

Reutilización de baterías de litio: un estudio integral sobre oportunidades, regulaciones y perspectivas en Alemania y Costa Rica

Reuse of Lithium Batteries: A Comprehensive Study on Opportunities, Regulations, and Perspectives in Germany and Costa Rica


Emily Denz¹, Sergio Morales-Hernández²


Fecha de recepción: 18 de enero, 2024
Fecha de aprobación: 7 de mayo, 2024

Denz, E; Morales-Hernández, S. Reutilización de baterías de litio: un estudio integral sobre oportunidades, regulaciones y perspectivas en Alemania y Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 19-32.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7003>


1 Estudiante de Maestría en Energías Renovables. HTW Berlin – University of Applied Sciences. Alemania.

 emilydenz@aol.com

 <https://orcid.org/0009-0004-0780-0024>

2 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 smorales@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-2136-0382>

Palabras clave

Baterías de litio; vehículos eléctricos; dispositivos más pequeños; segunda vida; reutilización.

Resumen

Este proyecto de investigación pone un fuerte énfasis en la reutilización de baterías de iones de litio como elemento central en la transición hacia una energía neutral en carbono. Se describen en detalle los aspectos técnicos, legales y financieros de estos procesos en Alemania para proporcionar una comprensión integral de las prácticas de reutilización y reciclaje de las baterías de litio. Se presta una atención especial a la reutilización de grandes baterías, con ejemplos concretos de la situación en Alemania. También se abordan los potenciales y desafíos relacionados con las baterías más pequeñas, señalando que en Alemania la reutilización de baterías de iones de litio de dispositivos pequeños no parece ser económicamente rentable. Una contribución significativa de este trabajo es la presentación del enfoque alemán como un modelo inspirador para países en desarrollo como Costa Rica. Se destaca la posibilidad de aplicar estos procesos en una escala menor, especialmente para dispositivos más pequeños. La idea es que el enfoque alemán puede servir como guía para el uso sostenible de baterías de iones de litio en países que aún se encuentran en fase de desarrollo. En resumen, este proyecto contribuye a crear conciencia sobre la importancia de la reutilización de baterías de iones de litio en el contexto de la transición energética y presenta ejemplos concretos, así como posibles aplicaciones para países en desarrollo, contribuyendo así a la sostenibilidad global.

Keywords

Lithium batteries; electric vehicles; smaller devices; second life; reuse.

Abstract

This research project places a strong emphasis on the reuse of lithium-ion batteries as a central element in the transition to carbon neutral energy. The technical, legal and financial aspects of these processes in Germany are described in detail to provide a comprehensive understanding of the reuse and recycling practices of lithium batteries. Special attention is given to the reuse of large batteries, with concrete examples of the situation in Germany. Potentials and challenges related to smaller batteries are also addressed, pointing out that in Germany the reuse of lithium-ion batteries from small devices does not seem to be economically profitable. A significant contribution of this paper is the presentation of the German approach as an inspiring model for developing countries such as Costa Rica. It highlights the possibility of applying these processes on a smaller scale, especially for smaller devices. The idea is that the German approach can serve as a guideline for the sustainable use of lithium-ion batteries in countries that are still in the development phase. In summary, this project contributes to raising awareness of the importance of reusing lithium-ion batteries in the context of the energy transition and presents concrete examples as well as possible applications for developing countries, thus contributing to global sustainability.

Introducción

Contexto y justificación

El uso exponencial de vehículos eléctricos en la movilidad moderna en un gran número de países de todo el mundo, ha impulsado la importancia de explorar diferentes soluciones sostenibles para el manejo de sus componentes centrales, tales como las baterías de litio. Estas baterías, que forman la parte clave de la movilidad eléctrica, representan tanto un logro tecnológico como un desafío ambiental. Con el incremento de la cantidad de baterías de litio que llegan al final de su vida útil en los vehículos eléctricos, surge una oportunidad crucial para abordar la reutilización de estas baterías.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en un tema de relevancia global: la reutilización de baterías de litio de coches eléctricos en Alemania, que al día de hoy se ha convertido en un país líder en la adopción de tecnologías sostenibles y energías renovables, se encuentra en una posición estratégica en el futuro, de la reutilización de estas baterías y sus implicaciones tanto tecnológicas como medioambientales.

Objetivos de la investigación

Este estudio tiene como objetivo contribuir a una comprensión en profundidad de los procesos, desafíos y oportunidades asociados con la reutilización de baterías de litio provenientes de vehículos eléctricos en el contexto alemán. La reutilización no solo puede contribuir a prolongar la vida útil de las baterías y reducir el impacto ambiental, sino que también puede tener implicaciones económicas significativas y apoyar a la transición hacia una economía circular. Este objetivo general estará guiado por una evaluación de las tecnologías y aplicaciones viables para la reutilización de baterías de litio, considerando su rendimiento, capacidad y compatibilidad con diferentes usos. También hará una revisión de las normativas existentes relacionadas con la reutilización de baterías de litio, así como las políticas y programas gubernamentales destinados a promover prácticas sostenibles en este ámbito. Además, el análisis de cómo Alemania aborda las baterías de litio provenientes de fuentes no automotrices, ofrecerá una perspectiva valiosa para la formulación de políticas similares en otros lugares, como Costa Rica.

