



ELLEN MACARTHUR
FOUNDATION

LIDERANDO A TRANSIÇÃO

**TRANSFORMANDO
RISCOS EM
RECOMPENSAS COM UMA
ECONOMIA CIRCULAR
PARA BATERIAS DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS
E MINERAIS CRÍTICOS**

SUMÁRIO

00	RESUMO EXECUTIVO	8
01	RISCOS SISTÊMICOS NA CADEIA DE VALOR DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	13
02	UMA TRANSFORMAÇÃO SISTÊMICA RUMO A UMA ECONOMIA CIRCULAR DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
03	CINCO ÁREAS DE DESTAQUE PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	39
04	CINCO ÁREAS DE DESTAQUE PARA IMPULSIONAR A ECONOMIA CIRCULAR DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	51
	APÊNDICE	66
	NOTAS FINAIS	68

O mercado de veículos elétricos está expandindo rapidamente e, com eles, também aumenta o uso de baterias e os minerais críticos que sustentam essa transição. Essa mudança está criando novas oportunidades comerciais, mas também está deslocando a indústria automotiva de cadeias de valor centradas em combustíveis para cadeias de valor centradas em materiais, expondo empresas e economias à volatilidade de preços, gargalos de oferta e crescentes riscos ambientais e sociais.

Elaborado pela Fundação Ellen MacArthur, este relatório apresenta como uma visão prática, estrutural e sistêmica da economia circular pode transformar a economia de baterias para veículos elétricos, destravando valor econômico ao mesmo tempo em que fomenta sua resiliência. O documento propõe um modelo de visão sistêmica no qual as baterias entregam o máximo possível de serviços de mobilidade e energia; são mantidas em uso de alto valor por meio de manutenção, reparo, recondição e remanufatura; e, ao final, são coletadas e recicladas com alta qualidade, de modo que os minerais críticos nunca se tornem resíduos.

Este relatório traduz essa ambição em cinco ciclos circulares complementares (desde o uso intensivo, extensão de vida útil e cascata para aplicações de segunda vida, até a reciclagem de alta qualidade e o intercâmbio de informações que viabiliza esses ciclos) e três níveis de ação circular: design de produtos e componentes, modelos de negócio e os sistemas mais amplos de infraestrutura, financiamento e políticas públicas. Nosso modelo de visão foi construído com base em mais de 15 anos de pesquisa, advocacy e colaboração em economia circular, envolvendo setores público e privado e uma ampla variedade de indústrias.

Ancorado em exemplos práticos e em “áreas de destaque” já emergentes ao longo da cadeia de valor, e informado por interações diretas com stakeholders e lideranças do setor, o relatório apresenta recomendações com foco comercial para as indústrias de baterias para veículos elétricos e atores associados — fabricante do equipamento original (OEMs por sua sigla em inglês) e fabricantes de baterias, recicladores e operadores logísticos, empresas de energia e mobilidade, formuladores de políticas públicas e investidores — com o objetivo de acelerar uma economia circular de baterias que seja competitiva, escalável e justa. O documento sintetiza os principais alavancadores de decisão para ação imediata e oferece uma base para que organizações aprofundem análises e implementações em seus próprios contextos.

Escopo e objetivo

É importante considerar o escopo. Este relatório não tem a intenção de ser um catálogo exaustivo de todas as intervenções circulares, mecanismos de negócio ou instrumentos de política pública. A ausência de abordagens específicas não implica que sejam menos relevantes. Além disso, o relatório não busca reproduzir projeções quantitativas ou modelagens de cenários já apresentadas em estudos sobre minerais críticos e reciclagem. Em vez disso, foi elaborado para um público que abrange toda a cadeia de valor e prioriza temas com aplicabilidade comercial imediata, que podem ser impulsionados por colaboração, investimento e advocacy em políticas públicas — e fortalecidos pela expertise e pelo papel de articulação da Fundação Ellen MacArthur.

Enxergamos esta publicação como um dos primeiros passos de uma agenda plurianual da Fundação Ellen MacArthur dedicada a acelerar a economia circular para minerais críticos na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos. A partir das áreas de destaque apresentados, trabalharemos com parceiros, membros e demais stakeholders para desenvolver análises mais aprofundadas, caminhos de implementação setoriais e propostas detalhadas de colaboração entre indústrias, com o objetivo de mobilizar ações em escala.

Jonquil Hackenberg
CEO
Fundação Ellen MacArthur

Wen-Yu Weng
Líder Executiva – Minerais Críticos
Fundação Ellen MacArthur

“Este documento apresenta um roteiro prático para escalar a circularidade ao longo das cadeias de valor, ao mesmo tempo em que enfatiza a necessidade de uma oferta de materiais produzidos de forma responsável para atender à crescente demanda. Ele demonstra que a circularidade das baterias não pode depender apenas da reciclagem; estender a vida útil das baterias e viabilizar novos caminhos de reutilização são essenciais para maximizar a durabilidade e a vida útil dos minerais e metais que elas contêm. À medida que a economia se afasta dos combustíveis fósseis, estratégias circulares serão fundamentais para garantir que esse estoque finito de materiais permaneça em uso produtivo pelo maior tempo possível.”

**Dana Cartwright, Diretora (interina) de Inovação
ICMM**

“O China Automotive Technology and Research Center é um importante think tank automotivo chinês dedicado ao desenvolvimento da reciclagem de materiais de baterias como uma solução central para as restrições de recursos minerais críticos. Comprometido em colaborar com a Fundação Ellen MacArthur, defendemos o fortalecimento da cooperação global para a construção de padrões unificados e governança de dados, a fim de alcançar uma economia circular de alto valor para minerais críticos.”

