

Catálogo de Medidas para Mejorar la Circularidad de las Baterías Utilizadas en los Autobuses Eléctricos



AGRADECIMIENTOS

AUTORES

Andreas Manhart	Oeko-Institut e.V.
Frederick Adjei	Oeko-Institut e.V.
Viviana Hernández López	Oeko-Institut e.V.
Yifaat Baron	Oeko-Institut e.V.

REVISORES

Alexander Batteiger	Proyecto de circularidad – GIZ
Rohan Shailesh Modi	TUMI E-Bus Mission – GIZ

CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS

Portada: WRI Brasil

Figura 5: Oeko-Institut e.V.

APOYO

El presente informe se ha elaborado en el marco de la iniciativa TUMI E-Bus Mission, implementada por la GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH), en nombre del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ, por sus siglas en alemán). TUMI E-Bus Mission es una coalición internacional formada por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés), Gobiernos Locales por la Sostenibilidad (ICLEI, por sus siglas en inglés), el Instituto de Políticas de Transporte y Desarrollo (ITDP, por sus siglas en inglés), la Asociación Internacional de Transporte Público (UITP, por sus siglas en francés), el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) y Ciudades C40, que tiene como objetivo acelerar la adopción de autobuses eléctricos antes de 2025 como alternativa de movilidad urbana sostenible ofreciendo asistencia técnica a 20 ciudades de todo el mundo a través de grupos locales y regionales y planes especializados de asistencia técnica.

Los autores desean agradecer a las siguientes organizaciones por sus contribuciones: Altero S.A.S, Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), Bllious Group, Chilambo General Trade Company, ENEL Colombia S.A., Grupo Retorna Colombia, Innova Ambiental S.A.S E.S.P, Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB), Optibus, Orinoco e-Scrap S.A.S, Recobatt S.A.S, Robert Bosch GmbH, Twaice, Volytica diagnostics.

Un agradecimiento especial a todos los profesionales en adquisiciones y responsables de la formulación de políticas a escala mundial que han contribuido compartiendo sus experiencias en la transición hacia una movilidad sostenible.

Los hallazgos, interpretaciones y conclusiones establecidos en el presente informe son responsabilidad exclusiva de los autores y, por lo tanto, no reflejan ni representan la opinión de las organizaciones que forman parte de la iniciativa TUMI E-Bus Mission, ni de ninguna otra entidad pública o privada.

Copyright © Abril de 2023 – Iniciativa de Movilidad Urbana Transformadora

Resumen ejecutivo

El aumento de la población y el crecimiento económico plantean desafíos de urbanización a muchas economías en transición. El sector del transporte es actualmente el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI) del mundo, y, en la actualidad, el transporte por carretera es responsable de al menos el 90 % de las emisiones del sector (Ayeter et al. 2020). Los medios de transporte con motores de combustión interna son la norma actual, pero los vehículos eléctricos a batería están impulsando intensos esfuerzos para la descarbonización del transporte. Sin embargo, estos no resuelven los desafíos de la congestión en las vías públicas. El uso del transporte público con autobuses eléctricos de batería puede aliviar al mismo tiempo estos retos a los que nos enfrentamos en todo el mundo y que son más acentuados en las economías en transición. Si bien se realizan esfuerzos para aumentar la proporción de vehículos eléctricos en el transporte público, es crucial considerar la circularidad y la gestión del final de la vida útil de dichas tecnologías durante las etapas de planificación y adquisición.

La GIZ (Agencia Alemana de Cooperación Internacional) ha encargado a Oeko-Institut e.V. la elaboración de un catálogo de medidas para la inclusión de los principios de la economía circular en la planificación y adquisición de autobuses eléctricos. Esta tarea está integrada dentro de la Iniciativa de Movilidad Urbana Transformadora (TUMI, por sus siglas en inglés) y el proyecto global "TUMIVolt - Movilidad eléctrica a partir de energías renovables" por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ), centrándose en la movilidad eléctrica sostenible. El objetivo general del proyecto es apoyar a los gobiernos municipales y nacionales en la implementación sostenible de soluciones de movilidad eléctrica.

El catálogo de medidas está diseñado para servir como guía práctica para los responsables de la formulación de políticas y los profesionales en adquisiciones en las economías en transición para abordar las necesidades de formulación de políticas, licitaciones de adquisiciones, mantenimiento y eliminación segura de componentes no reutilizables/reciclables de los autobuses eléctricos. Las medidas descritas y discutidas son:

- Medida 1: Concentraciones reducidas de sustancias nocivas
- Medida 2: Dimensionamiento adecuado de autobuses y baterías
- Medida 3: Durabilidad y garantías de las baterías
- Medida 4: Etiquetado de las baterías
- Medida 5: Pruebas en condiciones reales
- Medida 6: Interoperabilidad de la infraestructura de recarga
- Medida 7: Acceso a los datos sobre el funcionamiento de las baterías
- Medida 8: Monitoreo y mantenimiento exhaustivos de baterías
- Medida 9: Acuerdos de desmantelamiento basados en REP
- Medida 10: Fomento para la reutilización de las baterías
- Medida 11: Gestión racional del final de la vida útil de las baterías

Aunque se reconoce el cambiante y avanzado panorama tecnológico de los autobuses eléctricos, se ofrece una base de especificaciones, cláusulas de licitación y estrategias para garantizar que los planificadores y proveedores conozcan los factores clave a tener en cuenta durante las fases de planificación, adquisición, operación y eliminación de su transición hacia el transporte sostenible.

Índice

1. Antecedentes e introducción al proyecto	1
2. El concepto de economía circular y los autobuses eléctricos	3
2.1 Circularidad y jerarquía de residuos	3
2.2 El concepto de Responsabilidad Extendida del Productor	4
2.3 Consideraciones básicas sobre baterías de autobuses eléctricos	5
2.3.1 Tipos y diseños de baterías	5
2.3.1 Modelos de recarga de las baterías	6
2.3.2 Desafíos del final de la vida útil de las baterías de autobuses eléctricos	7
2.3.3 Economía de la gestión de las baterías al final de su vida útil	8
2.4 Gestión genérica del fin de la vida útil de las baterías de autobuses eléctricos	9
2.5 Desafíos al final de la vida útil de otros componentes seleccionados de los autobuses eléctricos.....	10
2.5.1 Neumáticos	10
2.5.2 Cables.....	11
2.5.3 Componentes electrónicos.....	11
2.5.4 Plásticos.....	12
2.5.5 Refrigerantes	12
3 Medidas para mejorar la circularidad de las baterías de los autobuses eléctricos	13
3.1 Medida 1: Concentraciones reducidas de sustancias nocivas 13	
3.2 Medida 2: Dimensionamiento adecuado de autobuses y baterías	15
3.3 Medida 3: Durabilidad y garantías de las baterías	16
3.4 Medida 4: Etiquetado de las baterías	18
3.5 Medida 5: Pruebas en condiciones reales.....	19
3.6 Medida 6: Interoperabilidad de la infraestructura de recarga 20	
3.7 Medida 7: Acceso a los datos sobre el funcionamiento de las baterías	22

3.8 Medida 8: Monitoreo y mantenimiento exhaustivos de baterías	25
3.9 Medida 9: Acuerdos de desmantelamiento basados en REP	
26	
28	
3.10 Medida 10: Fomento de la reutilización de baterías	28
3.11 Medida 11: Gestión racional del final de la vida útil de las baterías	30
4 Lecturas adicionales.....	32
Lista de referencias	33

Lista de figuras

Figura 1 La jerarquía de residuos de 5 pasos.....	3
Figura 2 Formas de integración de las baterías en los diseños de autobuses eléctricos	5
Figura 3 Composición de los paquetes de baterías de los autobuses eléctricos (simplificada)	6
Figura 4 Vía ideal de gestión de baterías de autobuses eléctricos	10
Figura 5 Quema a cielo abierto: una forma muy contaminante de procesar los cables de desecho	11

Lista de tablas

Tabla 1 Química de las baterías de iones de litio comúnmente utilizadas en autobuses eléctricos	6
Tabla 2 Requerimientos mínimos de rendimiento de la UNECE para baterías de vehículos eléctricos	17
Tabla 3 Descripción general de los estándares comunes para la recarga de vehículos eléctricos	21
Tabla 4 Resumen de publicaciones útiles de lecturas adicionales.....	32

1. Antecedentes e introducción al proyecto

Los sistemas de transporte eficientes y que funcionen correctamente constituyen un servicio público clave y una garantía fundamental para un acertado desarrollo urbano. Si bien el uso de vehículos privados de pasajeros sigue siendo común en las aglomeraciones urbanas de todo el mundo, es cada vez más evidente que dicho transporte motorizado privado presenta limitaciones debido a los altos requerimientos de espacio. Los sistemas de transporte público son mucho más eficientes en este sentido y son un medio importante para mitigar los problemas de congestión. Además de los requerimientos de espacio y las congestiones de tráfico, la contaminación del aire ocasionado por los motores de combustión es un problema importante en la mayoría de las áreas metropolitanas. Varios estudios científicos muestran que la contaminación del medio ambiente urbano es uno de los principales factores que contribuyen a las muertes relacionadas con la contaminación, que ascienden a 6,5 millones al año (Fuller et al. 2022). La electrificación de los sistemas de transporte urbano es un medio clave para mitigar este problema y ha sido adoptada por municipios y agencias de transporte de todas las regiones del mundo. En general, se considera un medio clave para alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) No. 11 "sobre ciudades y comunidades sostenibles", así como el ODS No. 3 "sobre la garantía de una vida saludable y promoción del bienestar para todos".

Si bien el uso cada vez mayor de autobuses eléctricos tiene múltiples ventajas, también es importante que los autobuses y sus baterías se elijan y gestionen de la mejor manera posible para garantizar que las inversiones relacionadas supongan los máximos beneficios para los municipios, las agencias y los operadores de transporte, así como para los usuarios y las sociedades urbanas más amplias. El tema de las baterías y la gestión al final de su vida útil también es importante porque cada vez hay más pruebas de que la gestión inadecuada de los vehículos al final de su vida útil, la de los desechos electrónicos y las baterías puede tener un efecto perjudicial significativo en la salud de las personas y, en parte, ya pone en peligro los logros en materia de salud, tales como la mejora del saneamiento (Fuller et al. 2022). Las medidas que contribuyen a una mejor gestión de productos y materiales, para minimizar el uso de recursos y la generación de residuos, y para prevenir efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente se resumen comúnmente bajo el término "economía circular".

Este catálogo de medidas tiene como objetivo apoyar a los responsables de la toma de decisiones en torno a la adquisición y operación de autobuses eléctricos para planificar e implementar aspectos de economía circular en este ámbito. Para ello, introduce aspectos en torno a la circularidad de los autobuses eléctricos y sus baterías (capítulo 2) y propone diversas medidas que pueden ser adoptadas por los municipios, las agencias de adquisición, las agencias de transporte y los operadores de autobuses eléctricos para avanzar en la economía circular en este ámbito (capítulo 3).

El catálogo de medidas se presenta en un formato conciso, centrado en los principales conceptos y enfoques, sin profundizar en detalles tecnológicos. El alcance del catálogo de medidas incluye aspectos de diseño y procesos de gestión y reciclaje que actualmente son viables y que están establecidos en diversos mercados líderes y que pueden ser implementados por las agencias de transporte y los administradores de flotas bajo las condiciones marco existentes. Son posibles tras estrategias y medidas, pero no están incluidas en este catálogo de medidas. Éstas requieren sobre todo un cambio más amplio de las condiciones marco, que probablemente vaya más allá de la

influencia de las agencias de transporte y los gestores de flotas. Sin embargo, dada la rápida evolución de la tecnología ligada a las baterías, así como la legislación que actualmente se encuentra bajo revisión de la UE y otras jurisdicciones, podría ser beneficioso incluir las siguientes áreas en las futuras licitaciones de autobuses eléctricos:

- Uso de baterías con un alto contenido reciclado;
- Uso de baterías de autobuses eléctricos como amortiguador de la red durante el estacionamiento (vehículo a la red);
- Uso de energías renovables para la recarga de los autobuses eléctricos.

Las medidas descritas pueden planificarse e implementarse individualmente o, cuando sea posible, como un paquete integral. En cualquier caso, las condiciones marco nacionales y locales siempre deberán considerarse adicionalmente.

El contenido de este catálogo se basa en estudios de casos, bibliografía publicada, así como experiencias prácticas de diversas agencias de transporte, operadores de autobuses eléctricos y expertos en baterías y reciclaje. El catálogo de medidas se desarrolló dentro de TUMI E-bus Mission (Iniciativa de Movilidad Urbana Transformadora) financiada por el Ministerio Federal para la Cooperación Económica y el Desarrollo de Alemania e implementada a través de la Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ GmbH).

