Dongsheng, R., Wei Li, Cogswell, D., Bobin, X., Sedlatschek, T., Kantareddy, S.N.R., Mengchao Yi, Tao Gao, Yong Xia, Qing Zhou, Wierzbicki, T., Bazant, M.Z., "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries" *Cell Reports Physical Science* 2, 100537, August 18, (2021) [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>.
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., Pasaoglu, G. (2018), "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292–308 [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>.

Anexo

Anexo

Conceptos eléctricos de baterías

En este apartado se dan conceptos para entender cómo trabaja una batería desde el punto de vista eléctrico, y familiarizarse con las unidades, para luego ampliar detalles sobre los equipos eléctricos que suelen acompañar a las baterías. Quizá lo más práctico para poder imaginarse cómo trabaja una batería sea la analogía con un tanque de agua. En el diagrama A.1 la analogía es con una celda elemental.



Fuente: Elaboración propia.

Mientras que un tanque de agua acumula una cantidad de masa o volumen del líquido, las reacciones químicas en una celda electroquímica producen una acumulación de carga eléctrica, otra clase de fluido cuya cantidad es llamada "carga". Esta última se forma por las pequeñas partículas cargadas negativamente (electrones, y iones negativos) o positivamente (otros iones, positivos), que al acumularse en las placas de las celdas contribuyen a la cantidad total de carga.

Siguiendo con la analogía, los parámetros eléctricos más relevantes de una batería son los siguientes:

- Tensión o voltaje (en voltios V), es una medida de la fuerza impulsora o la potencialidad para realizar trabajo, como será explicado más abajo. Correspondería a la altura del nivel del líquido en un tanque: cuanto más alto, mayor será el caudal abajo. En ciertas condiciones se la llama también fuerza electromotriz.
- Corriente (en ampere A) es una medida del caudal de cargas eléctricas, o el ritmo o velocidad al que éstas fluyen. Se define 1 ampere = 1 coulombio / 1 segundo, porque es una unidad de carga (en culombio C) por cada unidad de tiempo en segundos.
- Capacidad (en ampere-hora, Ah), es una medida de cantidad de carga eléctrica que soporta el acumulador, que también podría haber sido referida en o culombios. Se define 1 Ah = 3600 C, porque es la carga en coulombios que transita por algún punto de un circuito, o se acumula o sale de un acumulador, a una corriente de 1 ampere, durante 3.600 segundos o 1 hora.

La capacidad está relacionada con la corriente a través del tiempo:

$$\text{Capacidad} = \text{Corriente} \times \text{Tiempo}$$

Si una batería tiene una capacidad de 100 amper- hora, abreviado "Ah", significa que podrá acumular 100 amperes por 3.600 segundos, esto es igual a 360.000 coulombios de carga, aunque pueda no tolerar esa corriente. Estos amperes se pueden cargar o descargar de muchas maneras distintas según la corriente de carga o descarga que se use. Así, por ejemplo 100 Ah se podrían descargar si la batería soporta esas corrientes mediante:

- una corriente de 10 amperes durante 10 horas, o
- una corriente de 1 ampere durante 100 horas, o
- una corriente de 20 amperes durante 5 horas, o
- una corriente de 50 amperes durante 2 horas, etc.

Una batería de ciclo profundo generalmente tolera bajas corrientes por muchas horas, una batería de arranque de un coche tolera muy altas corrientes, del orden de 500 amperes, por pocos segundos.

Ahora se entiende que ampere-hora (Ah) es una unidad de carga, un paquete que contiene una cantidad de carga. No debe confundirse entonces amperes por hora con ampere, que es la unidad de corriente. La "h" aquí es muy importante, hace toda la diferencia.

La energía en física se mide en joules o julios, abreviado "J", que coincide también con la unidad de trabajo, que tiene unidades de fuerza x distancia. Hay que recordar que 1 joule, es igual a 1 newton (fuerza) por 1 m (distancia).

Sin embargo, en ingeniería eléctrica hay una unidad más práctica para la energía, y es el watt-hora (Wh). Se la conoce más en sus múltiplos "kWh" (1000 Wh), "MWh" (1.000 kWh) y "GWh" (1.000 MWh). (Observar mayúsculas y minúsculas). Veamos cómo se relacionan con la unidad joule.

Watt o vatio, abreviado "W", es la unidad de potencia, que es el ritmo o velocidad al que se realiza trabajo, o lo que es equivalente, al que se transfiere, o se convierte, o se acumula, o se consume, la energía. Esto es:

$$\text{Potencia (W)} = \text{Energía (J)} / \text{Tiempo (segundos)};$$

$$\text{o lo que es equivalente: } \text{Energía (J)} = \text{Potencia (W)} \times \text{Tiempo (segundos)}$$

De modo que, se define: $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$, o bien, $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ s}$ (segundo se abrevia "s").

