



25TH ANNIVERSARY
2000-2025

Q & A

PREGUNTAS Y RESPUESTAS:

RECICLAJE DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (VE)

Marzo 2025

www.no-burn.org/batteries/#ev





25TH ANNIVERSARY
2000-2025

Preguntas y Respuestas:

Reciclaje de baterías de vehículos eléctricos (VE)

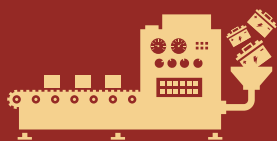
CONTENIDOS:

- ¿Por qué es importante reciclar baterías de VE?
- ¿Qué sucede con las baterías de VE una vez que han sido removidas del vehículo?
- ¿Cómo es el reciclaje efectivo de las baterías de VE?
- ¿Cuáles son las actuales vías de reciclaje propuestas para las baterías de VE?
- ¿En qué se diferencian la pirometalurgia, la hidrometalurgia y el reciclaje directo?
- ¿Cuáles son los obstáculos para ampliar las nuevas tecnologías de reciclaje de baterías de VE?
- Además de ampliar las nuevas tecnologías, ¿hay otros desafíos para el reciclaje de baterías?
- ¿Reducirá el reciclaje de baterías de VE la extracción de minerales vírgenes?
- ¿Cuáles son las recomendaciones de GAIA para proceder en el futuro?
- Glosario



¿Por qué es importante reciclar baterías de VE?

De acuerdo con el Grupo intergubernamental de expertos por el cambio climático (GIECC), en 2019 el sector del transporte fue responsable de al rededor del 15 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y del 23 % de las emisiones mundiales de CO2 relacionadas con la energía. Dentro de ese sector, los vehículos motorizados generaron el 70 % de las emisiones directas.



Se considera necesario y crucial que se produzca un cambio en el sector del transporte de la dependencia de combustibles fósiles a la electrificación para que los países puedan reducir sus emisiones GEI. Esta confianza se ve reflejada en el aumento de las inversiones públicas, privadas y de financiamiento de desarrollo a nivel mundial para la electrificación del sector del transporte, y en el creciente mercado de vehículos eléctricos (VE), incluyendo trenes, buses, automóviles de pasajeros, vehículos de dos y tres ruedas, bicicletas eléctricas y más. La electrificación del transporte está provocando una exorbitante demanda de extracción, procesamiento y refinación de minerales para la transición (también llamados críticos). Sumado a esto, la capacidad de fabricación de baterías excede significativamente la demanda prevista al menos hasta el 2030.

El aumento de la demanda de minerales y de fabricación de baterías conlleva el riesgo de emisiones tóxicas y de GEI, violaciones a los derechos humanos e impactos ecológicos concentrados en determinadas zonas geográficas del Sur global y a menudo en territorios indígenas. Las baterías que han llegado al final de su vida útil exponen a las comunidades, a los trabajadores y recicladores a residuos peligrosos y a riesgos de incendios y explosiones.

Dadas las condiciones geopolíticas, la gestión del final de la vida útil mediante la recuperación de mineral (especialmente el reciclaje de baterías de VE) es vista por los gobiernos, industrias y diversos grupos sociales civiles como una solución para suplir la demanda de minerales para la transición y para cumplir los objetivos nacionales de producción de baterías. El reciclaje de baterías promete menores emisiones de GEI, uso de tierra y agua, y otros impactos ambientales que la extracción y refinación de minerales primarios. No obstante, el reciclaje es solo un componente en un proceso mucho más amplio de soluciones residuos cero para conservar materiales y reducir emisiones GEI.

El primer paso es repensar y rediseñar los sistemas y productos para evitar la sobreproducción de baterías y la huella ecológica de sus materiales, a la vez que se extiende su vida útil (y se reduce el total de emisiones GEI consideradas) a través de la reparación y reaprovechamiento, previniendo que los materiales puedan ser reciclados y recuperados de manera segura como materia prima para nuevas baterías de VE.



¿Qué sucede con las baterías de VE una vez que han sido retiradas del vehículo?



(c) Electric Scooter Insider

La mayor parte de las baterías de VE que se han fabricado siguen circulando hoy en día. Esto comenzará a cambiar [al rededor del 2030 debido a que una gran cantidad de estas baterías alcanzará el final de su vida útil](#). Por el momento, se tiene poco conocimiento sobre el destino de las baterías usadas una vez que han sido removidas de un VE. Mucha de la información que se comparte actualmente en las noticias y los informes sobre lo que sucede con estas baterías al final de su vida útil se basa en el reciclaje de los restos de fabricación (una materia prima homogénea y predecible), o en el reciclaje de dispositivos electrónicos de consumo y especulaciones sobre lo que podría ocurrir en el futuro a escala comercial.

Ciertas referencias sostienen que [menos del 5 % de las baterías de vehículos eléctricos de iones de litio están siendo recicladas](#) a nivel mundial; sin embargo, esta información es difícil de verificar por diversas razones. Por ejemplo, en China, las estadísticas están limitadas a los informes de los pocos recicladores aprobados por el gobierno (o en lista blanca), y excluyen las baterías [recolectadas y almacenadas para su posterior procesamiento por los posiblemente miles de recicladores informales](#).

Los [enormes packs de baterías](#) que se utilizan en los VE pesan alrededor de 450 kg y, se retiran del vehículo una vez que su capacidad disminuye a [menos del 80 % de la inicial](#), usualmente después de 10 a 20 años de uso, según tecnologías actuales. Esta estimación se basa en la química actual de las baterías, que evolucionan rápidamente, lo cual podría derivar en que en el futuro estas tengan una mayor duración. Cuando se remueve una batería de un VE, si cumple ciertos estándares de calidad y diseño, puede ser [reutilizada en una segunda vida útil como almacenamiento estacionario](#), lo que alarga su utilidad otros 10 años o más. Sin embargo, casi no hay información disponible sobre cuántas baterías son reutilizadas en una segunda vida útil ni cuál es su destino final. Por lo tanto, se requiere una mayor transparencia en la cadena de custodia de una batería a través de su ciclo de vida completo, es decir, desde su fabricación, su uso en el vehículo, su segunda vida, hasta su reciclaje y descarte final.



¿Cómo es el reciclaje efectivo de las baterías de VE?

Un proceso efectivo de reciclaje de baterías de VE trata y convierte de manera segura todos sus componentes en materiales reutilizables para el mismo uso industrial o similar, pero solo una vez que se hayan agotado todos sus usos. Este proceso evita el uso de productos químicos intensamente peligrosos, el incendio de las baterías e impactos ambientales adversos, específicamente emisiones tóxicas en el aire y subproductos de residuos peligrosos.