Reutilización de baterías de litio

En primer lugar, es necesario contextualizar el tema general de la reutilización de baterías de litio en un entorno científico. A continuación, se examinará con mayor detalle el concepto de reutilización y se le dará un marco adecuado. Posteriormente, se ilustrará el ciclo de vida de las baterías de litio y, por último, se describirán las diversas técnicas y aplicaciones del reciclaje de baterías de litio.

Definición y concepto de reutilización

La demanda de baterías está aumentando constantemente y se espera que siga aumentando exponencialmente en el futuro, ya que los sistemas de almacenamiento de energía son componentes esenciales de la transición energética. El concepto de „Segunda Vida“ (SV) define la forma en la que es posible prolongar la vida útil de las baterías de iones de litio, permitiendo que las baterías usadas tengan una „segunda vida“ en aplicaciones alternativas, después de su „primera vida“ (PV). [1]

La fabricación de baterías requiere materias primas críticas como el litio, el cobalto y el níquel, que se extraen en condiciones críticas. Por lo tanto, es crucial el reciclaje o la reutilización de las baterías para no perder estos materiales valiosos. Las baterías de iones de litio son altamente reciclables y eficientes en términos de recuperación de materiales. Al combinar varios métodos, es posible reciclar más del 90% de una celda de batería. [2]

Sin embargo, el reciclaje de baterías conlleva costos significativos, y hasta ahora, el reciclaje de baterías pequeñas a menudo no es rentable desde el punto de vista económico. En el capítulo 5.1 también se aborda este tema. La situación es diferente en el caso de las baterías grandes, como las utilizadas en vehículos eléctricos, que son rentables debido a la cantidad de materias primas críticas que contienen. Sin embargo, para satisfacer la creciente demanda de vehículos eléctricos, se requieren más capacidades de reciclaje que aún deben desarrollarse en la Unión Europea. [2]

Con el aumento de los vehículos eléctricos, también aumenta la cantidad de baterías de iones de litio en desuso. Al mismo tiempo, la proporción de energía renovable en la mezcla energética total de Alemania está en aumento. Según la Ley de Energías Renovables de 2023 (EEG 2023) de la República Federal de Alemania, se ha fijado como objetivo generar al menos el 80% de la electricidad a partir de fuentes renovables para 2030. [3] Esto presenta la oportunidad de utilizar baterías de iones de litio retiradas de vehículos eléctricos, ya que son necesarias tecnologías de almacenamiento para integrar energías renovables en la red eléctrica. Debido a las variaciones en la generación de energía renovable, se necesitan sistemas de almacenamiento para garantizar la estabilidad de la red eléctrica alemana a 50 Hz. Esto se puede lograr mediante sistemas de almacenamiento electroquímico como las baterías de iones de litio. Sin embargo, debido a su alto costo, las baterías nuevas pueden resultar costosas, por lo que las baterías de „Segunda Vida“ ofrecen una alternativa económica. Estas baterías de iones de litio tienen suficiente capacidad después de su „primera vida“ para ser utilizadas en perfiles de consumo de energía más bajos. [1]

Ciclo de vida de las baterías de litio

La duración de vida de una batería de vehículo eléctrico se define de manera variable. Basándonos en información del fabricante y en diversos estudios, la duración de vida de una batería de iones de litio, considerando tanto su „Primera Vida“ como su „Segunda Vida“, se ilustra en la Figura 1. Por lo general, la „Primera Vida“ tiene una duración de 10 años hasta alcanzar el „Estado de Salud“ (SoH) con una capacidad residual del 75%. Hasta este punto, se estiman aproximadamente 4000 ciclos de carga. Más tarde, la batería se utiliza para su „Segunda Vida“, que por lo general finaliza después de 20 años, con una capacidad residual del 50%. Hasta este punto, se calculan alrededor de 8000 ciclos de carga. Finalmente, la batería se destina al reciclaje. La estimación de la duración de vida a partir de este punto es de otros 10 años [1].

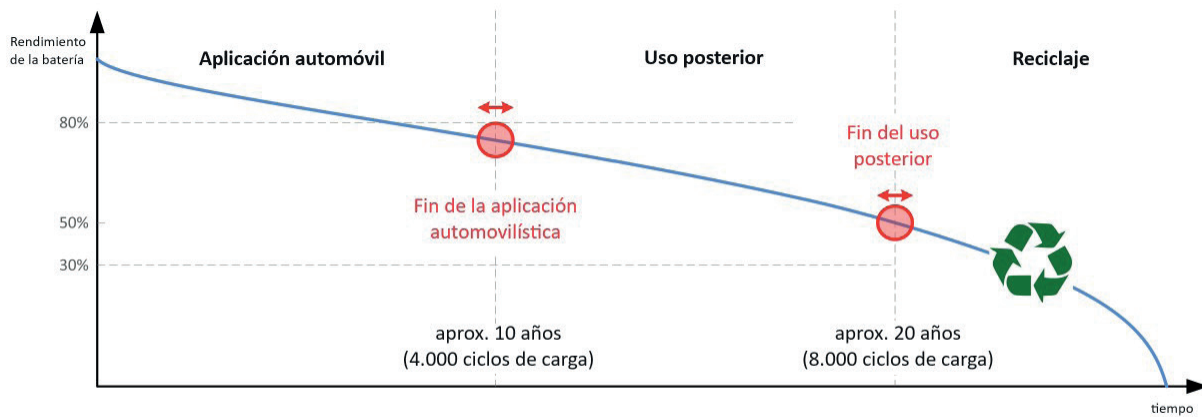


Figura 1. Ciclo de vida de las baterías de litio.