2. El concepto de economía circular y los autobuses eléctricos

2.1 Circularidad y jerarquía de residuos

El concepto de economía circular tiene como objetivo mantener el valor de los productos y materiales durante el mayor tiempo posible, minimizando el uso de recursos y la generación de residuos, y además, mantener los recursos dentro de la economía después de que los productos hayan llegado al final de su ciclo de vida útil (adaptado de (Comisión Europea 2015)). Este concepto es ampliamente aprobado y cada vez más mencionado por los responsables de la formulación de políticas de todo el mundo. A diferencia de los conceptos tradicionales de gestión de residuos que se centran en la gestión de los residuos generados (reciclado, recuperación de energía, eliminación), la economía circular comienza con diseños de sistemas y productos para anticipar y respaldar un uso prolongado y eficiente de los productos, para respaldar la reparación y la reutilización y facilitar el reciclaje en la fase final de la vida útil.

Si bien existen múltiples formas de ilustrar los enfoques de la economía circular, la jerarquía de residuos de 5 pasos proporciona una guía útil para la toma de decisiones diarias (véase la Figura 1):

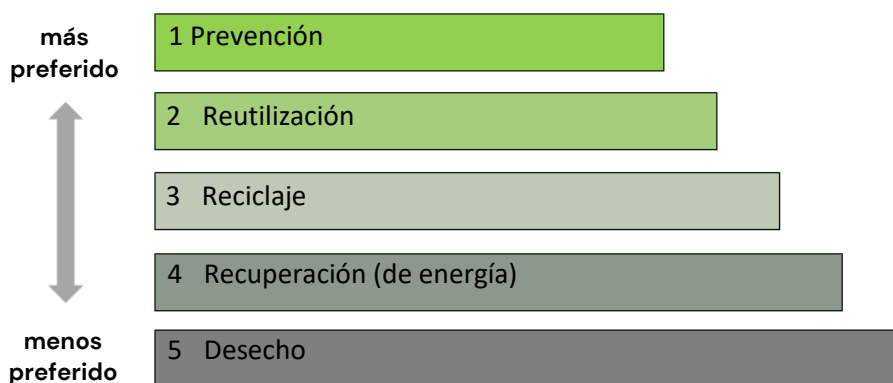


Figura 1 La jerarquía de residuos de 5 pasos

Fuente: Oeko-Institut

Básicamente indica que la economía circular va más allá de la gestión de residuos y que los esfuerzos para evitar la generación de residuos y permitir su reutilización deben tener prioridad sobre la gestión tradicional de residuos. Alentamos a utilizar este sistema como un concepto subyacente para la toma de decisiones sobre la adquisición y gestión de autobuses eléctricos. Las medidas adecuadas al respecto se presentan en el capítulo 3.

2.2 El concepto de Responsabilidad Extendida del Productor

El concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) está estrechamente relacionado con los enfoques de economía circular. El concepto implica que las empresas que introducen productos por primera vez en un mercado nacional son responsables de organizar y financiar la gestión racional del final de su vida útil, de forma respetuosa con el medio ambiente. Si bien los principios de la REP se han plasmado en legislación vinculante para diversos grupos de productos, como los aparatos eléctricos y electrónicos y los envases, en varias jurisdicciones, también son aplicables a los vehículos: En la Unión Europea, por ejemplo, los productores e importadores de vehículos están obligados a sufragar la totalidad (o una parte significativa) de los costos para garantizar que los vehículos al final de su vida útil se entreguen a instalaciones de tratamiento autorizadas, o a gestionar un sistema propio de retorno gratuito para los consumidores (Unión Europea 2000). Además, la Directiva sobre baterías de la UE especifica que las baterías de vehículos eléctricos (clasificadas como "baterías industriales") deben ser recuperadas por los productores de forma gratuita para canalizarlas hacia instalaciones de gestión racional de residuos, respetuosas con el medio ambiente (Unión Europea 2006b).

En ese contexto, se debe considerar que el valor de desecho de los autobuses eléctricos al final de su vida útil podría verse fuertemente influenciado por los requerimientos de reciclaje y transporte seguro para las baterías (Slattery et al. 2021). Especialmente en lugares sin soluciones integrales para la gestión de las baterías al final de su vida útil (reutilización/reaprovechamiento/reciclaje), esos costos de transporte pueden ser bastante elevados y hacer que el valor neto de los vehículos y las baterías sea evidentemente negativo¹. Esto podría suponer una gran carga para los municipios y/o las agencias de transporte público si otros interesados no se ocupan de ello. Por lo tanto, se recomienda aclarar las responsabilidades para la gestión del final de la vida útil de los autobuses eléctricos y las baterías que ya se encuentran en la fase de adquisición y celebrar acuerdos para que los proveedores de vehículos (productores o importadores) acepten esta responsabilidad y se hagan cargo de todas las tareas y costos relacionados (véase la sección 3.9).

¹ Un valor neto negativo indica que los costos totales de una gestión respetuosa del medio ambiente al final de su vida útil son más altos que el valor resultante de la reutilización (de los componentes) y la recuperación de la materia prima (véase también la sección 2.3.3).

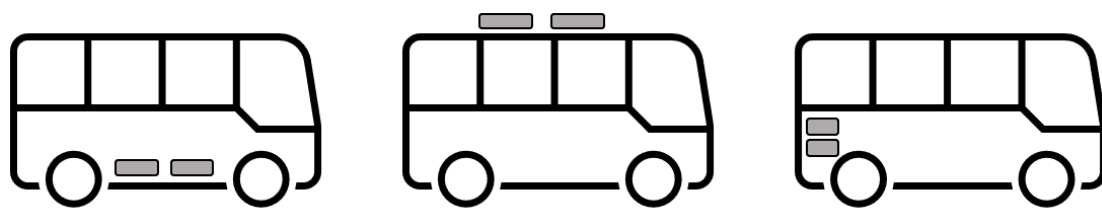
2.3 Consideraciones básicas sobre baterías de autobuses eléctricos

La apariencia de los autobuses eléctricos a batería (AEB) suele parecerse mucho a la de los autobuses convencionales con chasis de acero, ventanas de cristal y accesorios interiores de metal y plástico (agarraderas, asientos...). Sin embargo, el tren motriz y sus dispositivos auxiliares se diferencian por:

- Uno o más paquetes de baterías del vehículo eléctrico (a veces también denominados "baterías de tracción");
- Un motor eléctrico;
- Componentes eléctricos y electrónicos, incluyendo otros dispositivos auxiliares como un puerto de recarga y cables.

En términos de calidad y durabilidad del producto, las baterías merecen especial atención, ya que el contenido energético de las baterías determina en gran medida la autonomía de los autobuses eléctricos. Los aspectos relacionados con la durabilidad, el mantenimiento y la viabilidad para la reutilización/reaprovechamiento de las baterías tienen una influencia significativa en la vida útil total de la batería y, posteriormente, en la circularidad y la estructura de costos a largo plazo del despliegue de los autobuses eléctricos.

Las baterías de los AEB están integradas en el piso del vehículo, en un compartimiento en la parte trasera del autobús, o montadas en sus techos (ver Figura 2). El diseño del techo es más común en los AEB modernos. Cabe destacar que los paquetes de baterías suponen casi el 40 % de los costos de fabricación de los autobuses eléctricos (Informe Linker 2021).



A:
Paquetes de baterías
integrados en el piso del
vehículo

B:
Paquetes de baterías en
el techo

C:
Paquetes de baterías en
la parte trasera del
vehículo

Figura 2 Formas de integración de las baterías en los diseños de autobuses eléctricos

Fuente: Oeko-Institut

2.3.1 Tipos y diseños de baterías

Los autobuses eléctricos funcionan con baterías de iones de litio, y las variedades NMC y LFP dominan claramente el mercado. Si bien las baterías NMC tienen densidades de energía más altas y permiten un mayor kilometraje por peso de batería (véase la Tabla 1), los factores de costo actualmente favorecen claramente a las baterías LFP. Estas ventajas de costos se deben principalmente a los materiales del cátodo, que representan una parte importante del costo de producción de las celdas de las baterías de iones de litio (avicenne energy 2019). El litio, el cobalto y el níquel son, con una gran diferencia, los materiales más caros para la fabricación de baterías con precios en el mercado mundial que oscilan entre los \$8000 y \$80 000 por tonelada para el

litio², \$30 000 – \$80 000 por tonelada para el cobalto y \$15 000 – \$35 000 por tonelada para el níquel (DERA 2022), lo que explica por qué las baterías LFP sin cobalto y níquel son sustancialmente más baratas.

Química de la batería		Materiales del cátodo	Densidades de energía específicas (paquetes de baterías)
NMC	Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto	Li, Ni, Mn, Co	150 – 260 Wh/kg
LFP	Litio-hierro-fosfato	Li, Fe, P	90 – 180 Wh/kg

Tabla 1 Química de las baterías de iones de litio comúnmente utilizadas en autobuses eléctricos
Fuente: (Battery University 2021; Wunderlich-Pfeiffer 2022; electrive.net 2022)

Estos factores de costo, combinados con los altos precios de las materias primas y las mejoras recientes en las densidades energéticas de las baterías LFP provocaron un rápido aumento de la cuota de mercado mundial de las baterías LFP, que pasó del 5 % en 2019 a cerca del 40 % en 2022 en todas las aplicaciones de las baterías de iones de litio (Wunderlich-Pfeiffer 2022).

Los AEB suelen estar equipados con baterías con contenido energético que oscila entre 60 y 564 kWh (Gao et al. 2017; Miaja et al. 2022), lo que, según la química de la batería elegida, requiere paquetes de baterías con un peso total que oscila entre 400 kg y 3200 kg por autobús. Las baterías de los autobuses eléctricos constan de varios módulos, que a su vez se ensamblan a partir de varias celdas (véase la Figura 3). Cada batería (que comúnmente se conoce como la "batería" del vehículo) está equipada con un sistema de gestión de batería (BMS). Los paquetes de baterías también incluyen un sistema de contacto, una carcasa protectora y un sistema de gestión térmica (por ejemplo, piezas de aluminio o sistemas de agua que absorben y eliminan el calor generado). Las celdas suelen ser prismáticas, pero también se pueden usar diseños prismáticos o cilíndricos.

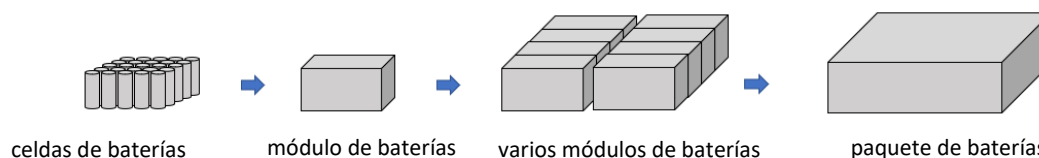


Figura 3 Composición de los paquetes de baterías de los autobuses eléctricos (simplificada)
Fuente: Oeko-Institut

2.3.1 Modelos de recarga de las baterías

Existen dos formas principales de recarga de baterías de los AEB, que también se pueden usar en combinación:

- Recarga nocturna: Los autobuses se conectan a una infraestructura de recarga en un depósito de autobuses durante el periodo de inactividad (normalmente, a altas horas de la noche).
- Recarga en ruta: Los autobuses se recargan durante su funcionamiento en diversas estaciones de recarga, tales como los puntos de giro de las rutas, que permiten breves periodos de carga estacionaria. Este tipo de "recarga rápida" suele requerir una gran potencia de carga de hasta 400–500 kW (Gao et al. 2017).

² Carbonato de litio, 99 % Li₂ CO₃

Además, los autobuses eléctricos suelen tener capacidad de frenado regenerativo, de modo que la energía cinética se vuelve a convertir parcialmente en energía eléctrica durante las operaciones de frenado.

2.3.2 Desafíos del final de la vida útil de las baterías de autobuses eléctricos

Se requiere una gestión bien planificada y controlada del final de la vida útil de las baterías de iones de litio, incluyendo una fase de uso prolongada y la promoción de aplicaciones de segunda vida, por una variedad de razones:

- Todos los tipos de baterías de iones de litio contienen varios componentes que pueden tener un impacto negativo considerable en la salud humana y en el medio ambiente si no se manejan adecuadamente (por ejemplo, si se liberan al medio ambiente). Por lo tanto, al final de su vida útil, las baterías de iones de litio se clasifican como desechos peligrosos en muchas jurisdicciones. Las medidas de reducción de residuos (p. ej., reutilización) y el reciclaje respetuoso con el medio ambiente son estrategias de respuesta clave en este campo.
- Las baterías de iones de litio contienen materias primas que se consideran críticas para el desarrollo económico y la expansión de las tecnologías de energía verde. Esto incluye litio, grafito, níquel, cobalto y cobre.³ (véase también la Tabla 1). Un uso prolongado de las baterías reduce la necesidad de producir nuevas baterías y, en consecuencia, la demanda de materia prima. Después del final de su vida útil, es necesario reciclarlas para recuperar la mayor cantidad posible de materias primas contenidas.⁴
- Las baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil están asociadas con riesgos de seguridad contra incendios. Las celdas de las baterías con carga residual pueden sobrecalentarse, incendiarse e incluso explotar tras dañarse. Este riesgo también se conoce como "fuga térmica" de las baterías y puede ocurrir días o, a veces, incluso semanas después de que se produzca un daño. Los riesgos de incendio de las baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil son una de las principales preocupaciones de los gestores y recicladores de residuos en todo el mundo. Como los AEB contienen paquetes de baterías bastante grandes (véase la sección 2.3.1), la autoinflamación de las celdas individuales puede propagarse y causar incendios de baterías de gran magnitud.
- Durante el uso de baterías en autobuses eléctricos, la capacidad de la batería disminuirá con el tiempo hasta que ya no sea adecuada para el funcionamiento del vehículo. Sin embargo, estas baterías aún pueden tener suficiente "vida útil" para permitir su uso en otras aplicaciones, como sistemas de almacenamiento de energía estacionarios para aplicaciones de menor potencia, por ejemplo, el almacenamiento de energía renovable generada a partir de la energía solar, eólica, etc. Este uso de segunda vida puede ayudar a maximizar la duración del uso de los recursos de la batería y, por lo tanto, contribuye a la eficiencia y circularidad de los recursos.