Criterios de justicia ambiental para evaluar el reciclaje de baterías de VE

GAIA desarrolló las siguientes preguntas para evaluar la efectividad de los procesos de reciclaje de baterías de VE propuestos, maximizando cada indicador positivo y minimizando los criterios negativos:



RECUPERACIÓN DE MATERIALES E INTENSIDAD DE ENERGÍA



¿Cuáles son las verdaderas **tasas de recuperación** de todos los materiales (no solo los de transición) reciclados al final de la vida útil de las baterías de VE?



¿Cuál es el **destino de los materiales** (balance de masa) que entran en la cadena de reciclaje, incluyendo aquellos que son incinerados, desechados en el vertedero o de otra manera?



¿Cuál es la **intensidad de las emisiones y del uso de la energía** del proceso de recolección, logística y reciclaje, incluyendo las emisiones incorporadas de los insumos (por ejemplo, para producir los ácidos y productos químicos utilizados en procesos de reciclaje)?



RIESGOS DE TOXICIDAD, AIRE Y AGUA



¿Cuáles son los riesgos de toxicidad de las emisiones contaminantes del aire e impactos para los territorios y comunidades situadas en primera línea durante la totalidad del proceso de recolección y reciclaje?



¿Cuáles son los **efluentes hídricos y los riesgos de contaminación** para las comunidades situadas en primera línea?



¿Cuál es la **intensidad del uso de agua y la carga de las aguas residuales** de las distintas opciones de reciclaje? ¿Qué ocurre con las aguas residuales? ¿Qué cantidades se tratan, de qué manera y dónde se descartan? ¿Cuál es su destino final?



RESPONSABILIDAD DEL FABRICANTE



¿Cuánta energía se utiliza, cuál es el impacto ambiental y cuál es el costo del **sistema logístico para recolectar y transportar** las baterías usadas desde el lugar donde fueron removidas del vehículo hasta la planta de reciclaje? ¿Quién es responsable por los costos y de su funcionamiento?



¿En qué medida están **diseñadas** las baterías para un reciclaje seguro y efectivo? ¿Cómo se puede incentivar a los fabricantes para que diseñen baterías con un aprovechamiento máximo de los materiales?



REPARTICIÓN DE LOS BENEFICIOS



¿Qué **beneficios existen para las comunidades y sectores marginalizados** involucrados en la cadena de valor de reciclaje de baterías para VE? ¿Cuál es el procedimiento para establecer dichos beneficios y cómo se pueden maximizar, a la vez que se minimizan los riesgos y cargas para las comunidades?



COMERCIO DE RESIDUOS



¿Qué sistemas y **medidas de protección existen para la exportación de baterías usadas** a fin de garantizar una gestión responsable de los residuos de baterías al final de su vida útil, incluyendo un reciclaje seguro y efectivo?



¿Cuáles son las actuales vías de reciclaje propuestas para las baterías de VE?

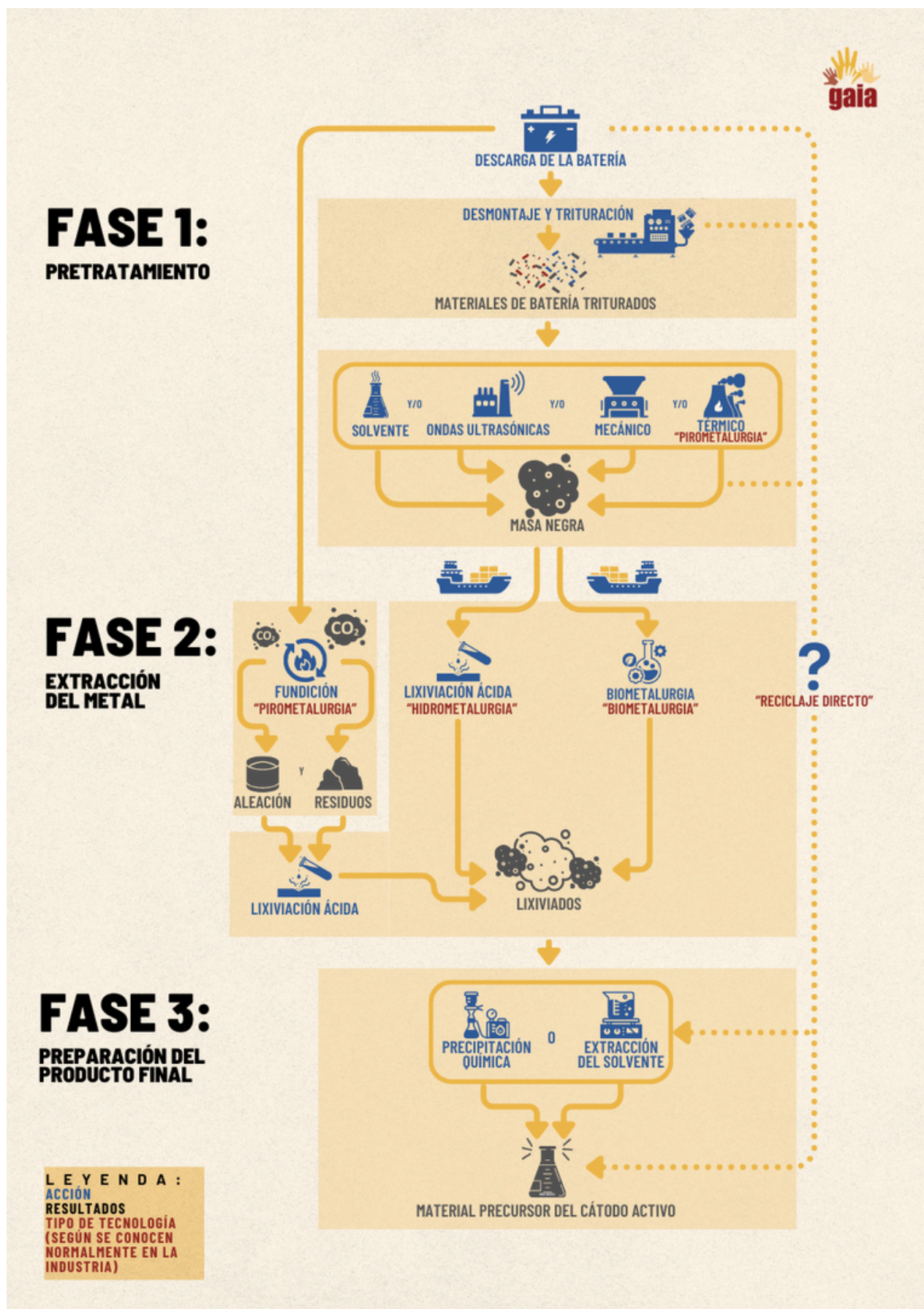
Los motores de VE utilizan baterías de tracción; las más utilizadas son las baterías de iones de litio (LIB), que son complementadas con baterías de plomo-ácido en la mayoría de los vehículos.