**Equipe de Baterias para Veículos Elétricos
CATARC**

“A Fundação Ellen MacArthur propõe uma abordagem sistêmica para o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos e a gestão de minerais críticos. Trata-se de um avanço importante no debate sobre economia circular para baterias de veículos elétricos. Conceitos como segunda vida, recondição, reciclagem e otimização de design já foram discutidos, mas raramente apresentados de forma integrada — algo que a Fundação Ellen MacArthur consegue realizar neste relatório. O Faraday Institution tem orgulho de ter contribuído para este trabalho, em linha com sua ambição de desenvolver soluções para baterias que sejam sustentáveis, de alto desempenho e seguras.”

**Andrew Deadman, Gerente de Parcerias Internacionais
de P&D
FARADAY INSTITUTION**

“Este relatório oferece um marco claro e oportuno para traduzir os princípios da economia circular em ações práticas e escaláveis para baterias de veículos elétricos e minerais críticos. Ao conectar a ambição das políticas públicas com caminhos operacionais concretos, demonstra como a colaboração entre indústrias e o design de cadeias de suprimentos circulares podem reduzir riscos, destravar valor e fortalecer a resiliência ao longo do ciclo de vida das baterias. Os insights são altamente relevantes para operadores logísticos que buscam migrar de modelos lineares para sistemas circulares em escala.”

**Sajeda Ismail, Gerente da Rede Comercial de Baterias para
Veículos Elétricos
DHL SERVICE LOGISTICS**

“Sistemas circulares de baterias já não são opcionais — são essenciais para a competitividade de longo prazo, a segurança de suprimento e a resiliência ao longo da cadeia de valor de veículos elétricos. Liderando a Transição oferece a tão necessária clareza sistêmica e uma linguagem comum que permite alinhar indústria, formuladores de políticas públicas e sociedade civil em torno de caminhos práticos para uma economia circular de baterias. Na Global Battery Alliance, temos facilitado esforços coletivos ao longo da cadeia de valor de baterias, inclusive por meio do Battery Passport, para construir estruturas confiáveis e harmonizadas que recompensem práticas responsáveis, incentivem o design circular e a recuperação de materiais, e transformem restrições em valor resiliente e equitativo. Esperamos colaborar com parceiros especializados, como a Fundação Ellen MacArthur, para acelerar esse progresso.”

**Inga Petersen, Diretora Executiva
GLOBAL BATTERY ALLIANCE**

“Este relatório apresenta uma síntese abrangente e ilustrativa dos principais conceitos para o uso circular de baterias. A perspectiva holística sobre o tema — incluindo o design de baterias, a maximização da durabilidade, a facilitação da reutilização e a possibilidade de reparo — representa uma contribuição importante para um debate que, com frequência, é reduzido à recuperação eficiente de minerais por meio da reciclagem. Os estudos de caso oferecem exemplos úteis sobre a viabilidade e os benefícios de muitos desses conceitos.”

**Dr. Georg Bieker, Líder do Centro de Cadeia
de Suprimentos
ICCT**

“Este relatório apresenta um roteiro claro para destravar todo o potencial da circularidade em baterias de veículos elétricos e minerais críticos. Na Syensqo, acreditamos que a colaboração intersetorial e a inovação são essenciais para construir cadeias de suprimentos resilientes e sustentáveis. Temos orgulho de apoiar iniciativas que promovem mudanças positivas tanto para a indústria quanto para a sociedade.”

Laurent Cohen, Desenvolvimento Estratégico e Alianças para Soluções em Mineração

SYENSQO

“A eletrificação é o futuro, oferecendo veículos mais eficientes e reduzindo as emissões ao longo do ciclo de vida. E a eletrificação deve caminhar lado a lado com a circularidade. Este relatório mostra como a economia circular pode ajudar a reduzir riscos, preservar recursos e acelerar a transição para uma mobilidade neutra em carbono — permitindo que nossos clientes se beneficiem de veículos duráveis e produzidos de forma responsável.”

Vanessa Butani, Diretora Global de Sustentabilidade

VOLVO CARS

“A futura matriz energética pode ser definida por três palavras: distribuída, inteligente e circular. Diferentemente dos combustíveis fósseis, que são queimados no uso, os materiais dos sistemas de energia de zero carbono podem ser reciclados. A circularidade não é apenas uma responsabilidade ambiental; é a base da competitividade econômica e da resiliência dos sistemas na era de zero carbono.”

Robin Zeng, CEO

CATL

“Este relatório é leitura essencial para qualquer pessoa que busca compreender como nós, enquanto comunidade global, podemos avançar na circularidade de baterias para veículos elétricos e garantir que os impactos dessas baterias sobre o meio ambiente e as comunidades ao redor do mundo sejam minimizados.”

Renske Schuitmaker, Oficial de Gestão de Programas

**PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS
PARA O MEIO AMBIENTE**

“Uma estratégia comum europeia para uma economia circular de baterias é fundamental para enfrentar o acúmulo de baterias de veículos elétricos em fim de vida e pode se tornar uma oportunidade industrial para a Europa. Para isso, precisamos cooperar além das fronteiras, tanto no nível da pesquisa quanto no desenvolvimento industrial.”

Nina Dahl, Diretora de Pesquisa

SINTEF

“O BMW Group recebe este relatório com satisfação e sua perspectiva abrangente e sistêmica sobre como estabelecer uma economia verdadeiramente circular em toda a cadeia de valor de baterias para veículos elétricos. Ele oferece um roteiro sólido e pragmático para implementação. Ao mesmo tempo, reconhecemos que alcançar essa visão exigirá avanços ambiciosos em design, modelos de negócio inovadores, cooperação intersetorial e um ambiente regulatório favorável. O BMW Group está pronto para contribuir — e ajudar a liderar — a transição para uma economia circular. Esperamos trabalhar com diversos parceiros que compartilham dessa ambição.”