³ El níquel y el cobalto no se utilizan en todos los tipos de baterías de iones de litio.

⁴ No es posible una recuperación perfecta de todas las materias primas contenidas, principalmente debido a las complejas composiciones de los materiales y los problemas de entropía. Las empresas de reciclaje generalmente se enfocan en la recuperación de cobre, cobalto y níquel como los principales portadores de valor de las baterías de iones de litio, pero, según los procesos aplicados, también pueden recuperar parte del aluminio y el litio contenido. Otros materiales, como el manganeso y el grafito, normalmente se pierden en el reciclaje de las baterías de iones de litio (Brückner et al. 2020).

2.3.3 Economía de la gestión de las baterías al final de su vida útil

La gestión racional de las baterías al final de su vida útil puede estar motivada por una combinación de cuatro factores principales:

- 1) El valor de reutilización de las baterías o de alguno de sus componentes
- 2) El valor de las materias primas recuperadas durante el reciclaje.
- 3) Obligaciones legales para llevar a cabo la gestión racional del final de la vida útil de la batería
- 4) Otras obligaciones para llevar a cabo la gestión racional del final de la vida útil (p. ej., por parte de los socios contractuales)

En este contexto, se deben considerar los siguientes aspectos:

- El **valor de reutilización** futuro de las baterías usadas de los vehículos eléctricos está sujeto a múltiples incertidumbres. Hasta la fecha, las operaciones de reutilización y reaprovechamiento a menudo se ven dificultadas por la multiplicidad de diseños⁵ diferentes de baterías, el acceso insuficiente a los datos sobre el estado de las baterías y los problemas relacionados con la seguridad de los productos de segunda vida (Zhu et al. 2021). Si bien las operaciones de reutilización y reaprovechamiento podrían permitir un cierto margen de beneficio en el futuro, esto aún no se ha demostrado a mayor escala.
- El **valor material** de las baterías de vehículos al final de su vida útil a menudo se limita a unos cuantos metales recuperables, principalmente cobre, cobalto y níquel. La tendencia al uso tecnologías químicas de celdas LFP (véase el apartado 2.3.1) también significa que dichas baterías tienen un valor material significativamente reducido que actualmente no permite cubrir los costos de los procesos de reciclaje. Por lo tanto, las empresas de reciclaje cobran tarifas para las baterías LFP, que oscilan indicativamente en torno a los 2000 €/t (Manhart et al. 2022). El litio solo se encuentra en concentraciones comparativamente pequeñas y no se recupera en la mayoría de los procesos de reciclaje existentes (Brückner et al. 2020; Sojka et al. 2020).
- El **transporte y el almacenamiento seguros** de las baterías de vehículos eléctricos para su reutilización y reciclaje conllevan esfuerzos y costos considerables. Como se describe en la sección 2.3.2, los riesgos de incendio y explosión son considerables. Impulsados por diversos incidentes, organismos nacionales e internacionales, así como empresas de transporte y seguros, se disponen a desarrollar directrices y normativas para el transporte de baterías de vehículos eléctricos usadas y al final de su vida útil. Si bien la logística inversa seguramente se adaptará a volúmenes crecientes y requerimientos de seguridad más estrictos, es probable que los costos relacionados sean sustanciales, particularmente cuando las baterías requieran grandes distancias de transporte (Slattery et al. 2021) y/o desplazamientos transfronterizos. En este último caso, también se requiere una notificación de conformidad con el procedimiento de consentimiento informado previo del Convenio de Basilea, que puede conllevar considerables esfuerzos y retrasos de índole administrativo (Prevent & StEP 2022).

Por lo tanto, debe considerarse que una gestión racional del final de la vida útil, respetuosa con el medio ambiente, probablemente se asociará a los costos netos. La implementación de las medidas de este catálogo puede ayudar a reducir los esfuerzos y los costos para los municipios y las agencias de transporte y garantizar que la responsabilidad relacionada sea asumida por los proveedores de autobuses eléctricos y baterías en consonancia con el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (véase la sección 2.2)

⁵ Algunas veces, debido al diseño ni siquiera es posible extraer los módulos o las celdas de la batería.

2.4 Gestión genérica del fin de la vida útil de las baterías de autobuses eléctricos

La Figura 4 contiene una descripción general de una ruta de gestión ideal de las baterías de autobuses eléctricos:

- Tras la adquisición de los autobuses eléctricos, se realiza el mantenimiento frecuente de los autobuses y las baterías para hacer posible una larga primera fase de uso. En comparación con el mantenimiento de los autobuses convencionales, los autobuses eléctricos requieren menos esfuerzos en términos de inspecciones físicas y mantenimiento, pero más en términos de monitoreo y balanceo de las baterías, que se puede realizar a través del acceso remoto a los datos.
- Cuando las baterías alcanzan una determinada capacidad residual y una potencia de salida demasiado baja para el funcionamiento del autobús, los paquetes de baterías se retiran, se empaquetan de manera segura y se envían a un taller autorizado de prueba y tratamiento de baterías.
- Lo ideal es que la empresa receptora disponga de suficiente información del Sistema de Gestión de Baterías sobre el historial y el estado de la batería y pueda tomar decisiones informadas sobre el uso posterior de las baterías y los módulos. Los paquetes y módulos de baterías reutilizables se utilizan para soluciones de almacenamiento de segunda vida (también conocidas como "reutilización"). Otros módulos y componentes de la batería se destinan al reciclaje.
- Después de varios años más de uso en segunda vida, las baterías ya no tienen un valor de reutilización relevante y también se envían a reciclaje.
- El reciclaje generalmente comienza con el desmontaje manual de los paquetes de baterías más grandes. El procesamiento posterior se realiza en condiciones seguras en un entorno cerrado, incluyendo controles de polvo y emisiones. La mayoría de los procesos de reciclaje implican un preprocesamiento mecánico en el que los módulos y las celdas de la batería se trituran y clasifican en las principales fracciones de salida, a saber, acero, cobre, aluminio, plásticos y masa negra.
- El aluminio, el cobre y la masa negra pasan a procesos de fundición y/o refinación que generan materias primas para la producción industrial.

Además de los puntos mencionados, las baterías usadas y al final de su vida útil deben también descargarse antes del procesamiento. Esta descarga puede realizarse antes del envío (en el momento en que se retiran las baterías de la flota de autobuses), o como un primer paso de gestión antes del desmontaje. En cualquier caso, la descarga y el desmontaje de baterías de autobuses eléctricos son operaciones con riesgo de alta tensión y solo deben ser realizadas por personal cualificado.

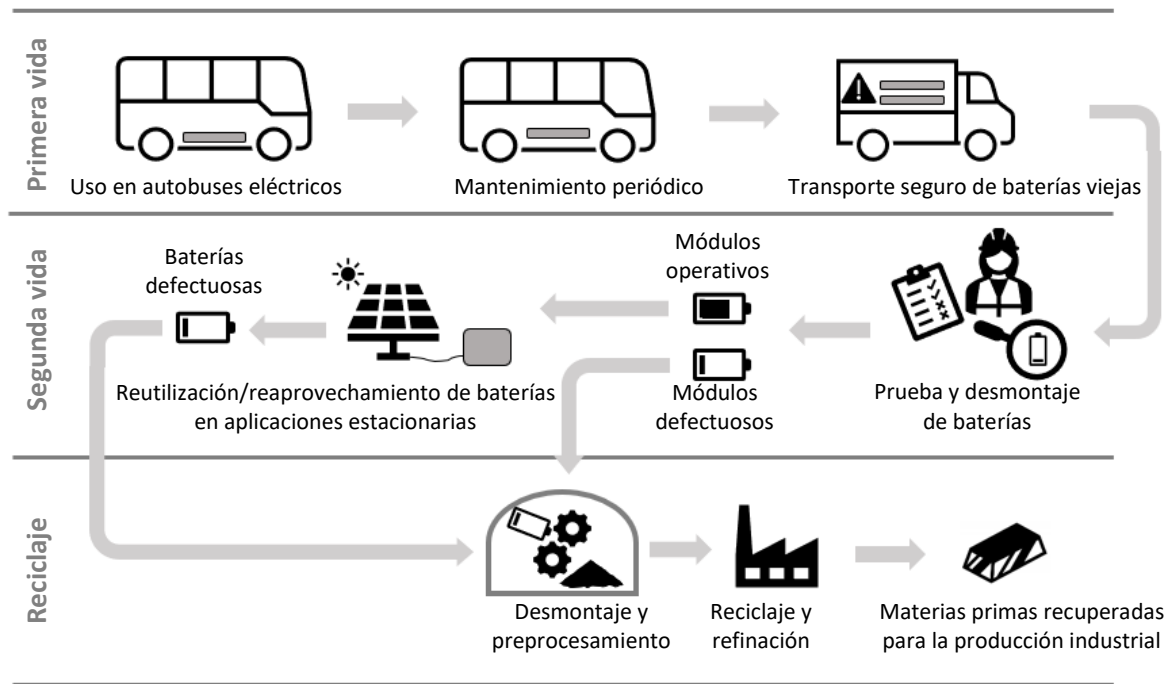


Figura 4 Ciclo ideal de gestión de baterías de autobuses eléctricos

Fuente: Oeko-Institut

2.5 Desafíos al final de la vida útil de otros componentes seleccionados de los autobuses eléctricos

2.5.1 Neumáticos

Los neumáticos usados y al final de su vida útil para automóviles y autobuses son un flujo de residuos sin resolver en muchos países y regiones del mundo. Si bien algunos neumáticos de automóviles usados pueden encontrar un segundo uso (por ejemplo, defensas de embarcaciones, producción de muebles), las opciones de reciclaje se limitan a unas pocas opciones de infrarreciclaje⁶ como la producción de tapetes. En el peor de los casos, los neumáticos usados se queman a cielo abierto, lo que se hace para reducir los volúmenes de residuos o para recuperar la malla de acero incrustada para venderla a las plantas de reciclaje de acero. Estas prácticas son altamente contaminantes y sin duda deberían desaconsejarse/prohibirse.

Los neumáticos poseen un valor calorífico muy alto y pueden servir como combustible derivado de residuos (RDF) en procesos industriales. Con frecuencia, los neumáticos usados se usan como combustible para hornos de cemento. Esta vía de gestión (recuperación de energía) se encuentra en el segundo nivel más bajo de la jerarquía de residuos (véase la sección 2.1) y, por lo general, ayuda a reemplazar el carbón como principal tipo de combustible en la producción de cemento. Si se elige esta vía de gestión, se debe garantizar que los perfiles de emisión de los hornos de cemento estén en consonancia con las buenas prácticas nacionales e internacionales y puedan hacer frente a tales cambios en la composición del combustible.

⁶ El término "infrarreciclaje" describe operaciones de reciclaje que conducen a un material de menor calidad.

2.5.2 Cables

Los cables tienen núcleos metálicos (principalmente de cobre o aluminio) y están aislados con plástico. El tipo de plástico para su aislamiento varía mucho, pero a menudo consiste en PVC o PE al que también se aplican diversos aditivos. La mayoría de los mercados de chatarra exigen a los proveedores entregar el núcleo de metal liberado, sin restos de aislamiento. Si bien este aislamiento de plástico se puede retirar por medios mecánicos (p. ej., por pelado, decapado, granulación y clasificación), las operaciones relacionadas requieren mucha mano de obra o inversiones en maquinaria. Por lo tanto, los operadores del sector informal a veces recurren a la quema de cables a cielo abierto. Dicha quema a cielo abierto genera una contaminación considerable, incluida la formación y emisión de contaminantes orgánicos persistentes (COP) altamente peligrosos. La generación de COP es particularmente relevante para los cables aislados con PVC con contenido de cloro.



Figura 5 Quema a cielo abierto: una forma muy contaminante de procesar los cables de desecho
Fuente: Oeko-Institut

2.5.3 Componentes electrónicos

Los componentes eléctricos y electrónicos contienen una amplia gama de materiales y sustancias, muchos de los cuales poseen propiedades peligrosas. Los componentes electrónicos, como las placas de circuitos impresos con microchips, contienen concentraciones importantes de cobre y metales preciosos y, por lo tanto, son buscados por los chatarreros y recicladores. En general, es importante que los componentes eléctricos y electrónicos no se eliminen o reciclen en operaciones no controladas, lo cual es bastante contaminante y también ineficiente en términos de recuperación de materia prima.