Existen diversos tipos de baterías de iones de litio según los distintos productos químicos utilizados, como las de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC), las de óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA), las de óxido de litio y cobalto (LCO), las de óxido de litio y manganeso (LMO) y las de fosfato de hierro y litio (LFP), entre otras. Los distintos tipos afectan las

estrategias de recuperación y la valoración de las baterías de iones de litio al final de su vida útil. Dicho esto, no todas las vías mencionadas más adelante son opciones viables para cada composición química de las baterías de iones de litio en VE.

Con el objetivo de entregar una guía general, a continuación, se explican algunas de las vías más frecuentes para reciclar baterías de iones de litio (normalmente con cobalto o con cátodos ricos en níquel) como un proceso con diversas fases:

■■■ Propuesta de fases para el reciclaje de baterías de VE





Fase 1: Pretratamiento

En esta fase, las baterías son descargadas y dismanteladas. A continuación, para remover el separador, el electrolito y los adhesivos a base de flúor, se aplican procesos como el desmontaje mecánico, la trituración en seco y en húmedo, la disolución con solventes, la separación asistida por ultrasonidos y los [tratamientos térmicos](#) a temperaturas de entre 400 y 700 °C (como la pirólisis o la calcinación). La fase de pretratamiento producirá una masa negra que continúa siendo procesada en una segunda fase. Esta primera fase [se puede omitir](#) cuando los materiales de las baterías han sido incinerados o fundidos.



Fase 2: Extracción del metal

Existen diversas maneras para extraer metales de los materiales de las baterías:



FUNDICIÓN

Los procesos de alta temperatura como la incineración o la fundición, conocidos colectivamente como pirometalurgia, abarcan una amplia variedad de tratamientos térmicos. Estos procesos, aplicados a baterías de iones de litio gastadas o a materiales de batería mezclados, a temperaturas de entre 1 400 hasta los 1700 °C, generan una aleación.



LIXIVIACIÓN ÁCIDA

La lixiviación ácida (conocida como hidrometalurgia), es actualmente la opción más utilizada para extraer metales de la masa negra o de una aleación, empleando grandes cantidades de ácidos tóxicos y solventes. Este proceso genera lixiviado, que es un líquido que contiene metales.



BIOMETALURGIA

Han surgido nuevas propuestas, como utilizar lixiviados con ácidos inorgánicos u orgánicos (conocido como biometalurgia) o utilizar electricidad como catalizador para ayudar a separar y extraer los materiales valiosos de las baterías (conocido como electrometalurgia). Estos procesos generan lixiviados.



Cualquier combinación y secuencia de las anteriormente mencionadas y otras que se encuentran en desarrollo.



Fase 3: Preparación del producto final

Esta fase tiene como objetivo separar los metales de los lixiviados y convertirlos en materiales aptos para baterías, incluyendo el material precursor del cátodo activo y el material del ánodo. Este proceso puede utilizar extracción con disolvente, flotación, cristalización o precipitación química, entre otros. La preparación del producto final es complicada y puede ser costosa.

Masa negra



(c) Nadine Michollek/DW

La masa negra es un producto intermedio, resultante del ciclo de reciclaje de una batería y se crea al triturar baterías de iones de litio, como se mostró en la fase 1 (pretratamiento) en el diagrama anterior. No existe una definición estandarizada de lo que constituye una masa negra, y su composición exacta varía dependiendo de las baterías tratadas y del proceso de tratamiento empleado. Es un polvo negro que contiene una mezcla de materiales de batería, incluyendo grafito, litio, níquel, cobalto, componentes de flúor inorgánico y disolventes orgánicos halogenados. Muchos de los componentes en una masa negra, incluyendo los dos últimos mencionados, están catalogados como [residuos peligrosos según convenciones internacionales](#) y dañinos para la salud humana. Sin embargo, no siempre se clasifica la masa negra como un residuo peligroso debido a consideraciones económicas y políticas que intentan flexibilizar la normativa de importación. La masa negra se suele producir en un país y exportarse a otro para su procesamiento, como [China](#) o [Corea del Sur](#).

RECICLAJE DIRECTO DE BATERÍAS DE VE

El reciclaje directo es la recuperación, regeneración y reutilización de varios componentes de baterías, como celdas individuales y electrolitos, [sin descomponer su estructura química](#). Esta vía de reciclaje ha sido menos estudiada y está en desarrollo, aun cuando puede ofrecer muchas ventajas, por ejemplo, las tarifas más altas de recuperación de materiales para todos los materiales, costos más bajos, reducción de las emisiones de carbono e intensidad de la energía, y menores riesgos de impactos tóxicos para las comunidades situadas en primera línea. Si bien este proceso sigue en desarrollo, las propuestas actuales sugieren que puede incluir la trituración, separación magnética, flotación por espuma, precipitación con una solución en base a agua, ondas ultrasónicas, [tratamientos térmicos](#), y [relitiación](#) (restauración del cátodo con litio) para revitalizar los materiales activos del cátodo degradados.



¿En qué se diferencian la pirometalurgia, la hidrometalurgia y el reciclaje directo?

Actualmente, la mayor parte de la literatura se enfoca en clasificar las propuestas de reciclaje de baterías de VE en tres categorías distintas: pirometalurgia, hidrometalurgia y reciclaje directo. Como se describió anteriormente, la realidad es más compleja, puesto que la mayoría de los procesos utilizan múltiples fases térmicas y basadas en disolventes

Las siguientes razones hacen que comparar estos procesos sea difícil y, en cierta medida, engañoso:

- Estos términos no están definidos uniformemente y generan mucha confusión. Por ejemplo, mientras que la pirometalurgia es un término tradicionalmente considerado sinónimo de fundición, también se suele referir a una amplia variedad de otros tratamientos térmicos de altas temperaturas a parte de la fundición. Esto significa que algunos de los procedimientos de pretratamiento de la hidrometalurgia, como la calcinación, podrían ser considerados como un tipo de pirometalurgia.
- Sumado a esto, como muestran las tres fases mencionadas anteriormente, la pirometalurgia y la hidrometalurgia están estrechamente [interconectadas](#). Muy a menudo, el reciclaje incluye tanto a la pirometalurgia como a la hidrometalurgia. [Umicore](#) es un claro [ejemplo de tantos](#) que combinan dichas técnicas de reciclaje.
- Además de la fundición, la mayoría de las vías de reciclaje basadas en la hidrometalurgia son tecnologías que aún se encuentran en desarrollo y que requieren una mayor optimización para alcanzar un nivel comercial. Por otro lado, el reciclaje directo sigue en etapa de investigación y desarrollo.