Y entonces la unidad de energía "Wh" se define como la cantidad de energía que se transfiere, convierte o acumula o consume en una máquina, incluyendo una batería, y trabajando a una potencia de 1 W durante 3.600 segundos (= 1 hora), es decir que se define: $1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ joule}$. O sea que watt-hora (Wh) es una unidad de energía, un paquete que contiene una cantidad de energía. No debe confundirse entonces "Wh" con "W". Al igual que en el caso de Ah, la "h" aquí es muy importante, hace toda la diferencia.

Se ve que las unidades "Ah" y "Wh" son muy parecidas, en que son la "cantidad" de algo (carga y energía, respectivamente), así como "A" y "W" son muy parecidas, en que son un ritmo o velocidad ala que algo pasa.

En efecto, en el mundo de la electricidad estas cantidades están relacionadas, porque la potencia ("W") en el mundo de la electricidad está relacionada con la corriente ("A") mediante la tensión ("V"):

$$\text{Potencia (W)} = \text{Tensión (V)} \times \text{Corriente (A)}$$

Aquí por simplicidad se supone el uso de corriente continua (CC o "DC" en inglés), porque aquí se habla de unidades para baterías, que trabajan en CC. La extensión para corriente alterna (CA o "AC" en inglés) es directa y se entiende después de conocer estos conceptos más simples.

Si se multiplica la ecuación anterior por el tiempo a ambos lados, se obtiene la ecuación correspondiente para la energía:

$$\text{Potencia (W)} \times \text{Tiempo (s)} = \text{Tensión (V)} \times \text{Corriente (A)} \times \text{Tiempo (s)}$$

$$\text{Energía (J)} = \text{Tensión (V)} \times \text{Corriente (A)} \times \text{Tiempo (s)}$$

Y así, multiplicando por 3.600 segundos (= 1 hora) para pasar a las unidades de ingeniería:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A} \quad (\text{Potencia eléctrica})$$

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ h} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ Ah} \quad (\text{Energía eléctrica})$$

De modo que 1 Wh es una cantidad de energía que puede usarse a distintos ritmos, o sea a distintas corrientes, y además, para el caso de una batería, se llegó a la relación entre la "capacidad de energía" (Wh) y la capacidad de carga (Ah). Ahora se puede ver algunos ejemplos.

Si la batería anterior, que tenía 100 Ah de capacidad, tiene una tensión nominal de 12 V (una típica batería de plomo-ácido), entonces ¿cuánta energía nominal contiene?:

$$\text{Energía: } 12 \text{ V} \times 100 \text{ Ah} = 1.200 \text{ Wh} = 1,2 \text{ kWh.}$$

Si se la descarga en 20 horas, ¿a qué corriente y potencia ocurre ese proceso?

$$\text{Corriente: } 100 \text{ Ah} / 20 \text{ horas} = 5 \text{ A, y la Potencia: } 12 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 60 \text{ W.}$$

Si se la descarga en 2 horas, ¿a qué corriente y potencia ocurre ese proceso?

$$\text{Corriente: } 100 \text{ Ah} / 2 \text{ horas} = 50 \text{ A, y la Potencia: } 12 \text{ V} \times 50 \text{ A} = 600 \text{ W.}$$

Con estos conceptos ya se puede hacer cualquier cálculo relacionado a las variables eléctricas de las baterías: Tensión (V), Corriente (A), Capacidad (Ah), Energía (Wh) y Potencia (W).

Las baterías trabajan en corriente continua (CC). Si se quiere inyectar su energía en una red de distribución, para un distrito o para un hogar, se debe convertir su tensión continua al valor de la red, que usará corriente alterna (CA), es decir, se necesitará convertir la tensión constante a una onda sinusoidal de tensión con cierta amplitud (por ejemplo, 220V) y frecuencia (50 o 60 Hz). Esto es lo que ocurre en un inversor o *inverter* que se conecta al banco de baterías en los grandes sistemas de almacenamiento estacionario (o *Energy Storage System* o *ESS*) para acoplarla a redes de distribución.

Por otro lado, al momento de recargar una batería desde una red, que trabaja en corriente alterna, la tarea de convertir de corriente alterna a continua es realizada por un cargador.

A veces se necesita acoplar muchas baterías juntas en paralelo en un conector central que está en corriente continua, o "barra" o "bus de continua". En este caso, por norma de seguridad, sería necesario que se intercalen equipos llamados convertidores o conversores entre las baterías y el bus de corriente continua, para poder adaptar las tensiones y de ese modo controlar mejor las corrientes desde y hacia cada batería.