**Jörg Lederbauer, Vice-Presidente de Economia Circular,
Fornecimento de Peças de Reposição para Baterias de Alta
Tensão e Powertrain Elétrico**

BMW GROUP

EQUIPE PRINCIPAL

Wen-Yu Weng

Líder Executiva – Minerais Críticos

Cindy Venho

Gerente de Programa
– Minerais Críticos

Lenaïc Gravis

Gerente de Desenvolvimento
Editorial

João Merico

Associado Sênior de Estratégia –
Minerais Críticos

Shaobo Zhou

Analista de Projetos
(escritório da China)

Hanxiang Cong

Gerente de Projetos
(escritório da China)

Ian Banks

Consultor Editorial Independente

EQUIPE AMPLIADA

Alex Hedley

Designer Gráfico Sênior

Ariel Bramble

Gerente Sênior de Desenvolvimento
– Receita

Constance des Courieres

Oficial de Políticas de Minerais
Críticos – Políticas Públicas

Danoush Mohajeri

Gerente de Parcerias
– Minerais Críticos

Emily Pearce

Gerente de Projetos
de Comunicação

Katie Attrill

Gerente de Rede – Minerais Críticos

Laura Collacott

Editora Independente

Matt Barber

Designer Gráfico

Pip Dragonetti

Gerente Sênior de Desenvolvimento
– Filantropia

Yisong Guan

Representante-Chefe do Escritório
de Pequim

Ziwei Yang

Gerente de Comunicação
(escritório da China)

CONTRIBUIDORES

A Fundação Ellen MacArthur agradece às organizações e aos indivíduos que contribuíram para o desenvolvimento deste relatório por meio de suas contribuições construtivas. Agradecemos aos nossos parceiros e membros, bem como a stakeholders-chave da indústria, cujo conhecimento especializado e feedback fortaleceram este trabalho.

Africa E-Mobility Alliance

Arkema

BASF

BMW Group

CATARC

Cling Systems

Contemporary Amperex Technology Co Ltd (CATL)

DHL Service Logistics

Global Battery Alliance

GRST

ICCT

ICMM

JLR

Polestar

SINTEF

Stena Recycling

Syensqo

The Faraday Institution

United Nations Environment Programme (UNEP)

Volvo Cars

Zhejiang Huayou Recycling Technology Co., Ltd.

Ressaltamos que a contribuição para este relatório, ou qualquer parte dele, bem como qualquer referência a organizações terceiras no estudo, não indica qualquer tipo de parceria ou relação de agência entre os contribuintes e a Fundação, nem constitui endosso, por parte desses contribuintes ou terceiros, das conclusões ou recomendações apresentadas.

SOBRE A FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR

A Fundação Ellen MacArthur é uma organização internacional sem fins lucrativos que desenvolve e promove a economia circular para enfrentar alguns dos maiores desafios do nosso tempo, como as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade, os resíduos e a poluição. Trabalhamos com nossa rede de tomadores de decisão dos setores público e privado, bem como com a academia, para desenvolver capacidades, explorar oportunidades de colaboração e projetar e implementar iniciativas e soluções de economia circular.

Cada vez mais baseada em energia renovável, a economia circular é orientada pelo design para eliminar resíduos, manter produtos e materiais em circulação e regenerar a natureza, criando resiliência e prosperidade para empresas, o meio ambiente e a sociedade.

Mais informações:
ellenmacarthurfoundation.org

Para citar este relatório, utilize a seguinte referência:
Fundação Ellen MacArthur, Liderando a transição:
Transformando Riscos Em Recompensas Com Uma
Economia Circular Para Baterias De Veículos Elétricos
E Minerais Críticos (2026)

AVISO LEGAL

Este documento foi elaborado pela Fundação Ellen MacArthur (a “Fundação”). A Fundação empregou cuidado e diligência na sua preparação, com base em informações que considera confiáveis, mas não faz quaisquer declarações nem oferece garantias, confirmações ou compromissos (expressos ou implícitos) em relação a este documento ou a qualquer parte de seu conteúdo (quanto à sua exatidão, integralidade, qualidade, adequação a qualquer finalidade, conformidade com a legislação ou outros aspectos). A Fundação não monitora nem modera quaisquer sites ou recursos externos mencionados ou vinculados neste documento. Este documento não tem caráter exaustivo e nenhum de seus conteúdos deve ser interpretado como aconselhamento de qualquer natureza. Qualquer confiança depositada neste material é de exclusiva responsabilidade e risco do leitor.

Na máxima extensão permitida pela legislação aplicável, a Fundação, cada entidade de seu grupo e cada uma de suas organizações associadas, bem como seus respectivos empregados, colaboradores, dirigentes, agentes e representantes, eximem-se integralmente de qualquer responsabilidade por perdas ou danos de qualquer natureza (sejam diretos ou indiretos, e decorrentes de contrato, ato ilícito, descumprimento de obrigação legal ou outros), resultantes de ou relacionados a este documento ou a qualquer parte de seu conteúdo.

A Fundação não é fornecedora de, nem possui qualquer afiliação com, e não recomenda nem endossa quaisquer terceiros ou os produtos ou serviços mencionados neste documento.

Baterias de veículos elétricos: uma prioridade estratégica crescente

As baterias de veículos elétricos (VE) estão se tornando uma classe de ativos estratégica na transição energética. À medida que sua adoção se acelera, a indústria automotiva passa de veículos centrados em combustíveis para veículos centrados em materiais. Estima-se que um veículo elétrico típico contenha mais de 200 kg de minerais críticos — cerca de seis vezes mais do que um veículo com motor de combustão interna. Mais especificamente, as baterias de VE dependem de uma série de minerais críticos valiosos, como lítio, grafite, cobalto e níquel.