¿Cuáles son los obstáculos para ampliar las nuevas tecnologías de reciclaje de baterías de VE?

Existe poca evidencia que muestre la verdadera capacidad de procesamiento, tasas de recuperación, relación costo-efectividad, y habilidad para tratar tanto residuos de fabricación como baterías de VE posconsumo en cantidades superiores a un volumen reducido.

Para que exista una transición exitosa, desde una prueba piloto o de un proceso de reciclaje de baterías de iones de litio a escala de laboratorio, que funciona bajo condiciones óptimas, hasta una de nivel comercial de gran volumen, aún se deben abordar una serie de barreras técnicas y económicas. Además, la mayoría de las vías de reciclaje propuestas se enfocan primeramente en extraer un par de componentes valiosos, con riesgos de que la mayor parte de los materiales se desperdicie.

Algunos de los obstáculos son:



Económicos

Reciclar para recuperar otros materiales además de los valiosos como el cobalto y el níquel es costoso. Es probable que, para que sean económicamente viables, las nuevas vías de reciclaje requieran de precios con recargos, mecanismos basados en tarifas y distribución de ingresos para los recicladores, o subsidios. Los costos de recuperación de material pueden ser más altos que su valor comercial, especialmente para el litio, el grafito y el manganeso, presentes en los materiales activos del cátodo y en el ánodo. Si bien se han alcanzado altos niveles de recuperación de litio bajo condiciones óptimas de laboratorio, por razones termodinámicas, lograrlo es un desafío y, por tanto, no es económicamente ventajoso. Debido a las condiciones del mercado, puede que siga siendo más económico comprar minerales extraídos en lugar de reciclados; los bajos precios de los metales (especialmente del litio, grafito y manganeso) hacen que no sea conveniente producir materiales para batería recuperados a partir del reciclaje. Por esto, es posible que las plantas de reciclaje que requieren de altos precios de mercado para operar de forma rentable no puedan seguir operativas. Por ejemplo, en 2023, los recicladores de baterías chinos se fueron a quiebra debido al bajo precio del litio.



BATERÍAS VARIABLES Y FALTA DE TRANSPARENCIA

Debido a la falta de divulgación y etiquetado de las muy variables configuraciones y composiciones químicas de las baterías, es un gran desafío poder clasificarlas y probarlas para su óptima reutilización, reaprovechamiento y reciclaje. La materia prima del proceso de reciclaje es altamente variable e impredecible, puesto que se compone de todo tipo de baterías antiguas con distintas configuraciones y composiciones químicas provenientes de decenas de fabricantes distintos. Hasta ahora, la regulación ha fallado en exigir la divulgación de la información necesaria y requisitos de etiquetado estrictos, lo cual hace que sea muy difícil reciclar y clasificar las baterías para su siguiente vida útil.

FUNDICIÓN



(c) Oeko-Institut

La fundición es una tecnología capaz de reciclar distintos compuestos químicos de baterías de litio como, por ejemplo, la planta de reciclaje de baterías de Umicore en Bélgica. Sin embargo, esta no es una nueva tecnología de reciclaje y, por lo general, solo es adecuada para baterías con alto contenido en cobalto o níquel. A pesar de que la fundición combinada con la hidrometalurgia permite recuperar eficazmente el cobalto, el níquel, el cobre y el hierro en cantidades muy cercanas a su concentración original en la batería, este método tiene varios inconvenientes. Aunque relativamente barato y rudimentario, presenta un consumo energético muy alto, genera polvo tóxico, cenizas volantes y gases, y quema gran parte de la masa de la batería, incluyendo el grafito, los aglutinantes y el electrolito.



ALTA SENSIBILIDAD A IMPUREZAS

La efectividad de las vías de reciclaje emergentes que incluyen una fase de hidrometalurgia para el reciclaje de baterías [está basada primeramente en el pretratamiento térmico que se realiza para convertir una batería gastada en una masa negra](#). Las técnicas de hidrometalurgia son muy sensibles a las impurezas, por lo tanto, a no ser que se limpien, la contaminación resultará en un bajo rendimiento, baja calidad del producto o la utilización de más químicos, más energía y más fases de procesamiento. La calidad, a menudo variable, de la masa negra genera sustancias contaminantes que requieren un tratamiento exhaustivo para convertirse en materiales aptos para baterías. Los productos hidrometalúrgicos de alta calidad requieren de mucho tiempo, esfuerzos, recursos y de una gran superficie de planta, lo cual está directamente relacionado con el grado de pretratamiento. Si el pretratamiento no se ejecuta correctamente, las impurezas y la contaminación presentes en la masa negra provocan que la extracción de metales sea mucho más difícil económica y técnicamente hablando. Probablemente, las proporciones de insumos químicos deberán ajustarse significativamente al alza, mientras que los niveles adicionales de contaminación requerirán más insumos y recursos para producir materiales de calidad para baterías.



Además de ampliar las nuevas tecnologías, ¿hay otros desafíos para el reciclaje de baterías?

Las baterías de VE suponen riesgos para cualquier tipo de manipulación, incluyendo su reciclaje.

Este tipo de baterías presentan altos riesgos de incendio en cualquier tipo de manipulación desde su recolección hasta su transporte, reparación, desmontaje, reciclaje y descarte. Las celdas de los iones de litio tienen un [riesgo muy elevado de incendio debido a la fuga térmica](#). Esto ocurre cuando el calor se acumula en la batería más rápido de lo que puede disiparse, causando que la batería expulse gas o incluso que explote. Desde [China](#) hasta [Francia](#), [Hungría](#), [Reino Unido](#) y [Misuri](#) en los Estados Unidos, las plantas de reciclaje de baterías de iones de litio han sufrido de incendios donde se han liberado densas columnas de humo con sustancias químicas tóxicas, resultando en la evacuación forzosa de los residentes e incluso en al menos una muerte.

La configuración de propiedad altamente variable de las baterías de VE hace que desmontarlas sea un verdadero desafío.

[Las baterías de VE no están estandarizadas](#); más de una decena de fabricantes tienen sus propios tamaños (desde baterías para Scooter, automóviles para pasajeros hasta camiones) y formas de baterías (por ejemplo, cilindros, prismas, forma de bolsa).

Las celdas de la batería, los packs y los módulos luego son configurados y soldados para unirlos utilizando distintos aglutinantes y carcasas. Para ilustrar, aún si la construcción en niveles celda-módulo-paquete es común, los fabricantes están optando cada vez más por la configuración tipo celda-paquete o celda-armazón. Estas configuraciones alternativas permiten que las baterías pesen menos, que se utilice menos material y menos tiempo de producción, pero hacen que el [desmontaje sea más difícil](#) y costoso. En resumen, las baterías de VE no están diseñadas para ser reparadas, reutilizadas ni recicladas.