Technologías y aplicaciones de reutilización

A continuación, se ilustrará la reutilización y el proceso de la „Segunda Vida“ mediante el ejemplo de un vehículo eléctrico. La Figura 2 representará la reutilización después de la „Primera Vida“. De acuerdo con otro estudio realizado por Fischhaber, Regett y Schuster en 2016, el ciclo de vida de una batería de iones de litio consta de cuatro etapas clave. Estas etapas son en primer lugar, la operación en vehículos „Primera Vida“, seguida de la etapa de reacondicionamiento, posteriormente la aplicación de la „Segunda Vida“ y, finalmente, el reciclaje. Después de que la batería del vehículo alcance su denominado „Fin de Vida“ (EoL), es decir, el punto en el cual la batería ya no cumple con los requisitos de funcionamiento en el vehículo, se retira y se somete al proceso de reacondicionamiento. [4]

Después de que concluye la Primera Vida del vehículo eléctrico, se recopilan las baterías de iones de litio y se examinan en busca de posibles daños graves. Si se encuentra algún tipo de daño, la batería se somete directamente a un proceso de reciclaje. Si no se detectan daños, la batería de iones de litio es adecuada para una aplicación de „Segunda Vida“, y se procederá a evaluar su „Estado de Salud“ (SOH). Si la capacidad de esta batería supera el 88%, se devuelve para su reutilización en una aplicación de Primera Vida como repuesto o componente de reemplazo. Si la capacidad se encuentra entre el 75% y el 88%, se recomienda utilizar la batería sin desmontar en módulos individuales, como en sistemas de almacenamiento de energía estacionarios, así como en camiones híbridos o en la navegación de transbordadores. Sin embargo, si la capacidad es inferior al 75%, las baterías de iones de litio deben desmontarse en módulos o celdas más pequeñas y utilizarse en aplicaciones estacionarias o dispositivos más pequeños, como laptops, bicicletas eléctricas y pequeños robots domésticos [1].

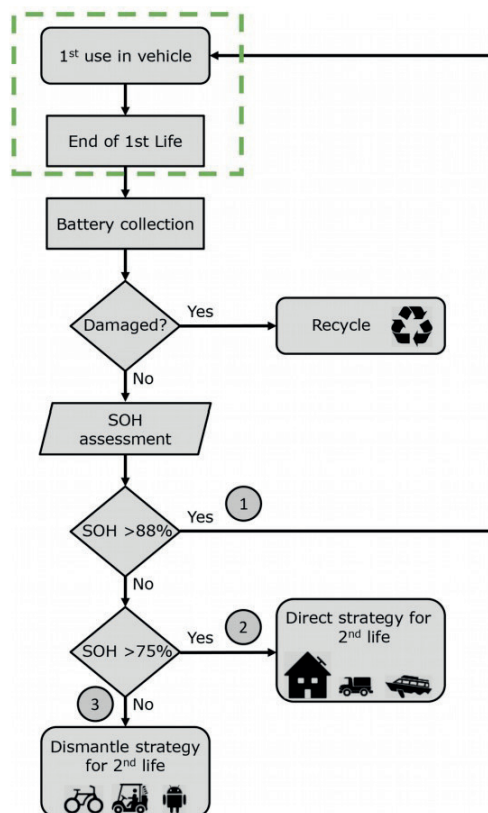


Figura 2. Segunda vida de las baterías de litio.

Como alternativa al reciclaje una vez que se alcance el final de la Segunda Vida, teóricamente se podría considerar la posibilidad de utilizar baterías envejecidas de Segunda Vida en una „Tercera Vida“ en aplicaciones con perfiles de carga aún más suaves. Sin embargo, en la práctica, este enfoque no sería económicamente viable. [4]

Debido al creciente número de vehículos eléctricos, un número cada vez mayor de empresas está optando por donar baterías a terceros países. La idea detrás de esto es que las baterías puedan ser utilizadas para otros propósitos o incluso recicladas. Sin embargo, hasta el momento, no existen directrices para la exportación de baterías de iones de litio. Por lo tanto, no hay garantía de que las baterías que aún estén en funcionamiento, sean necesarias en el lugar de destino o que haya capacidades de reciclaje disponibles allí. Es por ello que cada vez más organizaciones no gubernamentales están exigiendo estándares mínimos para la exportación de baterías usadas a terceros países. Esto tiene como objetivo garantizar que las baterías donadas y previamente utilizadas cumplan con los estándares del país de destino, conservando al menos el 80% de su capacidad, y ofreciendo una ventaja económica para los organismos receptores. Además, se busca que los actores que comercian con baterías en países de bajos ingresos estén obligados a recolectar cantidades correspondientes en el mismo país y reciclarlas de manera adecuada. [2]

En lo que respecta a los campos de aplicación de las baterías de Segunda Vida (SV), se puede afirmar que las aplicaciones de almacenamiento estacionario, la utilización en infraestructuras eléctricas y la movilidad eléctrica representan las áreas de aplicación más amplias. Según un estudio de Canals Casals, se estima que el 9% de las baterías son reintegradas en el pool de utilización de movilidad eléctrica, el 70% se utiliza en aplicaciones estacionarias o de alto rendimiento, y el 20% se emplea en aplicaciones pequeñas de bajo rendimiento. En el ámbito

de los sistemas de almacenamiento de energía, se consideran aplicaciones para energías renovables en la industria y en hogares particulares, sistemas de almacenamiento a gran escala para proporcionar servicios de regulación primaria y sistemas de suministro de energía de emergencia. [5]