Atualmente, a cadeia de valor de baterias para veículos elétricos permanece altamente intensiva em materiais, geograficamente concentrada e estruturalmente linear, o que gera riscos sistêmicos à medida que a demanda cresce. Possíveis déficits de oferta de minerais-chave, exposição a impactos ambientais e sociais, e desafios nas etapas de mineração, processamento, fabricação e reciclagem podem aumentar custos, desestabilizar mercados, intensificar a volatilidade de preços e desacelerar a expansão. Em conjunto, essas dinâmicas ampliam a fragilidade da cadeia de valor justamente no momento em que o sistema precisa escalar rapidamente.

É necessário um redesenho circular sistêmico ao longo de toda a cadeia de valor. Um redesenho mais amplo de produtos e componentes, modelos de negócio e do sistema energia-mobilidade é essencial para fortalecer a resiliência e reduzir riscos sistêmicos. Escalar a transição para baterias circulares em veículos elétricos exige, portanto, ir além de soluções incrementais ou paliativas avançando para um redesenho em nível sistêmico — capaz de gerar oportunidades econômicas ao longo da cadeia de valor, reduzir a intensidade material, mitigar riscos de abastecimento e diminuir impactos ambientais e sociais.



Economia circular: transformando risco em vantagem competitiva

Uma abordagem de economia circular pode converter esses desafios em oportunidade competitiva. Ao manter as baterias e os minerais críticos em uso de alto valor ao longo de múltiplos ciclos de vida — e ao projetar os sistemas de mobilidade, energia, dados e políticas públicas que os sustentam — uma economia circular de baterias para veículos elétricos torna-se economicamente viável em escala. Para líderes empresariais ao longo da cadeia de valor, essa abordagem não é um complemento, mas um instrumento estratégico para a liderança executiva, capaz de:

- **Proteger margens** ao aumentar a utilização, estender a vida útil das baterias e evitar substituições prematuras
- **Reduzir a exposição a mercados voláteis** de minerais e a cadeias de suprimento concentradas
- **Criar novas fontes de receita e modelos de negócio** ao gerir baterias e materiais como ativos (serviços, upgrades, segunda vida e fluxos circulares de minerais)

- **Fortalecer a resiliência** e a licença para operar em um contexto de disrupções geopolíticas e regulação mais rigorosa.

A forma como os minerais críticos nas baterias de veículos elétricos são extraídos, utilizados e recuperados determina grande parte do valor e do risco ao longo da cadeia de valor — tornando a economia circular um imperativo estratégico para líderes da indústria.

As decisões empresariais que orientam a gestão desses minerais — por meio de estratégias, modelos de negócio e design — terão impactos profundos tanto sobre o valor comercial capturado pelas empresas quanto sobre sua exposição a riscos de abastecimento, custos e outras incertezas ao longo da cadeia de valor de baterias para veículos elétricos. À medida que o mercado de VE entra em uma fase de rápida expansão, a janela para moldar esses sistemas operacionais é agora: investimentos antecipados em abordagens de economia circular oferecem o maior potencial para destravar resiliência, competitividade e valor de longo prazo.

Superando barreiras organizacionais: rumo a uma estratégia em nível sistêmico

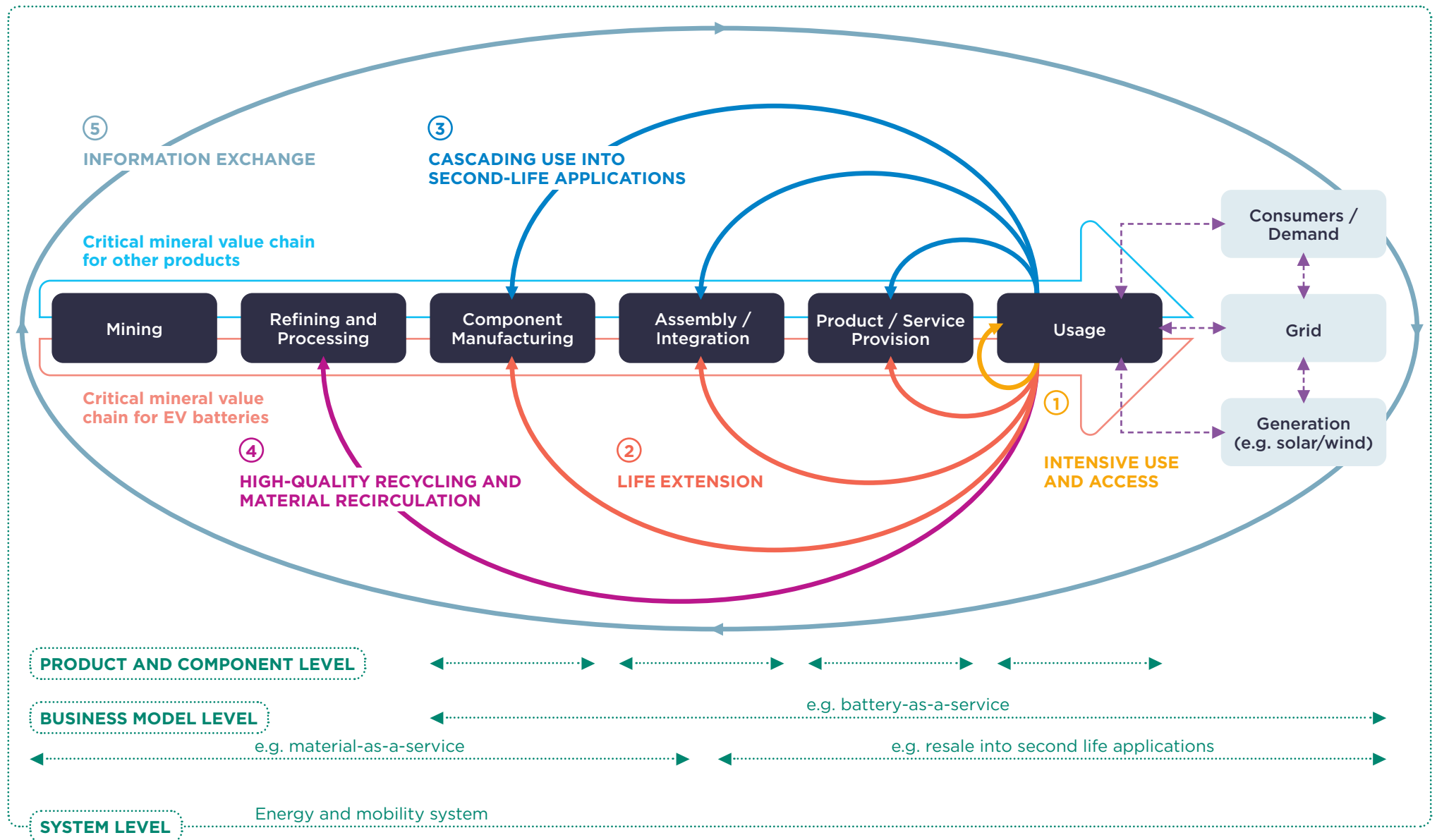
A narrativa e os esforços atuais de economia circular ainda permanecem fragmentados e, em muitos casos, concentram-se nas etapas de fim de vida. Análises robustas sobre o crescimento da demanda por veículos elétricos, restrições de minerais, capacidade de reciclagem e caminhos de políticas públicas já foram desenvolvidas, e ações da indústria foram mobilizadas — em sua maioria focadas na reciclagem e, em menor medida, na segunda vida. No entanto, esse foco restrito pode limitar a adoção de alavancas relevantes, inovadoras e de maior valor agregado que poderiam ser aplicadas antes da reciclagem. Ao mesmo tempo, o descompasso entre oferta e demanda permanece sem solução no curto prazo, devido ao significativo intervalo de tempo entre a produção das baterias e o fim de sua primeira vida, enquanto uma pressão desproporcional é colocada sobre a rápida expansão da infraestrutura de reciclagem, sem considerar um conjunto mais amplo de soluções de fim de vida.