Recuérdese que una batería tiene un recorrido de tensión, es decir, no está siempre a la misma tensión, sino que su tensión varía de acuerdo con el estado de carga, entre 2 valores permisibles que no dañen la batería y esto debe tenerse en cuenta al conectarlas entre sí, y en el diseño de un sistema eléctrico que las conecte. Por ejemplo, una batería de plomo-ácido de tensión nominal 12 V puede variar su tensión, dependiendo el tipo de batería, entre unos 10 - 11 V (descargada) y unos 13 - 14 V (cargada

al 100%). O bien, una celda de litio de tensión nominal 3,6 V, puede variar su tensión entre unos 2,8 - 3 V (descargada) y unos 3,9 a 4,1 V (cargada 100%).

También se usan convertidores cuando en un vehículo la batería tiene una tensión alta (300 a 800 V) y se necesita una tensión adicional de 12 V para los servicios auxiliares (luces, bombas de freno, ventilación, etc).

Los BMS de las baterías deben poder intercambiar datos, con estas 3 clases de equipos: inversores (DC/AC), cargadores (AC/DC) y convertidores (DC/DC), para asegurar que el control maestro del sistema toma las decisiones correctas basadas en el conocimiento del estado de la batería (temperatura, SoC, estado de salud, etc.). El control maestro del sistema de energía suele llamarse EMS (Energy Management System). En un auto podría ser la computadora de abordaje, en un vehículo eléctrico es el controlador principal, que controla al motor, en base a los accionamientos del conductor.

Cuando la batería es grande, como la de un auto eléctrico, los sistemas BMS están formados por varias partes (placas de circuitos integrados), correspondiendo a cada una de las secciones o partes de la propia batería, que también conversan con el sistema maestro del BMS. Esto se debe a que las baterías grandes pueden tener partes ubicadas en distintos lugares de las aplicaciones, como en un auto, o en un rack que contiene módulos de baterías.

Esto es lo que se denomina en electrónica una arquitectura distribuida o "maestro/esclavo" (*master/slave*). De este modo el nombre BMS (*Battery Management System*) propiamente dicho se reserva para la unidad maestro, que obtiene información de las unidades esclavo que se llaman entonces BMU (*Battery Monitoring Unit*). Los BMU no tienen ninguna función de control, solo de monitoreo, y pasan los datos al BMS, que bajo ciertas condiciones puede tomar la decisión de cortar la corriente total, y que pasa los datos principales a la unidad de control superior (ya sea un inversor, un cargador, o un controlador, etc.).

Algunos fabricantes de vehículos o aplicaciones que contienen BMS con tecnología propietaria pueden proteger sus equipos de la intromisión no autorizada mediante claves de acceso. De allí que en esos casos sea necesario contar con la autorización de los fabricantes para cualquier intervención que involucre desarmar y re-armar una batería que contenga esos BMS.



NACIONES UNIDAS

Serie

C E P A L

Medio Ambiente y Desarrollo**Números publicados**

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

173. Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular, Juan Pablo Zagorodny (LC/TS.2023/36), 2023.
172. Avances institucionales y normativos para la gestión integral de pasivos ambientales mineros en Colombia, Mauricio Cabrera Leal y Milena Ordóñez Potes (LC/TS.2022/12), 2022.
171. Economía circular y valorización de metales: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, Jacques Clerc, Ana María Pereira, Constanza Alfaro y Constanza Yunis (LC/TS.2021/151), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), agosto 2021.
170. Metodologías para el uso de factores de emisión: material particulado en depósitos de relaves abandonados, Matías Silva y Gonzalo Suazo (LC/TS.2020/92), 2020.
169. Iniciativas para transparentar los aspectos ambientales y sociales en las cadenas de abastecimiento de la minería: Tendencias internacionales y desafíos para los países andinos, Annie Dufey (LC/TS.2020/48), 2020.
168. Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú, María Chappuis (LC/TS.2019/126), 2019.
167. Compensaciones por pérdida de biodiversidad y su aplicación en la minería: los casos de la Argentina, Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú, Victoria Alonso, Mariana Ayala y Paula Chamas (LC/TS.2019/125), 2019.
166. Derechos de acceso en asuntos ambientales en el Perú: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Isabel Calle (LC/TS.2018/90), 2018.
165. Derechos de acceso en asuntos ambientales en el Ecuador: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Daniel Barragán (LC/TS.2017/65), 2017.
164. Derechos de acceso en asuntos ambientales en Colombia: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Lina Muñoz Ávila (LC/L.4280), 2016.
163. Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras: Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú, Ángela Oblasser (LC/L.4208), 2016.

MEDIOAMBIENTE Y DESARROLLO

Números publicados:

- 173 Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular
Juan Pablo Zagorodny
- 172 Avances institucionales y normativos para la gestión integral de pasivos ambientales mineros en Colombia
Mauricio Cabrera Leal y Milena Ordóñez Potes
- 171 Economía circular y valorización de metales
Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
Jacques Clerc, Ana María Pereira, Constanza Alfaro y Constanza Yunis
- 170 Metodologías para el uso de factores de emisión
Material particulado en depósitos de relaves abandonados
Matías Silva y Gonzalo Suazo



Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
www.cepal.org



LC/TS.2023/36