2.5.4 Plásticos

Las piezas y componentes de plástico se utilizan en muchas partes de los autobuses, en particular en el interior (p. ej., revestimiento interior, asientos, cojines). Si bien, teóricamente, muchos tipos de plástico pueden reciclarse adecuadamente, existen múltiples problemas prácticos para hacerlo en aplicaciones reales:

- Muchos plásticos usados están recubiertos o mezclados, lo que dificulta o incluso imposibilita la separación segura de los polímeros.
- Algunos aditivos como los retardantes de llama pueden limitar el uso de los plásticos reciclados y crear obstáculos para su uso.
- Los vehículos al final de su vida útil se desmantelan o Trituran con el objetivo principal de recuperar los metales. Los materiales menos valiosos acaban en la llamada "fracción ligera de fragmentación", que consta de una gran variedad de materiales que normalmente solo se utilizan para la recuperación de energía (si es que se utilizan).

Sin embargo, algunos materiales pueden tener un potencial de reciclaje considerable. Por ejemplo, las piezas de plástico de los interiores de los vehículos suelen fabricarse de ABS-PC, que es un polímero muy apreciado en ingeniería. Además, piezas como los parachoques suelen fabricarse de PP. En caso de que estos materiales puedan recuperarse en forma pura y no estén contaminados con retardantes de llama u otros aditivos peligrosos, podrían tener un potencial de reciclaje considerable. También podrían existir potenciales similares para los elementos de poliamida (PA), como alfombras y fundas de asientos.

2.5.5 Refrigerantes

Todos los dispositivos de aire acondicionado utilizan refrigerantes. Si bien los refrigerantes tradicionales y los que dañan la capa de ozono han sido prohibidos a nivel mundial, los sustitutos utilizados habitualmente siguen teniendo un potencial de calentamiento global muy fuerte cuando se liberan de forma incontrolada. El R134a, por ejemplo, tiene un potencial de calentamiento global 1,430 veces mayor que el CO₂. Las fugas de refrigerante de los sistemas de aire acondicionado son muy comunes y pueden ocurrir durante el funcionamiento normal, accidentes o desmantelamiento, por lo que, en la mayoría de los escenarios del ciclo de vida, deben suponerse emisiones completas de refrigerante⁷. Los autobuses públicos comunes contienen alrededor de 10 kg de R134a (BMU y UBA 2011), lo que significa que una emisión completa tiene un impacto en el calentamiento global equivalente a cerca de 10 t de CO₂ por autobús. Los sustitutos con un potencial de calentamiento global significativamente menor están fácilmente disponibles e incluyen R1234yf y CO₂. En la Unión Europea, el uso de refrigerantes en el aire acondicionado de los vehículos está limitado a sustancias con un potencial de calentamiento global no superior a 150 veces el del CO₂ (Unión Europea 2006a). Por lo tanto, se recomienda optar por autobuses eléctricos que utilicen exclusivamente este tipo de sustitutos respetuosos con el medio ambiente (véase la sección 3.1).

⁷ Asumir una emisión completa puede ser incluso una estimación conservadora ya que los refrigerantes se rellenan comúnmente durante la inspección y el mantenimiento. Por lo tanto, las emisiones del ciclo de vida de un autobús pueden ser significativas.

2.5.6 Otros contaminantes

Los vehículos pueden contener una serie de otras sustancias preocupantes, que pueden liberarse al medio ambiente durante o después del procesamiento al final de su vida útil. En respuesta, la Unión Europea ha prohibido el uso de algunas sustancias peligrosas, en particular los metales pesados como el plomo, mercurio, cadmio y cromo hexavalente, en los vehículos. La prohibición permite ciertas exenciones, como el uso de ciertas concentraciones de metales pesados en aleaciones y plomo en baterías de plomo-ácido. Las exenciones se revisan periódicamente (Unión Europea 2000).

3 Medidas para mejorar la circularidad de las baterías de los autobuses eléctricos

3.1. Medida 1: Concentraciones reducidas de sustancias nocivas

¿Qué?	Diseño y uso de autobuses con contenidos reducidos de sustancias peligrosas
¿Por qué?	Las sustancias peligrosas pueden tener efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, especialmente durante la fase final de la vida útil de los autobuses. Además, estas sustancias a menudo representan obstáculos para el reciclaje de alta calidad.
Relevancia para las políticas	Alta: Las regulaciones y prohibiciones de sustancias son más efectivas cuando se imponen y aplican a través de un marco jurídico nacional

La compra de autobuses eléctricos ofrece la posibilidad de seleccionar modelos que contengan concentraciones reducidas de sustancias nocivas y faciliten la gestión del final de su vida útil en este ámbito. Gracias a la legislación de la Unión Europea⁸ y de algunas otras jurisdicciones, el mercado global de vehículos ya ha desarrollado soluciones para fabricar vehículos ampliamente libres de los metales pesados como el cadmio, plomo, mercurio y el cromo hexavalente, y con sistemas de aire acondicionado sin gases de efecto invernadero (véanse las secciones 2.5.5 y 2.5.6).

El Recuadro 1 propone un texto para la adquisición de autobuses eléctricos que se basa ampliamente en las reglamentaciones de vehículos de pasajeros establecidas en la Unión Europea, por lo que muchos fabricantes de autobuses eléctricos ya deberían estar familiarizados con los requerimientos relacionados. Cabe señalar que los requerimientos del Recuadro 1 no solo son aplicables a los autobuses eléctricos, sino que también pueden utilizarse para otros vehículos, incluyendo los vehículos de pasajeros y los vehículos con motor de combustión convencional.

⁸ Los requerimientos para los refrigerantes se basan en la Directiva de la UE 2006/40/EC relacionada con las emisiones de los sistemas de aire acondicionado en vehículos motorizados (Directiva MAC). Los demás requerimientos relacionados con las sustancias se basan en la Directiva de la UE 2000/53/CE sobre vehículos al final de su vida útil (ELV Directive).

Recuadro 1: Criterios preliminares para la adquisición de autobuses eléctricos con concentraciones reducidas de sustancias nocivas

El aire acondicionado de los autobuses deberá utilizar un refrigerante con un potencial de calentamiento global no superior a 150 CO₂ equivalentes.

Además, los autobuses eléctricos no deberán contener plomo, mercurio, cadmio o cromo hexavalente. Las exenciones son posibles para:

- El plomo como elemento de aleación en las siguientes aplicaciones:
 - Acero para maquinaria y componentes de acero galvanizado en caliente por lotes que contengan hasta un 0,35 % de plomo en peso
 - Aleaciones de aluminio con un contenido de plomo de hasta 0,4 % de plomo en peso
 - Aleaciones de cobre que contengan hasta un 4 % de plomo en peso
- Plomo y compuestos de plomo en los siguientes componentes:
 - Plomo en baterías de plomo-ácido
 - Plomo en soldaduras de alta temperatura por fusión (es decir, aleaciones a base de plomo que contienen 85 % en peso o más de plomo)
 - Componentes eléctricos y electrónicos que contienen plomo en vidrio o cerámica, en compuestos de matriz de vidrio o cerámica, en materiales de vitrocerámica o en compuestos de matriz de vitrocerámica
 - Plomo en materiales cerámicos dieléctricos a base de PZT de condensadores que forman parte de circuitos integrados o semiconductores discretos
- Cromo hexavalente en las siguientes aplicaciones:
 - Cromo hexavalente como agente anticorrosivo del sistema de refrigeración de acero al carbono en refrigeradores de absorción, hasta 0,75 % en peso en la solución refrigerante:
 - diseñado para funcionar total o parcialmente con calentadores eléctricos, con una potencia eléctrica media utilizada ≥ 75 W en condiciones de funcionamiento constante;
 - diseñado para operar completamente con calentadores no eléctricos.

En caso de que se necesiten más exenciones para el uso de plomo, mercurio, cadmio o cromo hexavalente, deben especificarse en la oferta, incluyendo una justificación técnica para cada exención solicitada. Solo se puede otorgar una exención en caso de que se explique de manera convincente que la sustitución tendría impactos negativos en la seguridad del producto o crearía más daño al medio ambiente.

3.2 Medida 2: Dimensionamiento adecuado de autobuses y baterías

¿Qué?	Adquirir modelos de autobuses eléctricos que se adapten a las realidades locales
¿Por qué?	Garantizar que los modelos de autobuses eléctricos sean adecuados para los requerimientos locales, de modo que se asegure su utilización a largo plazo
Relevancia para las políticas	Baja: El tamaño adecuado de los autobuses eléctricos y las baterías depende de las condiciones y demandas locales y no se puede determinar a nivel de políticas centrales.

El contenido energético de la batería determina la autonomía del AEB: Cuanto mayor sea la capacidad, mayor será la distancia que el autobús puede recorrer sin recarga adicional. La fase de uso prolongado de los autobuses eléctricos contribuye significativamente a evitar la producción de nuevos vehículos de transporte y se ajusta al concepto de prevención de residuos al que se da la máxima prioridad en la jerarquía de residuos (véase el apartado 2.1). Debido al alto costo de las baterías (véase la sección 2.3.1), se debe evitar el sobredimensionamiento de las baterías. Sin embargo, el tamaño insuficiente también constituye un riesgo, ya que la capacidad de una batería de tamaño insuficiente puede afectar significativamente la funcionalidad del autobús: Los autobuses que no pueden completar un día completo de operación pueden requerir la compra de capacidades respaldo de autobús, o incluso un reemplazo completo.

En términos de capacidad de las baterías y el kilometraje de los autobuses, se deben considerar los siguientes aspectos durante la etapa de adquisición:

- Las condiciones climáticas calurosas y frías repercuten en el rendimiento y el kilometraje de los AEB. Esto se debe, entre otras cosas, a la necesidad de calentar o refrigerar eléctricamente la cabina de pasajeros (Wang et al. 2020). En condiciones de frío ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), la reducción puede llegar al 38 % (Henning et al. 2019) con efectos similares en climas cálidos. Además, la carga de la batería toma más tiempo en condiciones de calor, lo que puede limitar efectivamente la eficacia de la recarga en ruta (McGuffie 2021).
- Los requerimientos de energía y la autonomía también dependen del terreno en el que se utiliza el autobús. En un entorno llano, los AEB suelen alcanzar una autonomía más alta que en terrenos montañosos (Wang et al. 2020).
- La capacidad de la batería se degrada con el tiempo. Los vehículos (o sus baterías) se reemplazan comúnmente cuando su capacidad se ha reducido significativamente por debajo del 80 % de su valor original. Esto significa que la autonomía del autobús también se reduce con el tiempo alrededor del 70-80 %.
- Basándose en los estudios disponibles, puede demostrarse que las maniobras inestables e impredecibles de los vehículos, como ocurre en las congestiones de tráfico, provocan una disminución del estado esperado de la batería. (Wang et al. 2020). Por lo tanto, los carriles exclusivos para autobuses no solo pueden elevar la calidad del servicio de los sistemas de transporte público, sino también respaldar la vida útil prolongada de las baterías.

Todos los factores anteriores pueden hacer que los autobuses operen por debajo de su autonomía y kilometraje esperados. Estos escenarios negativos pueden mitigarse con la ayuda de una o más de las siguientes medidas:

- Especificar los requerimientos operativos reales (rango de temperaturas, terreno, peso adicional como pasajeros, etc.) en los documentos de licitación y exigir a los licitadores que garanticen un kilometraje definido de los AEB para las condiciones enunciadas y un período de tiempo predefinido (véase también el Recuadro 2).
- Utilizar los nuevos AEB para rutas más largas y con mayor consumo de energía. Una vez que la capacidad de la batería se ha degradado, se pueden cambiar a rutas más cortas que consuman menos energía.

Recuadro 2: Ejemplo de buenas prácticas: requerimientos de calidad para autobuses eléctricos en la ciudad de Leipzig

La ciudad de Leipzig (Alemania) trabaja en la transición gradual de su flota de autobuses a autobuses eléctricos a batería. Los autobuses son adquiridos, explotados y son propiedad de Leipziger Verkehrsbetriebe, una agencia de transportes de propiedad municipal. En su estrategia de licitación, Leipziger Verkehrsbetriebe exige que los proveedores garanticen que los autobuses y sus baterías alcancen los requerimientos mínimos de rendimiento durante diez años de operación constante. En lugar de utilizar únicamente indicadores de rendimiento indirectos (p. ej., al menos el 80 % de la capacidad restante de la batería después de un número determinado de años), las especificaciones de licitación y contrato exigen que los autobuses eléctricos puedan, después de diez años de operación constante en las condiciones de Leipzig: cubrir todavía una distancia de 80 km con una sola carga de batería. Los 80 km derivan de las condiciones operativas típicas de Leipzig, que utiliza una combinación de recarga en depósito y en ruta. Otras condiciones operativas en Leipzig también se especifican en los documentos de licitación, incluyendo información sobre el terreno y los rangos de temperatura predominantes. En caso de que uno o más autobuses eléctricos suministrados no cumplan con este requerimiento, el proveedor está obligado por contrato a ofrecer una solución, como el reemplazo de la batería.