A visão de economia circular apresentada neste relatório busca, intencionalmente, reequilibrar a discussão e a ambição — deslocando o foco da otimização do fim de vida para um redesenho em nível sistêmico. Os benefícios econômicos da economia circular para baterias de veículos elétricos são alcançados por meio de ações coordenadas e alinhadas entre os atores da cadeia de valor, e não por iniciativas isoladas. As decisões tomadas em cada etapa da cadeia podem restringir ou viabilizar a economia circular em todas as demais. Por exemplo, decisões a montante relacionadas ao design e à arquitetura das baterias, ao acesso a dados e à sua titularidade determinam como essas baterias poderão circular, na prática, a jusante. Da mesma forma, o acesso a mercados, padrões e sinais regulatórios influenciam a capacidade dos atores a montante de inovar e investir em atividades circulares com segurança. As interdependências, trade-offs e questões em aberto precisarão ser modeladas e adaptadas às realidades locais de mercado e regulação, de modo a permitir que líderes empresariais e formuladores de políticas públicas gerenciem baterias e seus minerais críticos como os ativos estratégicos que são.

O resultado é um marco relevante do ponto de vista comercial, que apoia lideranças a transformar ambições de economia circular — antes dispersas em projetos piloto — em uma estratégia coerente ao longo da cadeia de valor, evidenciando tanto o valor financeiro tangível quanto os benefícios estratégicos mais amplos. O relatório oferece uma linguagem comum para alinhar investimentos, parcerias e desenvolvimento de capacidades, além de identificar perdas de valor, acúmulo de riscos e as intervenções capazes de gerar os maiores retornos sistêmicos. Essa abordagem é traduzida em ação por meio de duas lentes:

- 1. Cinco ciclos circulares para baterias de veículos elétricos,** que ilustram os “ciclos internos”, onde se retém maior valor (uso intensivo, extensão de vida útil e uso em cascata), o “ciclo externo” de reciclagem de alta qualidade, e o ciclo transversal de intercâmbio de informações, que atua como um habilitador fundamental em todo o sistema
- 2. Três níveis de ação** que operacionalizam a economia circular, demonstrando como o pensamento circular pode ser aplicado para gerar mudanças sistêmicas em cada nível:
 - Design de produtos e componentes
 - Modelos de negócio
 - Sistemas

Como a economia circular impulsiona a inovação e a criação de valor em todo o sistema de minerais críticos de baterias de VE



Loops: where material and value can be retained

Levels: where decisions are made to unlock the loops

Energy flows: how energy transfers in the wider energy-mobility system

Mobilizando a mudança sistêmica: cinco áreas de destaque para ação estratégica

Cinco principais “áreas de destaque” — oportunidade de alto potencial para colaboração ao longo da cadeia de valor — foram identificados com base em insights coletados junto a stakeholders da cadeia e em estudos de caso reais. Para cada um deles, o relatório apresenta primeiros passos imediatos que os atores do sistema podem adotar para impulsionar avanços significativos.

Lideranças ao longo da cadeia de valor de baterias para veículos elétricos podem agir agora, concentrando-se em cinco ações estratégicas:

1. Projetar baterias para circularidade, e não para descarte

Repensar as baterias de veículos elétricos não como ativos de uso único, mas como componentes duráveis de um sistema mais amplo de mobilidade e energia, projetados intencionalmente para durar, serem desmontados e reutilizados em diferentes aplicações ao longo de múltiplos ciclos de vida. Para isso, o sistema deve incorporar, desde o início, modularidade, desmontagem segura/desvinculação de componentes (debonding), diagnóstico e rastreabilidade, de modo que reparo, remanufatura, segunda vida e reciclagem de alta qualidade sejam tecnicamente e economicamente viáveis em escala.