La reciclabilidad de las baterías de VE varía porque el mercado de sus distintas composiciones químicas es fluctuante.

Hoy en día, la mayoría de las baterías de VE son baterías de iones de litio, pero existen muchas baterías con distintas composiciones químicas dentro de esta categoría y los mercados de estas fluctúan constantemente. Mientras que el óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NCM) se mantiene como el compuesto dominante a nivel mundial, el porcentaje de baterías más económicas que no contienen un nivel elevado de cobalto y níquel de calidad (como el fosfato de litio y hierro, LFP) está [aumentado rápidamente a más de un 40 %](#), la mayoría concentrado en China. Esto representa una alta proporción de baterías que no presentan materiales de alta calidad por los que [normalmente se paga para que sean reciclados](#).

Es más, las baterías de plomo ácido siguen siendo comunes en países del Sur global en, por ejemplo, vehículos de dos y tres ruedas, que, en su mayoría, vienen de China. De cara al futuro, se prevén cambios importantes a largo plazo en los tipos de baterías de iones de litio, ya sea pasando de ánodos a base de grafito a ánodos a base de silicio, diferentes composiciones químicas de cátodos, o [abandonando por completo las baterías de iones de litio](#) para pasar a baterías de iones de sodio de estado sólido.

Existe una falta de estándares y objetivos de rendimiento limitados para la recuperación de materiales, emisiones GEI y balances de energía para el reciclaje de baterías.

Gran parte del debate sobre el reciclaje de baterías se concentra en la recuperación de minerales para la transición como el cobalto, cobre, níquel, litio, grafito y manganeso. Este enfoque es muy limitado, ya que los objetivos de reciclaje deberían orientarse más bien a analizar en profundidad el balance de masa y el balance de energía que incluya las emisiones integradas. El análisis del balance de masa debería utilizar [medidas estandarizadas](#) y extenderlas a todos los componentes de las baterías de VE, incluyendo las carcasas plásticas, los aglutinantes fluorados y con electrolitos, y metales como el aluminio, el cobre, el acero en las láminas, entre otros.

Las baterías y las masas negras son inherentemente tóxicas.

Las masas negras contienen altas concentraciones de sustancias peligrosas como [óxidos de cobalto y níquel](#), PM2.5, flúor, arsénico, estaño y cadmio. Tratarlos con procedimientos hidrometalúrgicos puede resultar en emisiones de sulfuro de hidrógeno (H₂S), óxidos de azufre, monóxido de carbono (CO), cloruro de hidrógeno (HCl) y gases que contengan flúor.

Entre un [sinfín de emisiones tóxicas, aguas residuales y otros subproductos](#) que pueden resultar del reciclaje de baterías, las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) generan una preocupación especial, ya que, una vez introducidas, se mantienen permanentemente en el medioambiente y en el cuerpo humano. [Las investigaciones](#) muestran que los tratamientos térmicos durante la fase de pretratamiento donde se crea la masa negra (antes del procesamiento hidrometalúrgico) pueden resultar en una descomposición incompleta de los PFAS, además de la producción y liberación de nuevas y persistentes sustancias fluoradas.

Los trabajadores informales están excluidos del auge del reciclaje y están siendo perjudicados injustamente por el repunte de los residuos de baterías

La economía de los sectores informales está ampliamente excluida del auge del reciclaje de las baterías de iones de litio. Esto perjudica especialmente a los países del Sur global, donde los recolectores y recicladores tendrán que soportar la peor parte del crecimiento de los

residuos de baterías eléctricas como consecuencia de la falta de infraestructura para la gestión de los residuos al final de su vida útil.

Actualmente, en muchos países existen desarrollados ecosistemas de reciclaje informal para baterías de ion de litio, donde los trabajadores deben operar sin protección formal mientras realizan labores peligrosas.

Las fases de reciclaje se externalizan a múltiples compañías.

Todas las fases de reciclaje de baterías, desde la recolección, hasta el pretratamiento, extracción del metal y preparación del material precursor, deben ser evaluadas como un conjunto para determinar el mérito o valor de una de ellas porque son independientes. Esto constituye un desafío debido a que, normalmente, las fases se externalizan a distintas compañías en distintos lugares, lo cual, a menudo, requiere de envíos internacionales.

Los costos de las logísticas de recolección y transporte para el reciclaje de baterías suelen ser altos.

El costo de la recolección y transporte de baterías de VE que han sido removidas de un vehículo pueden alcanzar un estimado del 40 % del total de los costos de reciclaje. Por otra parte, las baterías de VE pueden presentar riesgos de incendios si no se desmantelan correctamente, por lo que es necesario establecer estándares más estrictos de embalaje y capacidad para su transporte a nivel nacional.



¿Reducirá el reciclaje de baterías de VE la extracción de minerales vírgenes?

Es incorrecto simplemente asumir que todos los materiales reciclados van a desplazar la extracción de minerales vírgenes para la producción de baterías. Para que el reciclaje reduzca la extracción de estos materiales, el proceso tendría que ser un circuito cerrado, es decir, tendría que producir materiales reciclados que sean aptos para ser utilizados en baterías y que puedan competir con la extracción de minerales vírgenes para la producción de baterías.