En el ámbito de la movilidad, las baterías de SV se utilizan en camiones híbridos y en la navegación de transbordadores. Para reducir las emisiones de ruido y gases contaminantes, especialmente en áreas urbanas, las baterías de SV pueden utilizarse en las etapas iniciales de desplazamiento de vehículos. Según Canals Casals, la capacidad reducida no supone un problema en este contexto, ya que los vehículos son impulsados eléctricamente solo durante breves períodos de tiempo. Debido a la alta densidad de energía de las baterías de iones de litio y al tamaño de los camiones, ni el peso adicional ni el espacio necesario deberían plantear problemas significativos. Lo mismo se aplica al uso en transbordadores, donde la utilización del motor eléctrico en lugar del motor de combustión puede reducir las emisiones de ruido en los puertos [5].

En lo que respecta a aplicaciones más pequeñas, como laptops, bicicletas eléctricas o robots domésticos, también son posibles. Para ello, las baterías de iones de litio deben desmontarse en su estructura celular. Dado que las baterías de vehículos eléctricos están más avanzadas que las baterías pequeñas convencionales, pueden proporcionar el rendimiento económico y eléctrico necesario en combinación con nuevas celdas, sin necesidad de ocupar más espacio [5].

Marco legal y regulaciones en Alemania

En esta sección, se abordarán las regulaciones en Alemania relacionadas con la reutilización de baterías y las políticas y programas gubernamentales destinados a promover la reutilización. Esta información es fundamental para comprender el contexto político y normativo en torno al tema.

Normativas en Alemania relacionadas con la reutilización de baterías

La base legal para las baterías de iones de litio en Alemania es la Ley de Baterías (BattG). Esta ley se considera la implementación alemana de la Directiva Europea de Baterías (BATT) que regula la puesta en el mercado, la recogida y la eliminación ambientalmente adecuada de las baterías y acumuladores. En 2009, reemplazó al antiguo Reglamento de Baterías (BattV) y fue objeto de una revisión exhaustiva en 2021 (BattG2). Cada país de la Unión Europea tiene su propia legislación sobre baterías. El BattG se aplica únicamente en Alemania. Se considera fabricante a las empresas que, de manera comercial, introducen por primera vez baterías o acumuladores en el mercado alemán mediante venta, arrendamiento, alquiler o donación. Esto incluye tanto la producción como la importación, así como el uso de una propia marca y la distribución intencionada o negligente de baterías no registradas. [6]

Los párrafos 5 a 8 del BattG establecen la obligación del fabricante de retirar las baterías y describen las especificaciones que deben cumplirse en el sistema de devolución. El fabricante tiene la opción de desarrollar y operar su propio sistema de devolución que cubra todo el territorio, contratar a un tercero para llevar a cabo esta tarea o unirse a un sistema de devolución existente. Si no elige ninguna de estas opciones, se le pueden facturar los costos de retirada, clasificación, reciclaje o eliminación. El sistema de devolución no debe tener fines lucrativos y debe cumplir con los objetivos de recogida establecidos en el párrafo 16 de la Ley de Baterías. Las obligaciones de información descritas en el párrafo 18 requieren que el fabricante participe adecuadamente en el sistema de devolución de las baterías y proporcione al cliente información sobre los componentes de la batería. [7]

En resumen, la Ley de Baterías regula fundamentalmente el ciclo de vida completo de las baterías de iones de litio tal como ocurre en el mercado actual. Sin embargo, en este marco aún no se tienen en cuenta las aplicaciones de „Segunda Vida“. En el futuro, será necesario evaluar y definir especialmente las obligaciones y derechos de las partes involucradas para garantizar una reutilización sin problemas. [8]

Políticas y programas gubernamentales de fomento a la reutilización

En abril de 2019, la Comisión Europea publicó una evaluación de la directiva de baterías presentada en la sección anterior. En esta evaluación se determinó que la armonización en Europa se lograría de manera más efectiva a través de un reglamento en lugar de una directiva. Esto se debe a que las diferentes medidas de recopilación y reciclaje de residuos en los diferentes estados miembros habían llevado a un marco legal desigual y confuso. Un reglamento de este tipo es directamente aplicable en cada estado miembro y no necesita ser implementado primero en la legislación nacional. [6]

Ahora, la Unión Europea está preparando un nuevo reglamento de baterías más estricto, que se espera que entre en vigor en 2023. Estas nuevas regulaciones implican la creación de nuevas asociaciones circulares entre fabricantes de baterías y empresas de reciclaje. La nueva propuesta de ley consta de 79 artículos que tienen como objetivo evitar que los países de la UE implementen las regulaciones de manera diferente, como ha sido el caso hasta ahora. Este nuevo reglamento se aplica a todos los tipos de baterías portátiles, de vehículos, de tracción e industriales. Estos nuevos requisitos afectarán a la fabricación, el diseño, la etiquetación, la trazabilidad, la recopilación, la reutilización y el reciclaje de las baterías a lo largo de su ciclo de vida. [8]