2. Repensar o papel das baterias em sistemas energia-mobilidade otimizados

Redefinir o valor das baterias não como a maximização da capacidade em cada veículo, mas como a entrega do desempenho adequado para cada uso, com sistemas de mobilidade projetados para oferecer acesso a serviços, e não baterias cada vez maiores. Isso pode ser alcançado ao substituir produtos superdimensionados e excessivamente especificados por soluções ajustadas às necessidades reais. Essa mudança deve ser apoiada pelo redesenho do sistema energia-mobilidade, redefinindo as expectativas padrão sobre requisitos veiculares e permitindo que os usuários acessem utilidade funcional igual ou superior por meio da inovação em modelos de serviço ao longo da cadeia de valor de baterias.

3. Escalar modelos de negócio circulares

Reenquadrar baterias e materiais não como produtos vendidos uma única vez, mas como ativos geridos ao longo do tempo por meio de modelos que recompensem durabilidade, desempenho, recuperação e uso em aplicações de segunda vida, ao longo de múltiplos ciclos. Isso inclui a expansão de modelos como Battery-as-a-Service, assinaturas de manutenção e upgrade, garantias baseadas em desempenho, ofertas estruturadas de segunda vida e iniciativas de Material-as-a-Service, de forma que durabilidade, disponibilidade operacional, recuperação e valor residual se tornem incentivos comerciais e resultados financeiros, e não aspectos secundários.

4. Construir e co-investir em infraestrutura circular regional

Reimaginar a cadeia de valor de baterias como uma rede intencionalmente projetada de infraestrutura regional e inter-regional que permita a circulação eficiente, resiliente e transparente de materiais. Isso implica tratar atividades como coleta, triagem, teste/classificação, reparo/remanufatura, reaproveitamento e reciclagem como infraestrutura essencial; além de reduzir riscos por meio de modelos de investimento compartilhado e contratos de longo prazo de fornecimento (feedstock) e escoamento (offtake), que tornem os fluxos circulares mais previsíveis.

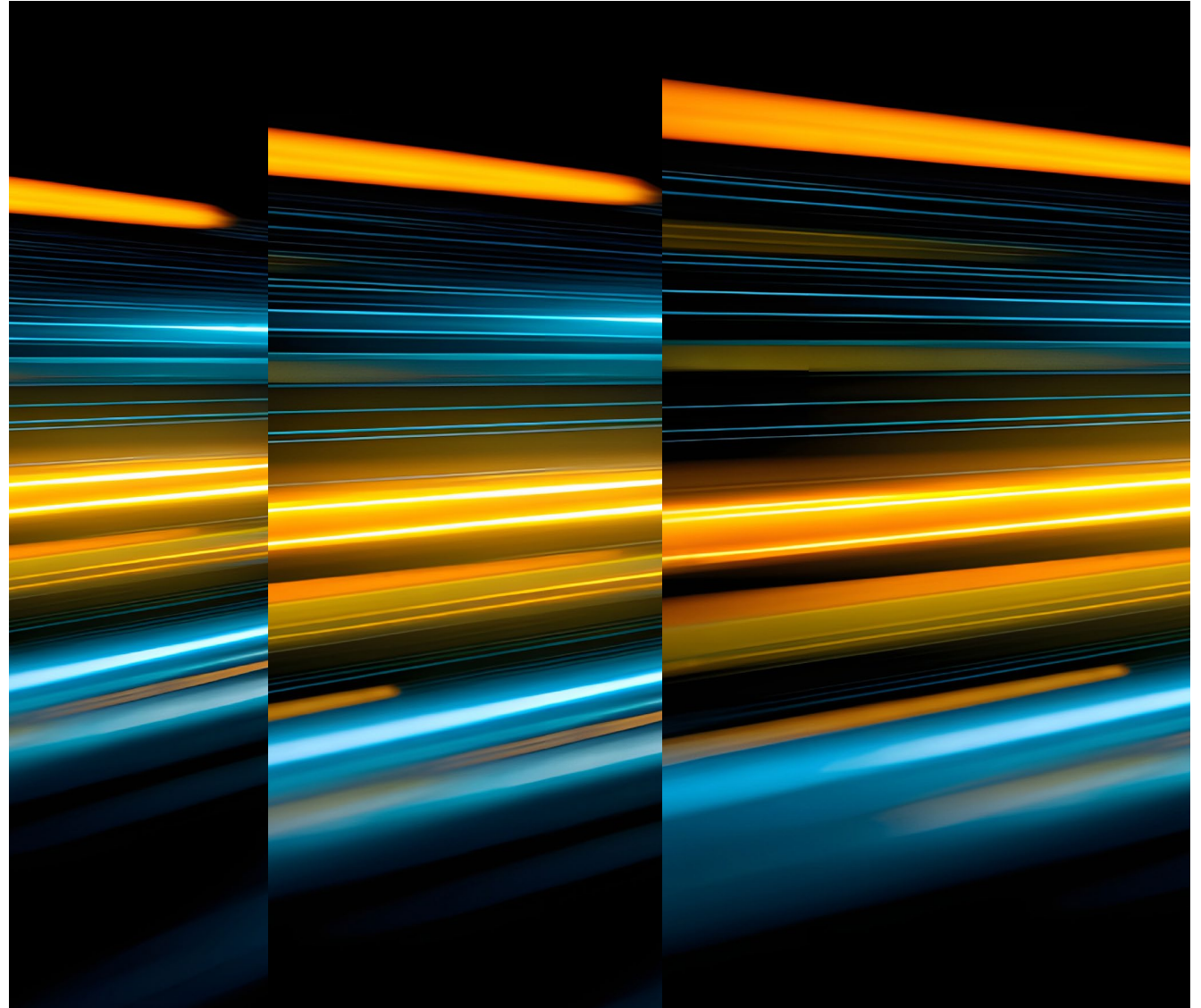
5. Criar as condições para que o sistema operacional circular funcione

Reduzir custos de transação e aumentar a confiança de empresas e investidores para operar ciclos de reparo, reutilização e reciclagem em escala, por meio da criação da transparência e rastreabilidade necessárias sobre fluxos atualmente pouco visíveis na economia de baterias. Isso pode ser viabilizado com a implementação de passaportes de baterias interoperáveis e padrões comuns de dados; o alinhamento de definições e requisitos (como classificação de fim de vida, regras de transporte e tratamento); e o fortalecimento de mecanismos de garantia, permitindo que mercados secundários de baterias e materiais operem em escala com menores custos e riscos — indo além da conformidade regulatória e estruturando a infraestrutura de mercado.