3.3 Medida 3: Durabilidad y garantías de las baterías

¿Qué?	Garantizar que solo se utilicen baterías de alta calidad en los autobuses eléctricos
¿Por qué?	Las baterías de alta calidad tienen una vida útil más larga, necesitan reemplazos menos frecuentes y, por lo tanto, son más eficientes en cuanto a recursos y costos.
Relevancia para las políticas	Alta: Los requerimientos mínimos de durabilidad pueden integrarse en la legislación nacional sobre baterías y/o vehículos.

Aunque la medida 2 establece incentivos para suministrar autobuses de alta calidad, no se puede descartar que los licitadores presenten soluciones de menor calidad en términos de baterías, al tiempo que aceptan sustituciones más frecuentes de equipos, a menudo a costa del comprador. A pesar de que una estrategia de este tipo podría responder a consideraciones económicas limitadas, es obvio que entra en conflicto con los principios de la economía circular y tiene efectos secundarios negativos en la economía y la sociedad en general (véase el capítulo 2). Para prevenir eficazmente el uso de baterías de baja calidad, se pueden introducir requerimientos mínimos de durabilidad en los documentos de licitación. La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) estableció en 2022 una serie de criterios mínimos de durabilidad para las baterías

de los vehículos eléctricos (incluyendo las de los autobuses eléctricos), que se resumen en la Tabla 2.

Edad/kilometraje del vehículo	Estado de energía certificada ⁹
Desde el inicio de la vida útil hasta los 5 años o 100 000 km, lo que ocurra primero	80 %
Vehículos con más de 5 años o 100 000 km, y hasta 8 años o 160 000 km, lo que ocurra primero	70 %

Tabla 2 Requerimientos mínimos de rendimiento de la UNECE para baterías de vehículos eléctricos
Fuente: (UNECE 2022)

Sin embargo, el nivel actual de exigencia de los requerimientos de la CEPE no es adecuado como requerimiento mínimo para baterías de autobuses eléctricos¹⁰. Los datos de fabricantes y usuarios de autobuses eléctricos indican que es posible una vida útil de >10 años con las baterías y los autobuses eléctricos existentes (MassTransit 2015; Aamodt et al. 2021). Los avances tecnológicos y la competencia entre los fabricantes permitirán seguir aumentando aún más la vida útil y la calidad de las baterías. Por lo tanto, se recomienda solicitar requerimientos de rendimiento y durabilidad más exigentes en los documentos de licitación y contratos; a título indicativo, para unos 12-15 años de funcionamiento de los autobuses electricos. Esto debe basarse en la información actual de la industria sobre las garantías y las especificaciones de rendimiento de las baterías de los principales proveedores. Si no se pueden derivar criterios basados en la

Recuadro 3: Criterios preliminares para la adquisición de autobuses eléctricos con baterías duraderas

El proveedor debe garantizar que el estado de energía certificada (SOCE) de las baterías de los autobuses eléctricos se ajusta a los siguientes requisitos mínimos de rendimiento o los supera:

Edad/kilometraje del vehículo	Estado de energía certificada
Desde el inicio de la vida útil hasta los 6 años o 400 000 km, lo que ocurra primero	80 %
Vehículos con más de 6 años o 400 000 km, y hasta 10 años o 500 000 km, lo que ocurra primero	70 %

El proveedor deberá presentar pruebas de cumplimiento a través de protocolos de pruebas independientes en consonancia con los métodos y procedimientos de verificación establecidos en el Reglamento Técnico Global de las Naciones Unidas sobre la Durabilidad de las Baterías incorporadas a los Vehículos Electrificados.

⁹"Estado de energía certificada" (SOCE) se refiere al rendimiento energético de la batería, medido o utilizable a bordo en un punto específico de su vida útil, expresado como un porcentaje de la energía de la batería utilizable certificada (UNECE 2022).

¹⁰ Es posible que existan criterios revisados de la UNECE, adecuados para baterías de autobuses eléctricos disponibles en el futuro. Por lo tanto, podría ser útil consultar la información de UNECE a la hora de desarrollar los criterios de durabilidad y de garantía de las baterías.

información de mercado, podrían utilizarse como punto de partida los criterios mínimos del recuadro siguiente¹¹.

3.4 Medida 4: Etiquetado de las baterías

¿Qué?	Garantizar que las baterías de los autobuses eléctricos lleven etiquetas y códigos QR que brinden información sobre las características de la batería a terceros involucrados en la reutilización/reaprovechamiento de iones y en la gestión del final de su vida útil.
¿Por qué?	El fácil acceso a la información sobre las características de la batería puede respaldar la toma de decisiones acertadas en la gestión del final de su vida útil.
Relevancia para las políticas	Alta: El etiquetado de baterías es más eficaz cuando se aplica de manera uniforme en todos los tipos de vehículos eléctricos. La mejor forma de conseguirlo es a través de normas industriales combinadas con funciones obligatorias para aplicar dichas normas

Las empresas que se encargan de las baterías de vehículos sobreutilizadas y al final de su vida útil necesitan información sobre sus características para tomar decisiones acertadas sobre las vías de manipulación y gestión, contribuyendo así a optimizar la gestión del final de su vida útil.

El productor puede proporcionar información específica de la batería de manera que cualquier tercero pueda acceder fácilmente a ella. Este aspecto ya ha sido abordado en muchos foros e iniciativas y se trata bajo la palabra clave "pasaporte de la batería". Si bien aún no existe un formato establecido para el mencionado pasaporte de la batería, a partir de 2026 California empezará a exigir que los vehículos eléctricos matriculados lleven una etiqueta con un identificador digital (código QR) que vincule con información en línea sobre la química de la batería (tipo de cátodo y ánodo), el fabricante, la fecha de fabricación, el voltaje mínimo y la capacidad nominal (Código Reglamentario de California de 2022). El Borrador del Reglamento Europeo sobre Baterías adopta un enfoque similar y puede establecer un etiquetado obligatorio para las baterías con dichos códigos QR para el año 2027 (Comisión Europea 2020). Además, China ya cuenta con (y planea expandir) requerimientos de etiquetado de baterías para vehículos eléctricos (Bej et al. 2022).

Si bien dicho etiquetado puede ser una herramienta útil para respaldar la gestión del final de la vida útil, los sistemas aún no se han establecido de manera uniforme. No obstante, se puede exigir que los productores de autobuses eléctricos proporcionen información sobre las baterías de manera fácilmente accesible (véase el recuadro 4).

¹¹ Una breve encuesta de mercado realizada en 2023 indica que los fabricantes de vehículos eléctricos ya han salido al mercado con garantías de 6 a 12 años con kilometraje ilimitado; por lo tanto, las cifras mínimas presentadas son fácilmente alcanzables por la industria (MassTransit 2015).

Recuadro 4: Criterios preliminares de etiquetado de baterías para autobuses eléctricos

El productor equipará todos los paquetes de baterías con una etiqueta / identificador digital bien visible y accesible (por ejemplo, un código QR) vinculado a un sitio web de datos que proporcione información sobre, al menos, las siguientes características de la batería:

- la química de la batería (tipo de cátodo y ánodo)
- el fabricante
- la fecha de fabricación
- el voltaje mínimo, máximo y medio
- la capacidad nominal

El sitio web conservará la información durante al menos 15 años a partir de la fecha de fabricación y se hará accesible al público sin ningún tipo de cargo y procedimiento de registro.

El etiquetado y la información proporcionados deberán ajustarse además a los formatos comunes de la industria para este fin, incluyendo el tamaño, el diseño y la ubicación de las etiquetas, así como el formato de suministro de datos digitales. La información sobre otras características de la batería se proporcionará adicionalmente a través del sistema, de conformidad con las prácticas y los requerimientos legales establecidos.

3.5 Medida 5: Pruebas en condiciones reales

¿Qué?	Prueba de prototipos de autobuses eléctricos previa a las decisiones finales de adquisición
¿Por qué?	Garantizar que los modelos de autobuses eléctricos sean adecuados para los requerimientos locales, de modo que se asegure su utilización a largo plazo.
Relevancia para las políticas	Baja: Las pruebas reales están destinadas a probar la idoneidad del vehículo para un contexto local específico. Los enfoques de políticas centrales tienen efectos limitados aquí.

La medida 2 ya enfatiza la necesidad de que los autobuses se adapten a las necesidades locales y sean capaces de operar correctamente en un entorno determinado. Si bien muchos de estos aspectos relacionados pueden y deben especificarse en los documentos de licitación (p. ej., longitudes y características de las rutas, modos de recarga, rangos de temperatura ambiente), existen numerosos aspectos y características de los autobuses que pueden pasarse por alto en el proceso, pero que podrían resultar relevantes en la operación diaria, como el número de pasajeros y el equipaje adicional. En este contexto, las agencias de transporte y los operadores pueden plantearse probar los nuevos modelos de autobuses eléctricos antes de realizar los pedidos de compra. En la mayoría de las situaciones, los productores, por razones comprensibles, solo estarán dispuestos a autorizar pruebas de manejo en condiciones controladas (sin pasajeros, no en operación de rutina), una práctica que ya puede revelar muchos aspectos prácticos de la idoneidad del autobús y respaldar en gran medida la selección de modelos adecuados como se

describe en la sección 3.2. En caso de que se adquiriera un mayor número de autobuses, los productores también pueden aceptar pruebas en condiciones reales en operaciones diarias.

Recuadro 5: Ejemplo de buenas prácticas: prueba de prototipos de autobuses en India

En India, cinco grandes ciudades (Delhi, Calcuta, Surat, Bengaluru e Hyderabad) unieron sus esfuerzos para la adquisición de autobuses eléctricos. En este "gran desafío", se adquirieron un total de 5,450 autobuses eléctricos a través de un proceso de licitación. Si bien este gran volumen hizo posible un descuento significativo sobre el precio unitario, también permitió introducir más requerimientos para la licitación. Entre otras cosas, el proceso de licitación consideró una etapa intermedia en la que se solicitó a los tres candidatos a proveedores mejor calificados que proporcionaran prototipos para realizar pruebas en condiciones reales. Los resultados de estas pruebas se utilizaron en la selección final del proveedor (Modi 2022). Se publicó una licitación de seguimiento comparable a gran escala para la operación de autobuses eléctricos en 2022 (6465 autobuses eléctricos) y se planea otra para el año 2023 (~5000 autobuses eléctricos) (Convergence 2022). Esta agrupación de demandas abre posibilidades significativas para solicitar requerimientos de economía circular, incluyendo aquellos descritos en todas las demás medidas recomendadas.

3.6 Medida 6: Interoperabilidad de la infraestructura de recarga

¿Qué?	Garantizar la interoperabilidad de la infraestructura de recarga con diferentes modelos de autobuses eléctricos
¿Por qué?	Los sistemas de recarga interoperables se pueden utilizar para una amplia variedad de modelos de autobuses eléctricos y, por lo tanto, suelen tener una vida útil prolongada, lo que respalda la conservación de recursos y la reducción de costos a largo plazo.
Relevancia para las políticas	Alta: Los responsables de la formulación de políticas pueden regular la interoperabilidad de las interfaces y protocolos de recarga a nivel central (nacional).

En muchos casos, la adquisición de autobuses eléctricos y la provisión de una infraestructura de recarga se licita como un paquete, al menos en la fase inicial del despliegue de autobuses eléctricos en un lugar determinado. Si bien esta estrategia de adquisición tiene muchas ventajas, es importante considerar que los sistemas de recarga deben diseñarse de tal manera que también puedan utilizarse para modelos de autobuses eléctricos de otros fabricantes que puedan completar la flota posteriormente. Sin una infraestructura de recarga interoperable, la flota de autobuses eléctricos podría depender de un número muy limitado de proveedores de autobuses eléctricos o verse obligada a instalar una infraestructura de recarga paralela para otros modelos de autobuses eléctricos. Por lo tanto, es de gran importancia instalar una infraestructura interoperable de recarga.

Para ello, una agencia de transportes/gestor de flota debe decidir primero el tipo de recarga que se pretende aplicar en una determinada ciudad y elegir principalmente entre las siguientes opciones

- Recarga por enchufe (conductiva) / recarga por pantógrafo / recarga por inductividad

- Recarga en depósito / recarga en depósito + recarga en ruta

Cuando la infraestructura física ya está instalada, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Tipos y métodos de recarga (Conductiva: CA/CD o inductiva)
- Potencia de salida
- Interfaces de recarga tanto de la estación de recarga como del autobús eléctrico (tomas de corriente, entradas, caras de los conectores)
- Protocolo de comunicación entre el cargador y la batería de los autobuses eléctricos

La toma de corriente de las estaciones de recarga existentes debe coincidir con la de la nueva flota. Por el contrario, la infraestructura debe adaptarse para garantizar la operación continua tanto en los autobuses nuevos como en los antiguos. Teniendo en cuenta estos aspectos, los criterios de interoperabilidad deben especificarse en los documentos de licitación. Si existe una infraestructura de recarga, la oferta debe incluir obligaciones para proporcionar los convertidores y adaptadores o modificaciones necesarios para garantizar la interoperabilidad y compatibilidad con la flota. Estos criterios deben hacer referencia a normas y estándares internacionales relacionados con las interfaces de usuario, así como el protocolo de comunicación de recarga. La siguiente tabla ofrece una descripción general de las normas y estándares comunes en este campo.