En cuanto al reciclaje o la reutilización, este nuevo reglamento introduce algunos cambios. Actualmente, al menos el 50% del peso de las baterías debe reciclarse. A partir de 2025, este requisito aumentará al 65% para las baterías de iones de litio y a partir de 2030 al 70%. Además, se establecen requisitos de reciclaje específicos para el contenido de litio, cobalto, cobre, níquel y plomo de las baterías. Así la cuota de reciclaje requerida para el litio aumentará del 35% al 70% entre 2026 y 2030. Los fabricantes también están obligados a aumentar la cantidad de baterías portátiles devueltas en un 45% para 2026 y un 70% para 2030. En cuanto a la exportación de baterías usadas fuera de la UE, solo será permitida si el procedimiento de gestión de baterías del receptor cumple con los requisitos de la UE. [8]

El objetivo de este nuevo reglamento es revisar la gestión de los residuos de baterías y tomar medidas para proteger el medio ambiente y la salud humana. Esto se logrará mediante la prevención o reducción de los efectos adversos de la generación de residuos, la reducción de los efectos negativos del uso de recursos y la mejora de la eficiencia de los recursos. Este enfoque tiene como objetivo crear una economía más circular y neutral desde el punto de vista climático. [6]

Análisis de la situación actual en Alemania

Después de haber proporcionado un marco tanto definitorio como técnico, así como político y legal, al tema de la reutilización de baterías de litio, es necesario ahora examinar y analizar la situación específica en Alemania. A continuación, se profundizará en proyectos e iniciativas que contribuyen a la reutilización de baterías de iones de litio. Posteriormente, se presentarán colaboraciones entre la industria automotriz y otros sectores de energías renovables.

Proyectos e iniciativas de reutilización de baterías de litio

Alemania se encuentra a la vanguardia en Europa en el ámbito del reciclaje de baterías de iones de litio. Actualmente, la capacidad de las instalaciones se sitúa en el rango de las cifras de toneladas de cuatro dígitos como máximo. Sin embargo, se planea una expansión significativa a corto y largo plazo. Tanto las grandes corporaciones como Volkswagen o Mercedes-Benz como las pequeñas empresas con menos de 100 empleados, como Accurec o Duesenfeld, participan en el campo del reciclaje de baterías. Estas últimas ya reciclan aproximadamente 3000 toneladas de baterías al año. En particular, Accurec ha establecido metas ambiciosas para el futuro, habiéndose invertido ya 5 millones de euros en la construcción de la instalación y la infraestructura correspondiente. La instalación de reciclaje de baterías más grande hasta la fecha en Alemania se encuentra en las montañas del Erzgebirge y es operada por Nickelhütte Aue. En 2021, la cantidad de baterías de iones de litio procesadas fue de aproximadamente 4000 toneladas, aunque la capacidad de la planta permite mucho más, con un límite anual de 7000 toneladas. La siguiente tabla presenta las diferentes instalaciones de reciclaje de baterías de iones de litio en Alemania, teniendo en cuenta que los datos corresponden a abril de 2022 [9].

Empresa	Ubicación de la planta	Puesta en marcha	Capacidad actual	Capacidad planeada	Costos de inversión
Primobius	Hilchenbach (Nordrhein-Westfalen)	2022	20000 t/a	-	datos desconocidos
Accurec	Krefeld (Nordrhein-Westfalen)	2015	3250 t/a	60000 t/a	hasta ahora 5Mio€ (con actualización 13,5Mio€)
Mercedes	Kuppenheim (Baden-Württemberg)	2023	-	2500 t/a	monto de dos cifras de Mio€
Duesenfeld	Wendeburg (Niedersachsen)	2019	2900 t/a	15000 t/a	aprox. 25Mio€
Redux	Bremenhaven (Bremen)	2018	10000 t/a	-	aprox. 3Mio€
BASF	Schwarzheide (Brandenburg)	2023	datos desconocidos	datos desconocidos	datos desconocidos
Nickelhütte Aue	Aue (Sachsen)	2011	4000 t/a	7000 t/a	datos desconocidos
Roth International	Wernberg-Köblitz (Bayern)	2022	-	9000 t/a	datos desconocidos
Volkswagen	Salzgitter (Niedersachsen)	2021	1500 t/a	-	datos desconocidos
Li-Cycle	Ubicación desconocida	2023	-	10000 t/a	datos desconocidos

Figura 3. Plantas de reciclaje de baterías de litio en Alemania.

Un proyecto consorcial que involucra a 9 diferentes socios, Audi, BASF, BMW, Circular GmbH, FIWARE Foundation, Fraunhofer-Institut, System Q, TWAICE y Umicore, tiene como objetivo trabajar en la implementación de una nueva generación de gestión de productos digitales. En este contexto, se espera que el „Battery Pass“ contribuya para fines de 2024 a la creación de un pasaporte de batería aplicable de manera armonizada en la UE y a nivel mundial. El trasfondo de este proyecto radica en la crítica generalizada hacia las baterías de iones de litio debido a su alto consumo de energía en la producción y su alto contenido de materias primas metálicas. Por lo tanto, se busca mantener el foco de atención en el ciclo de vida de estas baterías y diseñar el valor agregado de acuerdo a principios circulares. Esto implica extender el ciclo de vida del sistema de baterías en su totalidad, reutilizar los recursos, materiales y componentes utilizados después de su primer uso, y establecer una cadena de suministro transparente para los materiales de las baterías. A través de este Battery Pass, se pretende desarrollar estándares para un pasaporte digital de baterías que permita una gestión sostenible y circular de las baterías de tracción. Este pasaporte facilita una documentación fluida de la vida útil de la batería, desde la producción hasta el uso, la reutilización y el reciclaje. Los datos de este pasaporte incluyen, por ejemplo, la huella de carbono, las condiciones laborales en la extracción de materias primas, la determinación del estado de la batería, así como el envejecimiento, la calidad, la capacidad de reciclaje y la reparación [10].