Há 15 anos, a Fundação Ellen MacArthur tem mobilizado uma poderosa rede de empresas e formuladores de políticas públicas em torno de uma visão de uma economia que funciona de forma diferente.

Para catalisar a implementação em escala, a Fundação conecta atores ao longo das cadeias de valor que podem avançar rapidamente, aprender, adaptar-se e sustentar o progresso. Nesse contexto, já engajamos mais de 30 atores da indústria de baterias para veículos elétricos, representando todas as etapas da cadeia de valor — da extração e processamento à fabricação, prestação de serviços e reprocessamento no fim de vida — para desenvolver uma visão de economia circular preparada para o futuro do setor. A partir de nossa posição única na interseção entre negócios e políticas públicas, nosso objetivo é impulsionar três tipos de ação na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos: estabelecer uma direção clara e promover alinhamento para a ação empresarial — da qual este relatório representa um passo inicial; viabilizar uma colaboração eficaz para mobilizar investimentos e inovação por meio de novas redes localizadas, joint ventures, infraestrutura compartilhada e co-investimento; e avançar na advocacy coletiva para reformular as condições regulatórias e de políticas públicas necessárias para o sucesso de um sistema circular de baterias para veículos elétricos.

Reenquadrar as baterias de veículos elétricos como ativos circulares de alto valor tem potencial transformador. Com uma visão clara de onde o valor é criado ou perdido, onde os riscos estão se acumulando e quais intervenções geram os maiores retornos em nível sistêmico, a indústria pode ir além de iniciativas circulares fragmentadas e construir resiliência e valor de longo prazo — protegendo margens, transformando modelos de negócio e fontes de receita, reduzindo a exposição a riscos de abastecimento e mantendo os minerais críticos em circulação.



An aerial photograph of a large open-pit mine. The mine is characterized by multiple terraced levels of dark grey rock. A prominent feature is a large, circular lake with a vibrant turquoise color, situated in the lower center of the mine. The surrounding landscape is rugged and rocky, with some areas showing signs of erosion and exposed earth. The overall scene is industrial and dramatic, highlighting the scale of the mining operation.

01

**RISCOS
SISTÊMICOS
NA CADEIA
DE VALOR DE
BATERIAS PARA
VEÍCULOS
ELÉTRICOS**

Os veículos elétricos (VE) estão deixando de ser um nicho para se tornarem predominantes, e as baterias passam a assumir o papel de base estratégica da transição energética. O potencial é significativo — crescimento econômico, geração de empregos, inovação, benefícios para os consumidores e reduções expressivas de emissões —, mas esse avanço depende de uma cadeia de valor capaz de escalar com consistência e controle.

Atualmente, a cadeia de valor de baterias para veículos elétricos ainda é, em grande parte, linear, intensiva em materiais e potencialmente exposta a déficits de oferta e interrupções. Esta seção apresenta cinco riscos sistêmicos que podem desacelerar ou desestabilizar esse progresso, e explica por que ampliar a reciclagem e a segunda vida é necessário, mas não suficiente. É preciso um redesenho mais amplo que torne os modelos circulares para baterias confiáveis e atrativos para investimento.



A TRANSIÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS OFERECE GRANDE POTENCIAL PARA CRESCIMENTO ECONÔMICO E REDUÇÃO DE EMISSÕES

A adoção de veículos elétricos (VE) está acelerando rapidamente. Em 2024, aproximadamente 20% dos carros novos vendidos no mundo foram elétricos, totalizando mais de 17 milhões de veículos globalmente. Dependendo de políticas governamentais, avanços tecnológicos e taxas de adoção pelos consumidores, espera-se que a participação de mercado dos VE alcance entre 65% e 75% das vendas globais de automóveis até 2050.¹

Essa transição está gerando oportunidades econômicas significativas. O setor de veículos elétricos é um motor das economias globais, criando novos investimentos e empregos e contribuindo de forma relevante para o PIB.² Embora as taxas de crescimento variem por região, projeta-se que o mercado global de VE apresente crescimento forte e consistente, passando de aproximadamente USD 892 bilhões em 2025 para mais de USD 2,1 trilhões até 2032.³ Como um todo, a indústria inaugura uma nova era de oportunidades estratégicas para crescimento, inovação e transformação industrial em diferentes países.

Além disso, já está gerando impactos relevantes na redução das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). A transição para veículos elétricos está alterando de forma estrutural o mercado de petróleo e resultando em impactos significativos sobre as emissões globais de GEE.⁴ Em 2024, a adoção de VE já substituiu mais de 1,3 milhão de barris de petróleo por dia — equivalente a toda a demanda de petróleo do Japão para o setor de transporte.⁵ Até 2035, espera-se que esse número ultrapasse 6 milhões de barris de petróleo por dia.⁶



NO ENTANTO, A CADEIA DE VALOR DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS ESTÁ HOJE EXPOSTA A CINCO PRINCIPAIS RISCOS SISTÊMICOS

O setor de baterias para veículos elétricos depende de uma cadeia de valor capaz de escalar de forma confiável e responsável. No entanto, a abordagem atual ainda é, em grande parte, linear, intensiva em materiais e geograficamente concentrada, criando riscos sistêmicos que podem desacelerar a transição caso não sejam enfrentados. Esses riscos não são disrupções isoladas, mas características estruturais de um modelo “extrair-produzir-descartar”, que é ineficiente por definição, externaliza custos ambientais e sociais, aprisiona o sistema em uma alta dependência de materiais e amplia a exposição à volatilidade de preços, tensões geopolíticas e impactos ambientais.