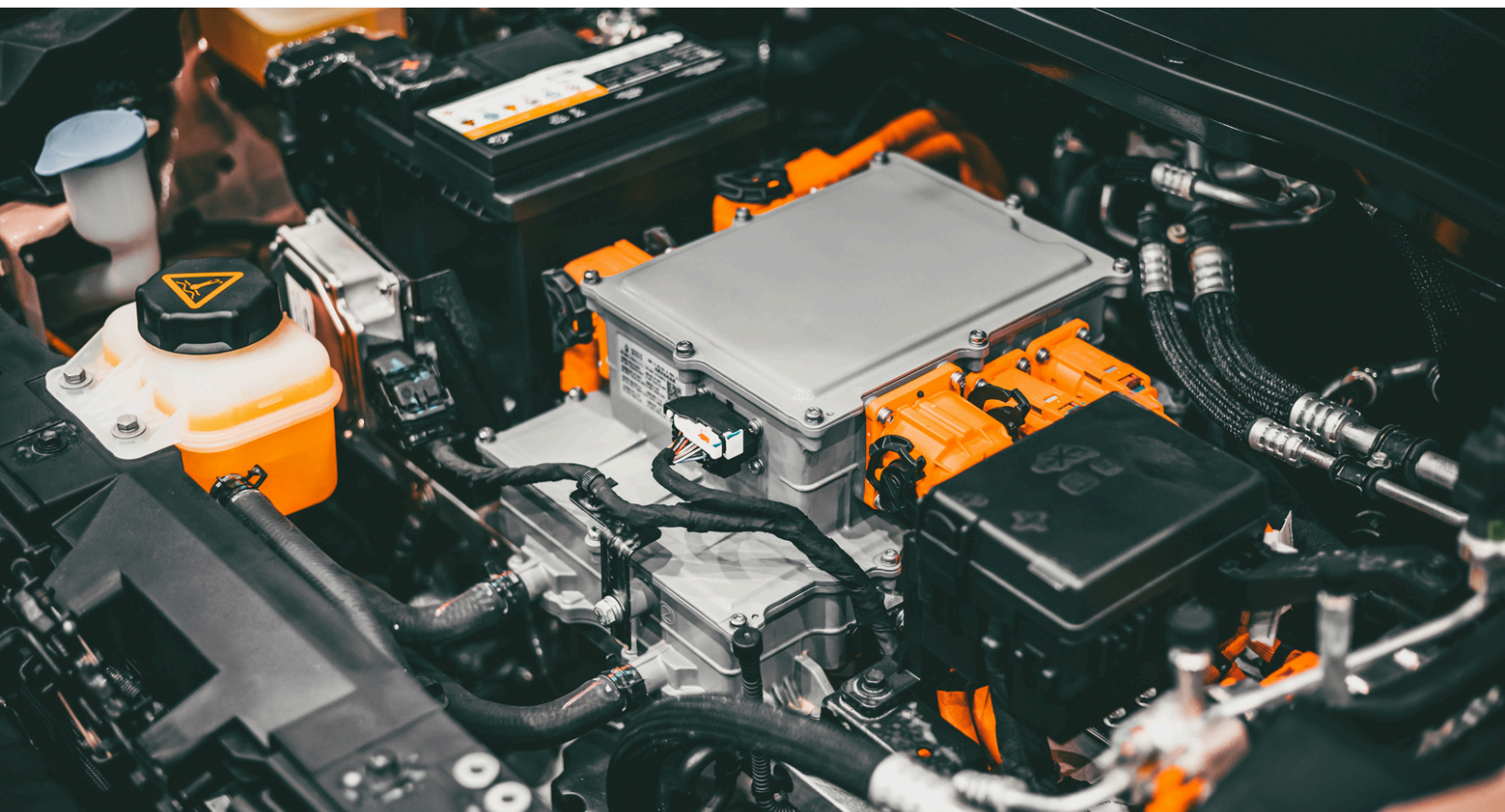
Incluso si ciertos informes declaran que los altos niveles de recuperación de baterías reducirán la demanda de minerales y de producción de baterías, estos análisis parecen estar basados en información de la industria que no se encuentra disponible o que no ha sido revelada, y en suposiciones de que los desafíos mencionados anteriormente serán resueltos de manera exitosa. Aún se desconoce si los obstáculos para ampliar las nuevas tecnologías pueden superarse de manera que:

- 1 mantengan los altos niveles de recuperación a escala de laboratorio;
- 2 lo hagan de manera que produzcan material reciclado apto para ser utilizado en baterías, que sea lo suficientemente competitivo para reemplazar la extracción de minerales vírgenes y la producción de baterías nuevas; y
- 3 que evite provocar daños significativos en las comunidades y ecosistemas.

Si bien el reciclaje presenta bajas emisiones tóxicas y de GEI y menos uso de suelo y degradación que la extracción primaria y refinado de materiales, sigue siendo perjudicial para el medioambiente en términos de emisiones de carbono y sustancias tóxicas derivadas de la recolección y el transporte, así como del consumo de energía, agua y materiales tóxicos en el procesamiento, además del uso de suelo para las plantas de reciclaje de baterías. Estas presiones en el medioambiente solo pueden solucionarse si se emplea un reciclaje efectivo que reemplace la extracción primaria de materiales y la producción de baterías nuevas. Se han establecido anteriormente los numerosos desafíos para alcanzar la circularidad. Para evaluar la viabilidad técnica y económica del reciclaje de baterías de vehículos eléctricos a escala comercial, se requiere información que,

hasta la fecha, no ha sido divulgada o no está disponible. Es fundamental verificar las afirmaciones de la industria respecto a su capacidad para sustituir la extracción de minerales vírgenes y la producción de baterías nuevas, así como determinar en qué plazo podría lograrse esta transición.

Las estrategias que se enfocan, por ejemplo, en evitar la sobreproducción y reducir el impacto del uso de materiales (tamaño de baterías y de vehículos), pueden tener un impacto mucho mayor que el reciclaje al reducir la demanda de minerales, como se explica en las recomendaciones a continuación.





¿Cuáles son las recomendaciones de GAIA para proceder en el futuro?



Analizar el reciclaje de baterías con una mirada crítica.



Priorizar la conservación de materiales y la protección de estrategias ambientales en concordancia con la jerarquía residuos cero.



Prevenir daños sociales y ambientales al reducir los residuos y la toxicidad en baterías de VE.



Incentivar la reutilización y reaprovechamiento de baterías de VE una vez removidas de un vehículo.



ANALIZAR EL RECICLAJE DE BATERÍAS CON UNA MIRADA CRÍTICA

1. Es crucial que en este período de innovación y de oportunidades se analice con una mirada crítica la promesa de que el reciclaje de baterías reducirá la demanda de materiales vírgenes y la producción de baterías. La experiencia del reciclaje de plásticos muestra que, a menudo, la industria hace afirmaciones demasiado optimistas y vende la promesa de nuevas tecnologías piloto, solo para que luego dichas tecnologías fallen en alcanzar la madurez técnica y económica necesaria para ser comercializadas.

GAIA propone las siguientes recomendaciones de normativas para el reciclaje de baterías de VE:



Excluir procesos que destruyan los materiales. Evitar incluir la incineración de baterías como medio de “reciclaje” en la legislación. Las normativas de economía circular y circularidad deben excluir procesos que destruyan los materiales.



Se deben ampliar la regulación y el financiamiento del diseño de baterías para que exista un reciclaje seguro. El factor más determinante para la eficacia del reciclaje de baterías no radica en la optimización de los procesos de reciclaje mediante un sofisticado tratamiento, sino en su diseño, configuración y composición química desde el momento de su fabricación.

Las mejoras de diseño son esenciales para facilitar el desmontaje y la recuperación efectiva de los materiales de baterías, lo cual podría ser potenciado por los esquemas de **Responsabilidad extendida del productor (REP)**. Actualmente, el financiamiento público y privado está fuertemente sesgado hacia el reciclaje de baterías, siendo que debería estar orientado hacia el replanteamiento de los sistemas de energía y transporte y el diseño de las baterías.