Colaboraciones entre la industria automotriz y otras áreas de energías renovables

El desmontaje y separación de materias primas, como níquel, cobalto y litio, de las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos es un proceso muy complejo y costoso que también requiere una gran cantidad de energía. Desde una perspectiva económica, a menudo este esfuerzo no resulta rentable para el fabricante. En la mayoría de los casos, es más sencillo para el fabricante simplemente adquirir estos recursos nuevamente.

Sin embargo, actualmente el mercado está creciendo para proveedores que reciclan baterías o les dan una segunda vida. Por ejemplo, la startup aacheniana Voltfang tiene un enfoque interesante en este sentido. Las baterías eléctricas de Tesla Model S y BMW i3 obtienen una segunda vida al utilizarse como sistemas de almacenamiento en el hogar y bancos de energía portátiles. La comercialización del producto tiene éxito debido a que los costos de inversión son significativamente menores en comparación con los sistemas de almacenamiento convencionales, con un período de amortización financiera de menos de 5 años [11].

Además, los fabricantes de automóviles están aprovechando cada vez más el potencial remanente de las baterías que ya no pueden cumplir con la capacidad de carga necesaria para los vehículos eléctricos. Volkswagen, por ejemplo, ha inaugurado una primera planta de reciclaje de baterías de alto voltaje en Salzgitter, que provienen de vehículos eléctricos. El objetivo aquí es recuperar materias primas valiosas como litio, níquel, manganeso y cobalto en un ciclo cerrado con una tasa de reutilización de aproximadamente el 90%. Sin embargo, solo se reutilizan las baterías que ya no pueden ser utilizadas de otra manera. Antes de esto, se analiza si la batería todavía tiene suficiente capacidad para ser utilizada, por ejemplo, en sistemas de almacenamiento de energía móviles, como estaciones de carga rápida flexibles o robots de carga móviles. La planta tiene como objetivo reciclar hasta 3600 sistemas de baterías al año, equivalentes a aproximadamente 1500 toneladas de material. Mercedes, por su parte, ya ha integrado tres sistemas de almacenamiento que incluyen baterías automotrices, con una capacidad total de 40 MWh, en la red eléctrica alemanas [12].

Además, existen colaboraciones entre proveedores de energía y la industria automotriz. Por ejemplo, la empresa alemana de energía EnBW está trabajando en conjunto con Audi en el desarrollo de sistemas de almacenamiento estacionarios que almacenan la electricidad de sus parques eólicos y fotovoltaicos durante períodos de exceso de energía, fortaleciendo así la red en momentos de baja producción. El centro de estos sistemas de almacenamiento está compuesto por baterías desechadas de vehículos eléctricos de Audi. Para ganar más experiencia en este campo, EnBW y Audi están planeando un sistema de referencia en las instalaciones de la planta de energía térmica en Heilbronn, que servirá como modelo técnico y de procesos para futuras instalaciones comerciales. [12]

Exploración de escenarios alternativos al escenario automotriz utilizando Costa Rica como ejemplo

En los capítulos anteriores, se ha abordado extensamente el tema de la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de vehículos eléctricos, sin embargo, ¿qué sucede con los dispositivos de menor tamaño, como las baterías de iones de litio de bicicletas eléctricas o de ordenadores portátiles? ¿Se emplean también estas baterías para su reuso en Alemania? ¿Y cuáles son las lecciones que pueden extraer los países en vías de desarrollo, como Costa Rica?

Los próximos capítulos proporcionarán una visión integral de las oportunidades y desafíos relacionados con la diversificación en el uso de baterías de iones de litio, con un enfoque especial en la experiencia alemana y el potencial de Costa Rica como un caso de estudio relevante en el contexto de la sostenibilidad energética y medioambiental. A partir de las lecciones aprendidas en los capítulos anteriores, se presentarán valiosas ideas para la formulación de un posible modelo a menor escala en Costa Rica. Se prestará especial atención a la viabilidad de establecer un proyecto piloto que, de implementarse con éxito, allanaría el camino hacia una adopción más rápida y eficiente de baterías reutilizadas en vehículos eléctricos y en la infraestructura energética del país.

Consideración de una posible aplicación y uso de baterías de litio de fuentes no automotrices en Alemania

En el contexto de la búsqueda de literatura y fuentes de información sobre el segundo ciclo de vida de baterías pequeñas, como las utilizadas en ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas en Alemania, se destaca la notoria ausencia de ejemplos e información. Esto sugiere que, en Alemania no se ha considerado económicamente atractivo invertir recursos en la reutilización de baterías pequeñas. Parece existir una falta de rentabilidad en la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de dispositivos pequeños en Alemania.

Esta situación se puede explicar en parte por la sensibilidad de las baterías de ion litio a la descarga profunda y su respuesta negativa a un almacenamiento o carga inadecuados, lo que resulta en una marcada disminución de la capacidad de funcionamiento óptimo de estas. Además, las baterías de iones de litio utilizadas en diversos dispositivos suelen tener diseños diferentes y, en muchos casos, están soldadas o integradas de forma permanente, lo que dificulta su desmontaje y reutilización, especialmente en dispositivos pequeños. La descomposición y el reciclaje de baterías pequeñas requieren conocimientos especializados y equipos, lo que aumenta los costos. Por el contrario, las baterías grandes son generalmente más accesibles y fáciles de desmontar y reparar, lo que facilita su reutilización. Además, la vida útil de las baterías pequeñas es significativamente menor que la de las baterías más grandes, lo que reduce la atractividad de la reutilización en términos de costo por unidad de energía producida [13].