Norma	Descripción
Conectores, entradas, enchufes	
IEC 62196	Serie de normas internacionales sobre enchufes y tomas de corriente para la recarga de vehículos eléctricos
SAE J1772	Norma norteamericana sobre conectores eléctricos para vehículos eléctricos mantenida por SAE International: Acoplador de recarga conductiva para vehículos eléctricos SAE.
GB/T 20234	Norma nacional china para el conjunto de conexión para la recarga conductiva de vehículos eléctricos.
CHAdeMO	Norma japonesa de recarga con CC para vehículos eléctricos.
Cargador a bordo, equipo de suministro de vehículos eléctricos (EVSE)	
IEC 61851	Norma internacional para sistemas de recarga conductiva de vehículos eléctricos
GB/T 27930	Norma china para la recarga por cable de baterías de vehículos eléctricos
Comunicación EV a EVSE	
Norma ISO 15118	Norma internacional sobre vehículos de carretera: interfaz de comunicación entre el vehículo y la red (carga/descarga bidireccional)
DIN SPEC 70121	Especificación técnica alemana sobre la comunicación digital entre la estación de recarga de CC para vehículos eléctricos y el vehículo eléctrico para el control de recarga de CC en el sistema de recarga combinado.
DIN SPEC 70122	Especificación técnica alemana sobre pruebas de conformidad para la comunicación digital entre una estación de recarga de vehículos eléctricos de CC y un vehículo eléctrico para su control.
GB/T 27930	Norma china sobre protocolos de comunicación entre el cargador conductivo externo y el sistema de gestión de baterías
Sistemas de Transferencia de Energía Inalámbrica (WPT)	
IEC 61980	Norma internacional sobre sistemas de transferencia de energía inalámbrica (WPT) para vehículos eléctricos
GB/T 38775	Estándares nacionales chinos para la recarga inductiva o inalámbrica
Comunicación EVSE al sistema de gestión de estaciones de recarga (CSMS)	
IEC 63110	Norma internacional que define un protocolo para la gestión de infraestructuras de recarga y descarga de vehículos eléctricos (actualmente en desarrollo)
OCPP	Protocolo de punto de recarga abierto (OCPP)

Tabla 3 Descripción general de los estándares comunes para la recarga de vehículos eléctricos
Fuente: Adaptado de Vector Informatik GmbH

Recuadro 6: Ejemplo de buenas prácticas: interoperabilidad de la infraestructura de recarga en Israel

A partir de 2030, Israel ha estipulado que todos los autobuses nuevos destinados al transporte público deben ser completamente eléctricos. Los autobuses propulsados por gasóleo actualmente representan menos del 1% del total de vehículos en el país, por lo que este objetivo es altamente alcanzable. El Ministerio de Protección Ambiental de Israel junto con el Ministerio de Transporte y Seguridad Vial han coordinado sus esfuerzos para lograr este objetivo a través de una combinación de reglamentos y normas. Un pilar importante de su estrategia fue lograr la interoperabilidad de la infraestructura de recarga para vehículos públicos y privados. El gobierno ha desarrollado normas obligatorias basadas en los requerimientos de recarga de CC de la UE CCS tipo 2 y el Protocolo de punto de carga abierto (OCPP) para la comunicación entre los puntos de recarga y los vehículos eléctricos. El uso de normas y reglamentos ya existentes y aceptados contribuye al cumplimiento de la normativa para la importación y registro de vehículos. Para apoyar aún más la adopción de autobuses eléctricos, el Ministerio de Transporte opera estaciones de recarga en depósito para flotas municipales y flotas privadas de autobuses eléctricos a cambio de una tarifa. Los modelos de negocio basados en la recarga en depósito también están presentes tanto para las flotas públicas de autobuses eléctricos como para los particulares, independientemente de la marca del vehículo. Si bien este enfoque tiene éxito para lograr la interoperabilidad, una deficiencia de la política nacional es el paso por completo a los autobuses eléctricos, sin garantizar la disponibilidad suficiente de estaciones de recarga. Esta situación ha provocado que los nuevos autobuses eléctricos no se utilicen y estén actualmente almacenados, lo que supone pérdidas de rentabilidad para el Estado y los operadores de flotas privadas.

3.7 Medida 7: Acceso a los datos sobre el funcionamiento de las baterías

¿Qué?	Garantizar que los fabricantes de autobuses eléctricos concedan acceso a los datos operativos de las baterías
¿Por qué?	Los datos sobre el funcionamiento de las baterías son fundamentales para monitorear su estado y adoptar medidas de mantenimiento y prolongación de su vida útil.
Relevancia para las políticas	Alta: Los responsables de la formulación de políticas pueden introducir normas obligatorias para que los fabricantes de baterías y los proveedores de vehículos eléctricos concedan acceso a los datos sobre el funcionamiento de las baterías.

Los datos y el conocimiento sobre el nivel de rendimiento real y el historial de las baterías de los autobuses eléctricos constituyen una condición previa fundamental para una gestión racional de los autobuses eléctricos y sus baterías, incluyendo cuestiones relacionadas con:

- ¿Es un autobús lo suficientemente apto para atender una determinada ruta?
- ¿Cuándo y cómo debe realizarse el mantenimiento/acondicionamiento de una batería?
- ¿Cuál es la vida útil restante esperada de una batería?

- ¿Qué se puede hacer para ampliar la vida útil de la batería y garantizar un funcionamiento seguro?
- ¿Cuándo un cambio de batería es económico y sostenible?
- ¿Funciona la batería de conformidad con las garantías acordadas?
- ¿Cuál es el valor restante de una batería? ¿Es adecuada para una aplicación de segunda vida?

Si bien los operadores y conductores de autobuses generalmente pueden monitorear el estado de carga (SOC) (por ejemplo, en una pantalla en la cabina del autobús o mediante acceso remoto digital), la información del estado de salud (SOH) no siempre es accesible para los operadores y usuarios. Además, los datos del SOH proporcionados pueden agruparse, limitando la capacidad del usuario de comprender en profundidad las respuestas a las preguntas anteriores.

Por lo tanto, es importante que los productores de autobuses eléctricos concedan acceso a los datos de diagnóstico de la batería a sus clientes, incluyendo el derecho a transmitir el acceso a estos datos a terceros independientes (p. ej., proveedores de servicios de diagnóstico, mantenimiento y reutilización/reaprovechamiento de baterías). Este acceso a los datos deberá solicitarse en el pliego de condiciones de la licitación de forma inequívoca, especificando el tipo de señales a las que se dará acceso, su unidad física y su precisión y frecuencia. Además, se deben especificar los formatos de datos y las interfaces para garantizar que se pueda acceder a los datos con hardware disponible públicamente (unidades telemáticas) y analizarlos con software disponible públicamente.

También se recomienda que cualquier deficiencia en el cumplimiento de los correspondientes requerimientos esté sujeta a reparación y/o compensaciones financieras.

Recuadro 7: Texto preliminar de licitación sobre el acceso a los datos de diagnóstico de las baterías

Los proveedores deberán permitir el monitoreo continuo de los datos de diagnóstico de la batería como se especifica en la siguiente tabla, y brindar al cliente acceso total a estos datos. Esto también incluye el derecho del cliente a ampliar el acceso a estos datos a cualquier tercero designado por el cliente.

Señal	Unidad	Resolución de valor	Resolución de tiempo
Corriente de la batería a lo largo del tiempo	A	0,1 A	≤1 segundo
Voltaje de la batería a lo largo del tiempo	V	0,1 V	≤1 segundo
Temperatura de la celda (prom./mín./máx.) a lo largo del tiempo	°C	0,1 °C	≤10 segundos
Voltaje de la celda (prom./mín./máx.) a lo largo del tiempo	V	0,001 V	≤1 segundo
Estado de carga de la batería (SoC) a lo largo del tiempo	%	0,1 %	≤10 segundos
Rendimiento de la carga acumulada	As	0,1 As	≤ 60 segundos

Las señales indicadas en la tabla se muestrearán continuamente durante el funcionamiento y la recarga y se proporcionarán en un formato digital compatible con el software disponible públicamente. Todas las señales deben estar sincronizadas. Todas las señales estarán disponibles a través de una interfaz de salida estándar como CAN o FMS.

La siguiente información adicional sobre la batería debe estar disponible para el cliente en el momento de la compra:

- Nombre del proveedor del paquete de baterías
- Energía nominal del paquete de baterías (en kWh)
- Química de las celdas de la batería
- Modelo o número de serie de la batería
- Topología y cableado de la batería:
 - Capacidad nominal de la celda (en Ah)
 - Voltaje nominal de la celda (en V)
 - Número de módulos por paquete de baterías
 - Número de celdas por módulo

3.8 Medida 8: Monitoreo y mantenimiento exhaustivos de baterías¹²

¿Qué?	Garantizar que los datos operativos de las baterías se utilicen para el monitoreo y el mantenimiento de alta calidad de las baterías de los autobuses eléctricos
¿Por qué?	El monitoreo y el mantenimiento de alta calidad pueden extender significativamente la vida útil de las baterías
Relevancia para las políticas	Baja: Las medidas de monitoreo y mantenimiento de la batería son competencia de los operadores de flotas de autobuses eléctricos y no pueden ser reguladas a nivel central.

Los requerimientos de durabilidad de los autobuses eléctricos y de las baterías pueden especificarse a través del diseño y tenerse en cuenta en los pliegos de condiciones de la licitación, tal y como se sugiere en la Medida 3. Además de esto, el monitoreo y el mantenimiento adecuados de las baterías influyen considerablemente en la vida útil total de las baterías y, por lo general, pueden prolongar la primera vida útil significativamente más allá de los periodos de garantía concedidos.

Este potencial se puede aprovechar a través del monitoreo de los datos sobre el funcionamiento (véase la Medida 7) y con el uso de esta información para diagnósticos sofisticados de las baterías. A partir de estos datos, se pueden tomar diversas medidas para prolongar la vida útil de las baterías, como planificar y llevar a cabo el balanceo de las celdas y el cambio de determinados modelos o celdas.

Al planificar el monitoreo y mantenimiento de las baterías, es importante optar por una estructura organizativa que establezca incentivos para un servicio de alta calidad y anime al proveedor de servicios a hacer posible una larga vida útil de las baterías (sin poner en peligro la seguridad y la calidad). Esto se puede lograr a través de una de las siguientes opciones:

- Autobús eléctrico como servicio: Los operadores no son propietarios de los autobuses eléctricos ni de las baterías, pero tienen un acuerdo contractual con un proveedor que también se encarga de las baterías. En tales entornos, también suele interesar al proveedor que los autobuses eléctricos y las baterías sean objeto de un monitoreo y un mantenimiento exhaustivo.
- Acuerdos especiales de monitoreo y mantenimiento: Los operadores pueden optar por contratar a un tercero especializado en diagnóstico y mantenimiento de baterías. Los acuerdos contractuales deben adaptarse de manera que el proveedor de servicios obtenga beneficios tangibles de un buen mantenimiento, incluyendo la prolongación de la vida útil¹³ de la batería. Cabe señalar que la mayor parte del monitoreo y el mantenimiento se pueden realizar de forma remota mediante el acceso a los datos sobre el funcionamiento de la batería. Por lo tanto, el acceso a dichos datos es un requerimiento previo importante (ver medida 7).

¹² Enel X 2023.

¹³ Si bien muchos proveedores de autobuses eléctricos ofrecen también este tipo de servicios, su interés principal suele residir en la venta de autobuses y no tanto en lograr una vida útil significativamente superior a los periodos de garantía acordados contractualmente.

Recuadro 8: Ejemplo de buenas prácticas: autobús eléctrico como servicio demostrado en Italia

En las ciudades italianas de Roma, Turín e Iglesias, actualmente está en marcha un proyecto para promover la electrificación del transporte público a través de un modelo de autobús eléctrico como servicio (Enel X 2023). A través de una asociación privada, las autoridades municipales subcontrataron la implementación de un servicio de autobuses eléctricos. Esto incluye análisis de viabilidad y costos/beneficios, opciones de financiamiento para el suministro de vehículos, instalación de infraestructuras de recarga, puesta en funcionamiento de rutas y mantenimiento tanto de vehículos como de baterías. La digitalización de los sistemas de emisión de boletos y el uso del análisis de datos para centrarse en la descongestión de las rutas más transitadas garantizan que los ciudadanos tengan una experiencia mejorada del transporte público. Aunque es evidente que esto es rentable para el socio privado, las autoridades municipales pueden garantizar mediante la privatización que los expertos en electromovilidad participen en la transición del sector del transporte. Con un plan integrado de desarrollo de la capacidad local, se pueden desarrollar conocimientos especializados a lo largo del tiempo para garantizar la continuidad de las operaciones cuando expire el contrato con el proveedor de servicios privado y los autobuses eléctricos se devuelvan a la oficina de transporte público local (Sustainable Bus 2022).