Responsabilizar a los fabricantes de vehículos y baterías mediante la aplicación obligatoria del esquema REP para una robusta y efectiva **recolección, reciclaje y descarte** de baterías a través de su ciclo de vida útil completo (retiro del vehículo, reutilización y reaprovechamiento, reciclaje y descarte), y todos los **costos** relacionados, incluyendo la recuperación de materiales de bajo valor comercial.



La industria debe divulgar la información. Se debe asegurar la transparencia y el acceso a la información exigiendo a los fabricantes y recicladores de baterías y de vehículos que divulguen información completa sobre baterías a un organismo informante, ya sea público o independiente. Esto incluye la información sobre las mismas baterías por parte de los fabricantes que las producen y, pero no limitado a, una lista detallada de su composición química, sustancias peligrosas, piezas de recambio, manipulación segura y manuales de reparación, estado de la batería (capacidad original, niveles de degradación, capacidad restante), historial de uso de la batería, eventos negativos y cadena de custodia. Los recicladores de baterías deben divulgar la información sobre el balance de masa en la recuperación de materiales (insumos y productos finales,

priorizando minerales, pero no limitándose solo a ellos), energía, agua y emisiones tóxicas (incluidos los tipos de toxinas y sus efectos).



Ampliar e intensificar la I+D en procesos de reciclaje más seguros, como el reciclaje directo, que ofrece los niveles de recuperación de material más altos con los costos más bajos, con menor impacto de carbono e intensidad de la energía, y menores riesgos de impactos tóxicos en las comunidades situadas en primera línea. Dichas inversiones también deberían considerar los costos sociales de la transición e integrar medidas de protección para asegurar que los trabajadores más expuestos tengan a disposición mecanismos accesibles para prevenir posibles daños.

RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR (REP)

La Responsabilidad Extendida del Productor (REP) es una herramienta normativa que busca trasladar el costo de la gestión de residuos y la contaminación de productos específicos desde los contribuyentes hacia los productores, importadores y distribuidores. Además, pretende incentivar el diseño ecológico y mejorar el desempeño social y ambiental de productos al otorgar la responsabilidad del ciclo completo de vida útil de los productos a sus productores y dueños. El cumplimiento de los objetivos de la REP depende de los detalles de su implementación y estructura. Por lo tanto, el esquema REP requiere de la supervisión de los gobiernos, de la participación de las partes involucradas en la toma de decisiones (incluyendo a todas las comunidades potencialmente afectadas), y de consideraciones prudentes para limitar conflictos de intereses. Asimismo, el esquema REP requiere de recursos materiales y de personas dedicadas para asegurar que la prevención, la recolección y los objetivos de reciclaje sean concretados, y que se cumpla con el marco legal, incluyendo las normas de gobierno. (Para más información: [Los pros y los contras de EPR: Lecciones de Francia](#)).



PRIORIZAR LA CONSERVACIÓN DE MATERIALES Y LA PROTECCIÓN DE ESTRATEGIAS AMBIENTALES EN CONCORDANCIA CON LA JERARQUÍA RESIDUOS CERO.

Debido a los numerosos desafíos del reciclaje de baterías, es momento de priorizar las estrategias de conservación del material que han demostrado por mucho tiempo ser más eficientes que el reciclaje, concretamente, la reducción, reparación, reutilización y reaprovechamiento, que tienen un puesto superior en la [jerarquía residuos cero](#).

Reformar los sistemas de transporte y energía a corto, medio y largo plazo es la medida con mayor impacto según la jerarquía residuos cero de las baterías, como medio para lograr la suficiencia y reducir el consumo mundial de energía y la utilización de recursos. Esto abarca una amplia gama de medidas, entre ellas la limitación de la sobreproducción y fabricación de baterías, así como el cumplimiento de objetivos vinculantes para reducir el impacto de los materiales, como la adopción de vehículos y baterías de menor tamaño.

Reducir el tamaño estándar de las baterías de VE ligeros es una de las medidas más inmediatas y efectivas de reducir la demanda de materia prima. Las normativas como estándares de eficiencia energética, adaptar los incentivos fiscales de la compra de VE al peso del vehículo (retirando incentivos a vehículos de pasajeros de gran tamaño y SUV que excedan un cierto límite de peso), y una expansión de las redes de cobro pueden ayudar a impulsar este cambio hacia baterías más pequeñas y, así, reducir las emisiones de carbono.



PREVENIR DAÑOS SOCIALES Y AMBIENTALES AL REDUCIR LOS RESIDUOS Y LA TOXICIDAD EN BATERÍAS DE VE.

La mejor manera de lidiar con residuos es prevenirlos desde su origen. Las medidas de prevención deberían ser consideradas desde temprano en la fase de diseño de los esquemas REP, especialmente para reducir el impacto del material (baterías más pequeñas).

Los esquemas REP obligatorios deberían penalizar las configuraciones de baterías y materiales menos duraderos o que no sean amigables con el medioambiente, y premiar el uso de aquellos que mejoran su durabilidad, reducen la toxicidad y son mejores para el medioambiente. Esto se puede lograr utilizando criterios de ecomodulación claramente definidos y altas tarifas asociadas. Dichos criterios deberían incluir, por ejemplo, baterías más pequeñas, configuraciones de baterías que sean más fáciles de desmontar, menores niveles de toxicidad en los materiales (como PFA), un acceso justo y equitativo a la información y analíticas sobre las baterías, etc. Estos criterios deberían ser definidos y seleccionados para tener un impacto real en la prevención; las tarifas moduladas (las primas y las multas) deben ser lo suficientemente altas para influenciar las decisiones de los fabricantes.

La cobertura de costos de los esquemas REP debería extenderse lo más posible para incluir a los costos previos en la cadena de producción, además de todos los costos asociados al final de la vida útil, la prevención y la reutilización.

La regulación también debe fijar y reforzar una seguridad estricta y estándares de inspección de calidad en las exportaciones de residuos de baterías. Países como Egipto y Bután ya han comenzado a flexibilizar sus restricciones de importación para VE usados, introduciendo baterías gastadas en los ecosistemas de final de la vida útil.



INCENTIVAR LA
REUTILIZACIÓN Y
REAPROVECHAMIENTO DE
BATERÍAS DE VE UNA VEZ
REMOVIDAS DE UN VEHÍCULO.

La regulación debería no solo asegurar que **toda ley relevante al derecho de reparación** aplique para las baterías de VE, sino que también incluyan esquemas REP obligatorios que definan procesos y objetivos para la reutilización y el reaprovechamiento de baterías de VE una vez removidas del vehículo. Luego de ser removidas del vehículo y antes de ser recicladas, las

baterías deben ser inspeccionadas y probadas para una segunda vida útil, ya sea para su reutilización, reacondicionamiento o reaprovechamiento.