Sin embargo, en el ámbito de dispositivos eléctricos más pequeños, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas, se están intensificando los esfuerzos para reciclar y desechar adecuadamente las baterías de iones de litio, con el fin de minimizar el impacto ambiental y recuperar materias primas valiosas. Para proteger tanto a las personas como al medio ambiente, es de vital importancia la correcta separación y reciclaje de los materiales valiosos, así como la recogida y el reciclaje de los residuos sólidos no clasificados.

Alemania tiene regulaciones ambientales y leyes estrictas para el reciclaje de estas baterías, con el fin de garantizar su disposición y separación adecuada. En 2022, entró en vigor el Reglamento de Eficiencia del Reciclaje de la Unión Europea. [14] El objetivo de esta regulación es proporcionar una base de cálculo uniforme para comparar la eficiencia de reciclaje entre los estados miembros de la Unión Europea. Según un estudio en 2022, la tasa de recogida de baterías de dispositivos aumentó un 9.5% con respecto al año anterior. [15]

Lecciones aprendidas para un modelo potencial en Costa Rica

En Alemania la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de dispositivos pequeños no resulta rentable debido al esfuerzo requerido en comparación con el tamaño de la batería. Alemania desempeña un papel fundamental, tanto como consumidor como productor de baterías y vehículos eléctricos. Por lo tanto, tiene más sentido reutilizar baterías grandes de vehículos eléctricos en lugar de invertir recursos en baterías más pequeñas.

La pregunta que surge es cómo aplicar globalmente este enfoque, dado que, por ejemplo, en países de América Central o el Caribe, son principalmente consumidores y no productores. Sin embargo, es probable que con el tiempo, estos países también comiencen a fabricar y utilizar vehículos eléctricos, lo que permitiría la reutilización de baterías. No obstante, este punto aún no se ha alcanzado. Por lo tanto, una opción podría ser implementar un enfoque similar, pero centrado en dispositivos más pequeños.

El trabajo de investigación anterior puede servir como un estímulo, especialmente para países en desarrollo como Costa Rica, para encontrar formas de incorporar la reutilización de baterías de litio en el mercado. Utilizando un procedimiento similar al aplicado en Alemania, pero

adaptado a dispositivos más pequeños y en una escala reducida, se podría abrir un nicho de mercado. Un proyecto piloto como este, podría facilitar la transición hacia la utilización de baterías reutilizadas en vehículos eléctricos de mayor tamaño en el futuro.

Teniendo en cuenta los datos aportados anteriormente, Costa Rica podría comenzar a reutilizar las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos como un modelo para mejorar el suministro de energía, reducir la contaminación ambiental y facilitar el acceso a la electricidad en áreas remotas. Además, también podría contribuir a reducir la necesidad de costosas baterías nuevas y ahorrar recursos.

Consideraciones sobre la aplicación del sistema a menor escala utilizando el ejemplo de Costa Rica

La idea de reutilizar las baterías de litio de pequeños dispositivos electrónicos, inspirada en la práctica alemana de reutilizar las baterías más grandes de vehículos eléctricos, conlleva una serie de pasos y consideraciones que deben ser tenidos en cuenta.

En primer lugar, al igual que ocurre en Alemania, se deben establecer sistemas de recolección en los que se recopilen baterías usadas de ordenadores portátiles, teléfonos móviles, bicicletas eléctricas y otros dispositivos. Esto podría llevarse a cabo en colaboración con fabricantes de electrónica, empresas de reciclaje y autoridades gubernamentales. Es de vital importancia garantizar que las baterías se recojan de manera segura y respetuosa con el medio ambiente.

Además, se requiere un control de calidad y una evaluación del estado de las baterías una vez que han sido recolectadas. Solo las baterías en buen estado deben considerarse para su reutilización. Esto puede lograrse, como se indicó anteriormente, mediante una evaluación exhaustiva y pruebas.

A continuación, las baterías de los dispositivos más pequeños que pueden ser reparadas o reacondicionadas deben ser preparadas para el reciclaje o la reutilización. Esto requiere habilidades y equipos especiales. En este sentido, la experiencia de Alemania puede ser exportada. En colaboración con socios locales en Costa Rica, pueden desarrollarse aplicaciones apropiadas a una escala más pequeña para estas baterías reutilizadas. Por ejemplo, podrían utilizarse en sistemas de almacenamiento de energía solar, suministro de energía de respaldo para áreas remotas o proyectos de electrificación.

El ámbito educativo y las regulaciones legales son igualmente importantes en este contexto. La población local debe recibir formación sobre el manejo seguro y la correcta disposición de las baterías. Es necesario prestar especial atención al manejo de las baterías de iones de litio, ya que requieren precauciones adicionales. En cuanto a las regulaciones legales, el gobierno de Costa Rica debe establecer marcos legales y regulaciones adecuados para fomentar la reutilización de baterías y garantizar estándares medioambientales. Además es fundamental supervisar el progreso y llevar a cabo investigaciones para asegurar que la reutilización de las baterías se realice de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Conclusiones

En resumen, se puede afirmar que la reutilización de baterías de iones de litio en Alemania representa un paso crucial en la transición energética sostenible y neutral en carbono. Este hito resulta importante, ya que debido al continuo aumento en la utilización y producción de vehículos eléctricos, el potencial de reutilización de las baterías crecerá de forma significativa en el futuro.