3.9 Medida 9: Acuerdos de desmantelamiento basados en REP

¿Qué?	Garantizar que los costos y esfuerzos para una gestión racional del final de la vida útil no recaigan en los municipios, agencias de transporte u operadores de autobuses. La Responsabilidad Extendida del Productor garantizará que los esfuerzos y los costos de una gestión racional del final de la vida sean cubiertos por los productores.
¿Por qué?	La gestión racional del final de la vida útil de las baterías puede conllevar costos adicionales. Además, la aplicación de soluciones racionales para el final de la vida útil de las baterías requiere conocimientos específicos que no están dentro de las competencias básicas de los operadores de autobuses eléctricos.
Relevancia para las políticas	Alta: La mejor forma de introducir la Responsabilidad Extendida del Productor es mediante sistemas obligatorios de ámbito nacional que obliguen a los productores e importadores a adoptar medidas adecuadas para la recuperación y gestión racional de los residuos derivados de sus productos.

Como se indica en la sección 2.2, la Responsabilidad Extendida del Productor es un medio clave para garantizar que las responsabilidades y los costos relacionados con la gestión racional del final de la vida útil de las baterías no recaigan en los usuarios de dichas baterías. Esto es particularmente relevante, ya que la gestión racional del final de la vida útil de las baterías de los autobuses eléctricos puede estar asociada a costos netos, lo que, para muchos operadores de flotas de autobuses, supondrá un cambio de paradigma respecto a una situación en la que los autobuses viejos siempre podían venderse por un precio positivo (véase también la sección 2.3.3).

En países donde los sistemas de REP para baterías de vehículos eléctricos ya están desarrollados, las agencias de transporte y los operadores pueden referirse a las obligaciones legales existentes de los productores y exigir que se tomen las medidas adecuadas para que las baterías sean recogidas y gestionadas por medios proporcionados y financiados por el productor o importador (de los autobuses eléctricos)¹⁴.

Aunque se puede adoptar el mismo enfoque en países sin esquemas de REP existentes mediante la especificación de responsabilidades al final de la vida útil en los pliegos de condiciones, existe un desafío principal vinculado al hecho de que transcurren varios años entre la adquisición y el desmantelamiento de los autobuses eléctricos: Si bien la adquisición requiere criterios claramente verificables, es difícil verificar si un acuerdo de retorno y reciclaje aún tendrá posibilidades de concretarse dentro de 5 o 10 años.¹⁵

Por lo tanto, la forma más confiable de garantizar que el productor se haga cargo de la gestión del final de su vida útil es una estrategia de adquisición que combine a) la adquisición de autobuses, b) el mantenimiento y c) la gestión racional de los equipos al final de su vida útil. En particular, el elemento de mantenimiento garantiza que los socios contractuales sepan a qué atenerse cuando se acerque el término de desmantelamiento de las baterías. En cualquier caso, es importante que la responsabilidad de una gestión racional del final de la vida útil esté claramente especificada en los acuerdos contractuales, e idealmente con indicación de requerimientos como los propuestos en la sección 3.11.

¹⁴ Además, los pliegos de condiciones pueden especificar indicadores clave de rendimiento para la gestión del final de la vida útil, como se sugiere en el Recuadro 9.

¹⁵ Los esquemas de REP bien organizados contienen mecanismos incorporados en este sentido. En estos sistemas, las obligaciones de los productores se gestionan a través de una o más Organizaciones de Responsabilidad del Productor (PRO) registradas que mantienen fondos de reserva para futuras obligaciones de recolección y reciclaje.

Recuadro 9: Texto preliminar de licitación sobre el desmantelamiento de baterías basadas en REP

El proveedor asumirá la responsabilidad total de la gestión del final de la vida útil de las baterías después de su primer uso en autobuses eléctricos.

La responsabilidad se originará una vez que el propietario de los autobuses eléctricos y el proveedor o un tercero a cargo del mantenimiento de las baterías lleguen a la conclusión conjunta de que una batería ya no cumple la función para la que fue diseñada y ya no se puede restaurar utilizando medidas de mantenimiento convencionales (decisión de desmantelamiento).

Una vez que una o más baterías de un autobús ya no puedan cumplir sus funciones previstas, se extraerán del vehículo y se manipularán de manera segura y responsable de acuerdo con los requerimientos especificados en la sección [enlace a la sección correspondiente, por ejemplo, como se especifica en el Recuadro 11].

Las responsabilidades del proveedor abarcan todos los aspectos logísticos, administrativos y financieros relacionados con estas tareas y se llevarán a cabo de manera oportuna y en el plazo de [X] semanas tras haber sido informado de la decisión de desmantelamiento. Las responsabilidades del proveedor pueden cumplirse a través de un tercero designado por el proveedor, siempre que esta entidad pueda demostrar capacidad para realizar todas las tareas relacionadas con el debido cuidado y de conformidad con las disposiciones establecidas.

El proveedor deberá demostrar que tiene las capacidades suficientes para cumplir con este requerimiento en [nombre de la ciudad y el país] y garantizar la disponibilidad durante al menos [12] años a partir de la fecha de puesta en servicio de los autobuses eléctricos y las baterías. Esta evidencia puede referirse a disposiciones adecuadas realizadas con una Organización de Responsabilidad del Productor para las baterías de vehículos, que esté registrada como tal en [nombre del país].

3.10 Medida 10: Fomento de la reutilización de baterías

¿Qué?	Fomentar diseños de baterías y modelos comerciales que prevean y pretendan la reutilización/reaprovechamiento de las baterías después de su primera vida útil en los autobuses eléctricos.
¿Por qué?	Muchas baterías viejas que ya no son adecuadas para la alimentación de autobuses eléctricos pueden seguir utilizándose en otras aplicaciones. Dicha reutilización o reaprovechamiento prolonga significativamente la vida útil de las baterías.
Relevancia para las políticas	Medio: Los responsables de la formulación de políticas pueden fomentar estrategias de reutilización/reaprovechamiento. Esto se puede lograr a través de políticas de REP (véase la medida 9) que implican objetivos obligatorios para la reutilización y reaprovechamiento de baterías.

La Medida 9 sobre los acuerdos de desmantelamiento también se puede ampliar de forma tal que se aliente a los proveedores a planificar aplicaciones de segunda vida para las baterías en la fase de producción. Si bien todas las consideraciones sobre la circularidad de las baterías de autobuses hablan de aplicaciones de segunda o incluso tercera vida a través de la reutilización/reaprovechamiento (véase la sección 2.4), existen varios desafíos que van más allá del aspecto de los datos de diagnóstico de las baterías, abordados en la Medida 7:

- Los sistemas de gestión de temperatura, la carcasa protectora y el BMS se adaptan a las necesidades de los autobuses eléctricos. Las aplicaciones estacionarias requieren diferentes aspectos de diseño.
- Si bien es teóricamente posible construir baterías que cumplan con los criterios de diseño tanto para aplicaciones móviles como estacionarias ("diseño para la reutilización"), la fase de segunda vida está prevista para dentro de unos años. Un diseño para la reutilización solo generará ventajas tangibles para el productor, si se entrega una cantidad suficiente de tales baterías para su reutilización/reaprovechamiento en un área geográfica definida (p. ej., un país), dentro de un plazo razonable y a las entidades que cooperan con el productor.

Debido a las diversas incertidumbres de los futuros mercados de segunda vida de las baterías, así como a la falta de normas claras de diseño para la reutilización, solo unas pocas empresas adoptan actualmente tales estrategias de diseño para la reutilización.¹⁶

En la adquisición, se puede considerar incentivar dicho diseño para la reutilización. En concreto, los documentos de licitación pueden incluir este aspecto como un criterio no obligatorio, donde los licitadores que pueden demostrar de forma verosímil que siguen una estrategia de diseño para la reutilización, reciben créditos adicionales y obtienen una mejor calificación en comparación con los licitadores que no responden de manera convincente a este aspecto.

Recuadro 10: Texto preliminar de licitación para el fomento de la reutilización de baterías

Se alienta a los proveedores a diseñar baterías de autobuses eléctricos de tal manera que puedan reutilizarse/reaprovecharse después de su primera vida como baterías de autobuses eléctricos, y a integrar la reutilización/reaprovechamiento en su modelo comercial. Las estrategias de diseño pueden incluir, entre otros, paquetes de baterías que se pueden transferir a otras aplicaciones de almacenamiento de energía sin modificaciones físicas, y el uso de sistemas de gestión de baterías que permitan la interoperabilidad con una o más aplicaciones estacionarias comunes. Los modelos comerciales relacionados pueden implicar, entre otros, esfuerzos para recuperar las baterías usadas con la intención de implementarlas en aplicaciones de segunda vida, como el almacenamiento de energía estacionario.

El proveedor deberá indicar si sigue uno o más de estos enfoques y brindar explicaciones de antecedentes y conceptos subyacentes, incluyendo enlaces a documentos y sitios web relevantes. Además, el proveedor deberá presentar antecedentes si estas iniciativas

- Son aplicables a los autobuses eléctricos y baterías ofrecidos en esta licitación
- Son implementadas o planificadas para el entorno de [nombre de la ciudad y/o país]

¹⁶ Entre otros, Volvo está realizando pruebas sobre la reutilización de baterías usadas de autobuses eléctricos para aplicaciones solares estacionarias (Sustainable Bus 2020)

Se recomienda abordar este aspecto estrechamente relacionado con los requerimientos sobre los acuerdos de desmantelamiento basados en REP (Medida 9) y la gestión racional del final de la vida útil de las baterías (Medida 11).

3.11 Medida 11: Gestión racional del final de la vida útil de las baterías

¿Qué?	Especificar indicadores clave de rendimiento para garantizar que la gestión del final de la vida útil de las baterías se lleve a cabo de conformidad con las buenas prácticas establecidas
¿Por qué?	Para garantizar que las baterías usadas y al final de su vida útil se gestionen de acuerdo con los ambiciosos requerimientos de la economía circular
Relevancia para las políticas	Alta: Lo ideal sería que la gestión racional de las baterías de los vehículos eléctricos estuviera regulada a nivel nacional de forma que se prohibieran y sancionaran eficazmente los procesos y vías de eliminación que no cumplan las normas.

Una vez que sean desmantelados los autobuses eléctricos o sus baterías, es importante que esto se lleve a cabo a través de entidades experimentadas que operen rigiéndose a las buenas prácticas internacionales relacionadas con la salud y la seguridad, la reutilización y el reciclaje. Básicamente, cualquier socio en la gestión del final de la vida útil que se haga cargo de baterías obsoletas de autobuses eléctricos debe garantizar la secuencia de transporte, pruebas, reutilización y reciclaje seguros como se indica en la Figura 4. Sin embargo, no existe ninguna norma internacional que defina el reciclaje racional de las baterías de iones de litio. De ahí que los propietarios de autobuses eléctricos que pretenden desmantelar las baterías no dispongan de orientaciones claras sobre cómo identificar a los operadores adecuados. Esto se puede superar describiendo indicadores clave de rendimiento en los documentos del contrato para los servicios de gestión del final de la vida útil (ver Recuadro 9).

Es importante tener en cuenta que, hasta el momento, el reciclaje completo de baterías de iones de litio solo se ha establecido en un número limitado de países de Asia (p. ej., China, Japón, Corea del Sur), Europa (p. ej., Bélgica, Finlandia, Francia, Alemania) y Norteamérica (p. ej., EE. UU.) (Sojka et al. 2020). Aunque también se están estableciendo procesos de reciclaje en países como India, Sudáfrica, Costa Rica, Colombia y Brasil, muchas regiones del mundo aún carecen de las capacidades correspondientes, por lo que el reciclaje racional dependerá de los envíos a través de fronteras internacionales. Por lo tanto, en los contratos de eliminación de baterías usadas de vehículos se puede, en algunos casos, recurrir a empresas especializadas en la gestión internacional de residuos peligrosos. Cabe señalar que dichos contratos de eliminación pueden estar asociados a costos netos (véase también la sección 2.3.4). La Medida 9 ofrece algunas orientaciones sobre cómo se pueden delegar estos costos a los productores de autobuses y baterías.

Recuadro 11: Indicadores de rendimiento preliminares de los contratos sobre la gestión racional del final de la vida útil de las baterías de los vehículos

Las baterías deberán recogerse, transportarse y procesarse de acuerdo con las buenas prácticas internacionales en todos los campos relacionados, incluyendo la seguridad contra incendios, la seguridad vial y la salud y seguridad en el trabajo.

Todas las baterías se someterán a una evaluación de su estado para determinar su potencial de reutilización/reaprovechamiento. Las baterías, los módulos de baterías y las celdas de batería que se consideren adecuadas para su reutilización/reaprovechamiento se utilizarán en consecuencia.

Las baterías, los módulos de batería y las celdas de batería que se consideren inadecuados para su reutilización/reaprovechamiento se reciclarán. El reciclaje se llevará a cabo de conformidad con las buenas prácticas internacionales y teniendo como objetivo prevenir eficazmente las emisiones de sustancias peligrosas, recuperar las materias primas incrustadas y reducir los volúmenes de residuos para su eliminación.