Las medidas normativas para abordar las numerosas barreras impuestas por tecnologías y software patentados serán fundamentales para garantizar un acceso justo y equitativo a la información de las baterías, su estado de salud y análisis. Esto permitirá que las baterías de VE, al ser retiradas con un 70-80 % de su capacidad inicial, puedan reutilizarse o reaprovecharse, extendiendo su vida útil entre 6 y 30 años en distintas aplicaciones de su segunda vida útil.



Glosario

Ánodo: un componente muy importante en celdas de litio. El ánodo es un electrodo con carga negativa por el cual los electrones salen de un dispositivo.

Baterías de iones de litio: las baterías de iones de litio consisten en gran medida de 4 principales componentes: un cátodo, un ánodo, un electrolito y un separador. Estas baterías generan electricidad a través de reacciones químicas de litio, que se inserta en un cátodo.

Biometalurgia: en procesos biometalúrgicos, los ácidos orgánicos e inorgánicos producidos en actividades microbiales promueven el lixiviado de materiales de baterías de iones de litio gastadas.

Calcinación: proceso de calentar sólidos a una temperatura más alta, de aproximadamente 400 a 700 °C, para eliminar sustancias volátiles u oxidar una cantidad específica de masa

Cátodo: un componente muy importante en celdas de litio. El cátodo es un electrodo con carga positiva por el cual los electrones entran a un dispositivo.

Electrolito: funciona como el medio que permite el movimiento exclusivo de los iones de litio entre el cátodo y el ánodo. Para el electrolito, se utilizan principalmente materiales con alta conductividad iónica para facilitar el desplazamiento de los iones de litio en ambas direcciones.

Fundición: proceso de extracción de metales mediante la aplicación de calor y un agente reductor químico, como el coque. Generalmente implica la combustión de una gran parte de la batería, requiriendo temperaturas muy altas en el rango de 1400 a 1700 °C. Como resultado, se produce una aleación, residuos, cenizas volantes y emisiones gaseosas.

Hidrometalurgia: también llamado lixiviación ácida, este proceso utiliza agua tratada químicamente, generalmente calentada, para extraer ciertos metales de una materia prima, como una aleación de fundición o masa negra.

Incineración: descomposición térmica y oxidación rápida de material de desecho a temperaturas de hasta 1200 °C, con la adición de aire u oxígeno en niveles subestequiométricos o en exceso. Todos los materiales se queman y se transforman en cenizas y residuos, parte de las cuales se emiten al aire como cenizas volantes, mientras que el resto cae al fondo como cenizas de fondo. La incineración a veces aprovecha el calor resultante para generar electricidad en la llamada incineración con recuperación de energía.

Masa negra: polvo que contiene valiosos metales de la batería como litio, níquel y cobalto, provenientes de las baterías de VE trituradas.

Pirólisis: proceso de combustión de residuos a temperaturas de entre 200 y 550 °C con ausencia de oxígeno para producir líquido o combustible gaseoso. La pirólisis es un tipo de reciclaje químico.

Pirometalurgia: si bien se ha considerado tradicionalmente como un término sinónimo de fundición, los procesos de reciclaje de pirometalurgia se refieren a un amplio rango de tratamientos térmicos de altas temperaturas además de la fundición, como la pirólisis, la incineración, la calcinación o la torrefacción. Los procesos de pirometalurgia recubren ciertas aleaciones de metal y queman plásticos, solventes orgánicos y otros materiales.

Reciclaje directo: proceso que incluye la recuperación, regeneración y reutilización de diversos componentes de baterías de manera directa, sin necesidad de descomponer su estructura química. Algunos métodos de reciclaje directo pueden incluir: separación física, relitiación, separación magnética, tamizado, flotación por espuma, precipitación con una solución en base a agua, tratamiento térmico y ondas ultrasónicas.

Relitiación: proceso utilizado en el reciclaje directo para regenerar y restaurar partículas activas de cátodos (LCO, LMO, NCM, NCA y sus mezclas) cicladas y degradadas para reactivar su alto desempeño electroquímico. Las técnicas de relitiación propuestas incluyen la relitiación ionotérmica, hidrotérmica, química y electroquímica, así como la sinterización en estado sólido.

Restos de fabricación: subproductos y residuos generados durante la fabricación y ensamblaje, además de las baterías defectuosas o rechazadas en las fases de control de calidad de la fabricación de baterías.

Separador: una capa microporosa que consiste ya sea de una membrana polimérica o de una estera de tela no tejida que separa el ánodo del cátodo para prevenir un cortocircuito. Generalmente, los separadores de baterías de iones de litio se crean a partir de poliolefina, en su mayoría de polietileno (PE) o polipropileno (PP) o los componentes de sus membranas como PP/PE/PP. La tecnología moderna de separadores también contribuye a la estabilidad y seguridad térmica de una celda. Los separadores impactan diversos parámetros del desempeño de una batería, incluyendo su ciclo de vida útil, la densidad de su energía y potencia y su seguridad.

Tratamiento térmico: cualquier proceso que incluya tratamientos de alta temperatura como secado, gasificación, pirólisis, calcinación, fundición, incineración, etc. Los rangos de temperatura comienzan posiblemente a los 100 °C. El Convenio de Basilea determina qué es un “tratamiento térmico”, pero no especifica un rango de temperatura con un menor límite. Posiblemente un límite menor sería a 200 °C cuando los hidrocarburos comienzan a descomponerse.

Autores:

Lien De Brouckere, Doun Moon y Erica Jung

Editores:

Claire Arkin y Agnes Mampusti

Design and graphics:

Nadia Beatrice Cruz

Revisadores y otros contribuyentes:

(orden alfabético según apellido): Miriam Azurin, Alida Cantor, Jefferson Chua, Sheila Davis, Raquel Dominguez, Jessica Dunn, Kenza Sara Elazkem, Perry Gottesfeld, Anthony Hackett, John Hadder, Maria Jensen, Nihan Karali, Yutack Kim, Eric Lau, Dustin Mulvaney, Yanina Rullo, Neil Tangri y Monica Wilson.

Traductora:

Amanda Contreras

Agradecemos a Andrew N. Rollinson f por sus importantes contribuciones de investigación a esta publicación.

Esta publicación fue posible en parte gracias al financiamiento de 11th Hour Project, un programa de la Fundación de la familia Schmidt. Los puntos de vista expuestos en esta publicación no necesariamente reflejan los de 11th Hour Project, un programa de la Fundación de la familia Schmidt.

**Consulte los recursos de GAIA sobre
baterías de vehículos eléctricos en:**

www.no-burn.org/batteries