En Alemania, numerosas empresas ya han reconocido que la reutilización de baterías de vehículos eléctricos ofrece oportunidades y han lanzado soluciones al mercado para las baterías de segunda vida antiguas. Además, fuera del ámbito empresarial, se reconoce el potencial del reuso de baterías para nuevos propósitos, especialmente por parte de los comerciantes de energía que las utilizan como valiosos recursos en sistemas de almacenamiento.

En cuanto al uso de baterías alternativas provenientes de dispositivos no relacionados con vehículos eléctricos, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas, se puede constatar que en Alemania no resulta económicamente rentable su reutilización. Esto contrasta con los países en desarrollo como Costa Rica, que no han sido productores de vehículos eléctricos hasta el momento. Para tales países, la reutilización de baterías de dispositivos más pequeños podría ser una alternativa importante a la hora de abrirse paso en el mercado de reacondicionamiento de baterías de iones de litio.

Así que el enfoque aplicado en Alemania para la reutilización de baterías de vehículos eléctricos podría servir como modelo para Costa Rica. Esto podría llevarse a cabo en una escala más reducida, particularmente en el ámbito de las baterías más pequeñas. Este enfoque podría facilitar la entrada de Costa Rica en el mercado de producción de vehículos eléctricos en el futuro, ya que podrían aplicarse métodos similares de reacondicionamiento. Un proyecto piloto de este tipo podría servir como precursor de implementaciones futuras a mayor escala y, por lo tanto, contribuir de manera significativa a la utilización sostenible de baterías de iones de litio en Costa Rica.

Referencias

- [1] M. Atzorn, C. Gey, F. Leplow und M. Piayda, „Wiederverwendung und Recycling von Lithium-Ionen-Akkus,“ Hochschule RheinMain, Wiesbaden Rüsselsheim, 2018.
- [2] J. Broich, „Das zweite Leben der Lithium-Ionen-Batterien,“ 22 06 2022. [Online]. Available: <https://www.energiezukunft.eu/wirtschaft/das-zweite-leben-der-lithium-ionen-batterien/>. [Zugriff am 17 09 2023].
- [3] B. d. Justiz, „Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG),“ 2023. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_1.html. [Zugriff am 17 09 2023].
- [4] S. Fischhaber, A. Regett und S. F. Schuster, „Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen,“ Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), Frankfurt am Main, 2016.
- [5] L. C. Casals, B. Amante García und L. V. Cremades, „Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life,“ in *Journal of Industrial Engineering and Management*, Catalunya, Universidad Politècnica de Catalunya, 2017, pp. 271 - 273.
- [6] Hesselmann, „Das Batteriegesetz,“ 2023. [Online]. Available: https://www.batteriegesetz.de/#gesetz_60. [Zugriff am 18 09 2023].
- [7] B. d. Justiz, „Batteriegesetz (BattG),“ 2021. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/battg/inhalts_bersicht.html. [Zugriff am 17 09 2023].
- [8] A. Seeger, „EU-Batterieverordnung stellt neue Anforderungen an die Industrie,“ STENA Recycling, 2023. [Online]. Available: <https://www.stenarecycling.com/de/news-einblicke/einblicke--inspirationen/leitfaeden-artikel/eu-batterieverordnung-stellt-neue-anforderungen-an-die-industrie/#:~:text=Derzeit%20m%C3%BCssen%20mindestens%2050%20%25%20des,und%20Bleigehalt%20von%20Batterien%>. [Zugriff am 18 09 2023].
- [9] S. Hartmann, „Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien,“ Euwid, 24 05 2022. [Online]. Available: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/>. [Zugriff am 22 09 2023].
- [10] T. Weber, „Battery Pass - Umsetzung einer neuen Generation digitaler Produkthandhabung,“ CircularEconomyInitiative, 2023. [Online]. Available: <https://www.circular-economy-initiative.de/battery-pass-de>. [Zugriff am 22 09 2023].
- [11] „Voltfang,“ 2023. [Online]. Available: <https://voltfang.de/batteriespeicher-industrie/batteriegrossspeicher/>. [Zugriff am 19 09 2023].

- [12] M. Kaiser, W. Gomoll und S. Grundhoff, „Wiederverwendung von alten E-Auto-Akkus: Stadionbeleuchtung, Haus-Stromspeicher,“ *EFahrer*, 15 03 2021. [Online]. Available: https://efahrer.chip.de/news/wiederverwendung-von-alten-e-auto-akkus-stadionbeleuchtung-haus-stromspeicher_104330. [Zugriff am 19 09 2023].
- [13] J. Wegener, „Upcycling: Lithium-Ionen-Akkus testen und wiederverwenden,“ 10 05 2021. [Online]. Available: <https://www.heise.de/ratgeber/Upcycling-Lithium-Ionen-Akkus-testen-und-wiederverwenden-6033384.html>. [Zugriff am 30 10 2023].
- [14] E. Kommission, „REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL,“ 12 07 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>. [Zugriff am 30 10 2023].
- [15] Umweltbundesamt, „Altbatterien - Im Jahr 2022 hat Deutschland alle von der EU geforderten Mindestziele erreicht,“ 23 10 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>. [Zugriff am 30 10 2023].

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para traducción alemán/español. También, para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, esto nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.