Los procesos de reciclaje aplicados deberán alcanzar al menos una eficiencia de reciclaje del 50 % (se recicla al menos el 50 % de la masa de la batería) y permitir la recuperación de cobre, cobalto y níquel.

Todos los pasos realizados se llevarán a cabo en pleno cumplimiento de las leyes y reglamentos nacionales e internacionales aplicables.

El operador que se haga cargo de las baterías deberá presentar pruebas del cumplimiento de los requerimientos antes mencionados. Como mínimo, el operador deberá proporcionar al cliente la siguiente documentación:

- Todas las licencias y permisos exigidos por la legislación nacional (deben facilitarse antes de hacerse cargo de las baterías).
- Un certificado sobre la gestión racional de todas las baterías recibidas. El certificado debe brindar información clara sobre el paradero de cada batería o sus piezas y fracciones, los procesos de gestión aplicados y los vínculos con los operadores intermedios que se hicieron cargo de la totalidad o parte de los materiales generados (debe proporcionarse en un plazo de 3 meses posteriores a la recepción de las baterías).

Pie de página:

- La eficiencia de reciclaje del 50 % es un valor que se puede lograr con las buenas prácticas actuales. En Europa, se planean valores mínimos obligatorios más ambiciosos (65 % para finales de 2025, 70 % para finales de 2030) y también se combinan con niveles mínimos de recuperación específicos del material (p. ej., 50 % para el litio y 90 % para el cobalto, níquel y cobre para finales de 2027) (Consejo de la Unión Europea 2023).
- La recuperación de cobre, cobalto y níquel está bien establecida en los procesos actuales de reciclaje de baterías de iones de litio. En el futuro, el litio puede añadirse a esta lista. Sin embargo, la recuperación de litio aún no es una práctica normalizada.

4 Lecturas adicionales

Las siguientes referencias se consideran materiales útiles para planificar medidas en torno a la circularidad de las baterías de autobuses eléctricos.

	Tipo de publicación	Contenido	Referencia
Reciclaje industrial de baterías de iones de litio: una revisión a fondo de las rutas del proceso metalúrgico	Artículo científico	Resumen detallado de los procesos de reciclaje existentes para baterías de iones de litio y sus especificaciones	(Brückner et al. 2020)
Estudio comparativo de los procesos de reciclaje de baterías de iones de litio	Informe científico	Buen resumen sobre la situación actual del reciclaje de baterías de iones de litio, incluyendo aspectos como las sustancias peligrosas. También ofrece un buen resumen de los principales operadores de reciclaje en todo el mundo	(Sojka et al. 2020)
Revista internacional sobre el ecosistema de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos	Informe	Descripción de los ecosistemas de reciclaje de baterías en diversos países, incluyendo Alemania, la UE, California (EE. UU.), China, Japón y Sudáfrica	(Bej et al. 2022)
Investigación sobre sistemas técnicos de autobuses eléctricos a batería en China	Informe	Análisis de desafíos y soluciones para la compra de autobuses eléctricos, instalaciones de respaldo, funcionamiento, mantenimiento y desmantelamiento en China	(Li et al. 2022)
Ecosistema de baterías: Visión global, análisis de las carencias en el contexto indio y caminos a seguir para el desarrollo de los ecosistemas	Informe	Análisis de numerosos aspectos sobre tipos de baterías, aplicaciones, normas, reutilización, reciclaje, etc. Enfoque principal en India, pero también con una fuerte perspectiva mundial	(Mandal et al. 2022)
Vida útil de las baterías de segunda vida: Resto de vida útil y análisis medioambiental	Artículo científico	Ofrece una descripción general de los conceptos de reutilización/reaprovechamiento de baterías	(Casals et al. 2019)
Un estudio sobre la seguridad de las baterías de segunda vida en los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías	Informe	Descripción general del estado actual de la reutilización de baterías de vehículos eléctricos y consideraciones y normas de seguridad relacionadas	(Christensen et al. 2023)

Tabla 4 Resumen de publicaciones útiles de lecturas adicionales

Fuente: Compilación propia

Lista de referencias

- Aamodt, A.; Cory, K.; Coney, K. (2021): Electrifying transit: A guidebook for implementing cattery electric buses, 2021. Online available at <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>, last accessed on 13 Mar 2023. Figure 2 1: The 5-step waste hierarchy
- avicenne energy (2019): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030, 2019. Online available at https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote_2_AVICENNE_Christophe-Pillot.pdf, last accessed on 13 Jul 2022.
- Ayetor, G. K.; Quansah, D. A.; Adjei, E. A. (2020): Towards zero vehicle emissions in Africa: A case study of Ghana. In: *Energy Policy* 143, p. 111606. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111606.
- Battery University (2021): Types of Lithium-ion. Online available at <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, last updated on 22 Oct 2021, last accessed on 24 Nov 2022.
- Bej, S.; Zhimomi, T.; Hochfeld, C.; Riehle, E.-B.; Rather, Z.; Bradiya, M. R.; Maity, S. (2022): International review on Recycling Ecosystem of Electric Vehicle Batteries. New Delhi, 2022. Online available at <https://changing-transport.org/publications/review-recycling-ecosystem-electric-vehicle-batteries/>, last accessed on 8 Dec 2022.
- BMU & UBA (2011): Environmentally Sound Alternatives in Mobile Air Conditioning. Federal Ministry for the Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety (BMU) and Federal Environment Agency (ed.), 2011. Online available at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/factsheet_mobile_air_conditioning1.pdf, last accessed on 7 Dec 2022.
- Brückner, L.; Frank, J.; Elwert, T. (2020): Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. In: *Metals* 10 (8), p. 1107. DOI: 10.3390/met10081107.
- California Code of Regulations (2022): Final Regulation Order, Section 1962.6, Title 13, California Code of Regulations, 2022. Online available at <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2022/accii/2acciifro1962.6.pdf>, last accessed on 19 Jan 2023.
- Casals, L. C.; García, B. A.; Canal, C. (2019): Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. In: *Journal of Environmental Management* (232), pp. 354–363. Online available at <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>.
- Christensen, P. A.; Mrozik, W.; Wise, M. S. (2023): A Study on the Safety of Second-life Batteries in Battery Energy Storage Systems. Office for Product Safety & Standards (ed.), 2023. Online available at https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1133213/safety-of-second-life-batteries-in-bess.pdf, last accessed on 10 Feb 2023.
- Council of the European Union (2023): 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. Interinstitutional File: 2020/0353(COD). Brussels.
- DERA (2022): Rohstoff Preismonitor Oktober 2022, 2022. Online available at https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2022/10-22/2022-10-preismonitor.pdf;jsessionid=2AEB7988FE0404ED8EC9B6190FFCF684.2_cid321?__blob=publicationFile&v=3, last accessed on 24 Nov 2022.
- Enel X (2023): Trasporto elettrico pubblico: le soluzioni | Enel X. Available online at <https://www.enelx.com/it/it/istituzioni/trasporto-elettrico/elettrificazione-urbana/trasporto-pubblico>, updated on 4/18/2023, checked on 4/18/2023.
- Electrive.net (1 Apr 2022): Gotion High-Tech baut LFP-Zellen mit 210 Wh/kg in Serie, 1 Apr 2022. Online available at <https://www.electrive.net/2022/04/01/gotion-high-tech-baut-lfp-zellen-mit-210-wh-kg-in-serie/>, last accessed on 30 Nov 2022.
- European Commission (2015): Circular Economy Package: Questions & Answers. Online available at https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_15_6204, last accessed on 23 Nov 2022.
- European Commission (2020): Proposak 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, 2020.
- European Union (2000): Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles, 2000.
- European Union (2006a): Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC, 2006. Online available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0040&from=EN>, last accessed on 8 Dec 2022.
- European Union (2006b): 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, 2006.
- Fuller, R.; Landrigan, P. J.; Balakrishnan, K.; Bathan, G.; Bose-O'Reilly, S.; Brauer, M.; Caravanos, J.; Chiles, T.; Cohen, A.; Corra, L.; Cropper, M.; Ferraro, G.; Hanna, J. et al. (2022): Pollution and health: a progress update. In: *The Lancet. Planetary health* 6 (6), e535-e547. DOI: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0.
- Gao, Z.; Lin, Z.; LaClair, T. J.; Liu, C.; Li, J.-M.; Birky, A. K.; Ward, J. (2017): Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. In: *Energy* 122, pp. 588–600. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.101.
- Henning, M.; Thomas, A. R.; Smyth, A. (2019): An Analysis of the Association between Changes in Ambient Temperature, Fuel Economy, and Vehicle Range for Battery Temperature, Fuel Economy, and Vehicle Range for Battery Electric and Fuel Cell Electric Buses. *Electric and Fuel Cell Electric Buses*, 2019. Online available at <https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2019/12/electric-bus-range-cold-weather.pdf>, last accessed on 24 Nov 2022.
- Li, C.; Wu, Z.; Li, W.; Mu, K. (2022): Research on Technical Systems of Battery Electric Buses in China, 2022. Online available at <https://transition-china.org/wp-content/uploads/2022/12/Research-on-Technical-Systems-of-Battery-Electric-Buses-in-China-4.pdf>, last accessed on 10 Jan 2023.
- Mandal, A.; Dikshit, C.; Singha, H.; Parihar, A.; Tripathy, A.; Mohapatra, P. (2022): Battery Ecosystem: A Global Overview, Gap Analysis in Indian context, and Way Forward for Ecosystem Development. New Delhi, 2022. Online available at https://changing-transport.org/wp-content/uploads/GIZ_Battery-ecosystem-report.pdf, last accessed on 30 Jan 2023.
- Manhart, A.; Betz, J.; Schleicher, T.; Hilbert, I.; Smit, R.; Jung, H.; Adogame, L.; Olagunju, I.; Clews, A.; Adegun, O. (2022): Management of End-of-life Li-ion Batteries through E-waste Compensation in Nigeria, 2022. Online available at

- https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/05/Management-of-End-of-life-Li-ion-Batteries-through-E-waste-Compensation-in-Nigeria_Feasibility-Study_ECoN.pdf, last accessed on 2 Dec 2022.
- MassTransit (2015): BYD Announces 12 year Battery Warranty. Online available at <https://www.masstransitmag.com/home/press-release/12058920/byd-motors-llc-byd-announces-12-year-battery-warranty>, last accessed on 13 Mar 2023.
- McGuffie, M. (2021): Driving the Shift to Electric Buses in Hot Climates - Battery Electric Buses in the Phoenix Metropolitan Area, 2021. Online available at https://www.azta.org/images/uploads/event-files/Driving_the_Shift_to_Electric_Buses_in_Hot_Weather_Climates_VM_PDF.pdf, last accessed on 24 Nov 2022.
- Miaja, G. G.; Acevedo, H.; Leticia, C. J. (2022): Análisis del monitoreo de desempeño de autobuses eléctricos en la ciudad de México, 2022. Online available at <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/Mexico-hvs-ZEBRA-analisis-desempeno-buses-electricos-cdmx-dec22.pdf>, last accessed on 7 Dec 2022.
- Poworks (2020): A Comparison of NMC/NCA Lithium ion Battery and LFP Battery - Poworks. Available online at <https://poworks.com/a-comparison-of-nmc-nca-lithium-ion-battery-and-lfp-battery>, updated on 7/28/2022, checked on 4/18/2023.
- Prevent & StEP (2022): Practical Experiences with the Basel Convention: Challenges, Good Practice and Ways to Improve Transboundary Movements of E-Waste in Low and Middle Income countries, Discussion Paper, 2022. Online available at https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/04/PREVENT-StEP_Practical_Experiences_Basel-Convention_discussion-paper-2022.pdf, last accessed on 7 Dec 2022.
- Report Linker (2021): Electric Bus Market, 2021. Online available at https://www.reportlinker.com/p06180080/Electric-Bus-Market.html?utm_source=GNW, last accessed on 24 Nov 2022.
- Slattery, M.; Dunn, J.; Kendall, A. (2021): Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. In: Resources, Conservation and Recycling 174, p. 105755. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105755.
- Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. (2020): Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. ACCUREC Recycling GmbH (ed.), 2020. Online available at <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>, last accessed on 2 Dec 2022.
- Sustainable Bus (2020): Volvo Buses, the focus on reuse of bus batteries. A cooperation with Batteryloop. 14.09.2020, 2020. Online available at <https://www.sustainable-bus.com/news/reuse-bus-batteries-volvo-buses-batteryloop-stena-recycling/>, last accessed on 16 Feb 2023.
- UNECE (2022): United Nations Global Technical Regulation on In-vehicle Battery Durability for Electrified Vehicles, 2022. Online available at https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE_TRANS_180a22e.pdf, last accessed on 10 Jan 2023.
- Wunderlich-Pfeiffer, F. (12 Oct 2022): Die Revolution der Natrium-Akkus wird absehbar. In: golem.de. 2022, 12 Oct 2022. Online available at <https://www.golem.de/news/akkutechnik-die-revolution-der-natrium-akkus-wird-absehbar-2210-168344.html>, last accessed on 19 Oct 2022.
- Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T. et al. (2021): End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. In: Cell Reports Physical Science 2 (8), p. 100537. DOI: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.