Foram identificados cinco principais riscos que ameaçam a transição ao elevar os custos totais e aumentar a fragilidade das cadeias de suprimento justamente no momento em que o sistema precisa escalar. Por isso, estratégias de economia circular não são apenas complementos desejáveis, mas soluções sistêmicas que atuam tanto como alavancas práticas para gestão de riscos e competitividade quanto como um caminho essencial para tornar os ciclos de baterias economicamente viáveis em escala.



Descompasso entre oferta e demanda

A transição para veículos elétricos está impulsionando um crescimento sem precedentes na demanda por minerais críticos. A produção de um veículo elétrico médio envolve mais de 200 kg desses minerais — cerca de seis vezes mais do que o necessário para produzir um veículo com motor de combustão interna.⁷ Nas próximas duas décadas, a eletrificação de veículos de passageiros deve responder por aproximadamente metade da demanda por minerais críticos — como lítio, grafite, cobalto e níquel — entre todas as tecnologias de energia limpa.⁸ Alcançar emissões líquidas zero até 2050 exigirá um aumento de seis vezes na produção desses minerais em relação aos níveis de 2022.⁹ Alcançar emissões líquidas zero até 2050 exigirá um aumento de seis vezes na produção desses minerais em relação aos níveis de 2022.¹⁰

Além disso, atualmente, a maior parte da matéria-prima utilizada na reciclagem de baterias provém de resíduos de fabricação. Essa tendência deve persistir nos próximos anos, com os resíduos industriais ainda representando cerca de dois terços do material disponível para reciclagem em 2030.¹¹ Espera-se que baterias de veículos elétricos e de armazenamento em fim de vida passem a dominar esse fluxo apenas a partir de 2035, quando volumes suficientes atingirem o fim de sua vida útil.¹² Assim, no curto prazo, o crescimento da reciclagem é estruturalmente limitado, uma vez que depende da produção de novas baterias e das perdas nos processos de fabricação. Sem uma oferta secundária robusta proveniente de baterias em fim de vida, as práticas atuais de reciclagem — amplamente baseadas apenas em resíduos de produção — não são capazes de fechar o descompasso entre oferta e demanda no curto prazo.



Riscos ambientais

A crescente demanda por minerais críticos — e os processos necessários para transformá-los em produtos para baterias de veículos elétricos — também impõe pressões significativas sobre o meio ambiente, que, por sua vez, desestabilizam a cadeia de suprimento e a resiliência do sistema como um todo.

Na etapa de mineração, muitas atividades coincidem com alguns dos mais importantes hotspots de biodiversidade do mundo, ameaçando milhares de espécies e habitats únicos, que não existem em nenhum outro lugar do planeta.¹³ Entre 2001 e 2020, as atividades de mineração foram responsáveis pela perda global de 1,4 milhão de hectares de cobertura florestal,¹⁴ afetando até um terço dos ecossistemas florestais globais — um número que tende a aumentar nos próximos anos.¹⁵ Essas atividades também geram impactos significativos na biodiversidade em ecossistemas localizados a milhares de quilômetros de distância, especialmente por meio de rejeitos de mineração (tailings), que se infiltram no solo e nos sistemas hídricos, transportando grandes quantidades de metais pesados e causando danos severos a espécies e comunidades locais.¹⁶

As etapas de extração, processamento e refino de matérias-primas também são altamente intensivas em emissões¹⁷ — ainda mais no caso dos minerais críticos, que apresentam maior intensidade de emissões do que outros metais e commodities. Por exemplo, as emissões associadas à produção de uma tonelada média de níquel classe 1 ou carbonato de lítio são, respectivamente, dez e três vezes maiores do que aquelas geradas na produção de uma tonelada de aço.¹⁸ As etapas pós-extração, como processamento e refino, também demandam grandes volumes de água e utilizam substâncias químicas que podem vaziar para o ar e os sistemas hídricos, afetando tanto a fauna quanto as populações humanas.¹⁹ Esses impactos sobre os ecossistemas locais e a biodiversidade, aliados às elevadas emissões e ao uso intensivo de água, contribuem para o aumento dos custos de conformidade, restrições de recursos e maiores riscos de interrupções na produção, enfraquecendo a estabilidade econômica e a competitividade da cadeia de suprimento.

Por fim, embora a reciclagem esteja avançando e já alcance volumes elevados de baterias em fim de vida em alguns países,²⁰ muitas regiões ainda enfrentam infraestrutura limitada de coleta e incentivos econômicos insuficientes. À medida que a adoção de veículos elétricos se acelera globalmente, aumenta também o risco de produtos e materiais escaparem da cadeia de valor e serem descartados no meio ambiente, causando danos aos ecossistemas.

Os altos custos associados à infraestrutura de reciclagem agravam ainda mais a adoção efetiva dessas práticas, desviando um grande número de baterias para mercados informais, onde são geridas e processadas de forma inadequada, sem controles ambientais e de segurança apropriados. Isso gera riscos contínuos para o meio ambiente e a saúde.





Riscos sociais

Ao longo de toda a cadeia de valor — da extração de recursos ao refino, fabricação de células e tratamento no fim de vida — comunidades enfrentam desafios persistentes, incluindo degradação da terra, poluição, condições de trabalho inseguras e disrupções socioeconômicas. Muitos desses impactos ainda são insuficientemente enfrentados.^{21,22} No caso da mineração, embora possa gerar benefícios sociais — como estímulo à economia local, aumento de renda e criação de empregos —, também pode desencadear uma série de problemas sociais quando mal governada. Entre eles estão a distribuição desigual de benefícios e riscos, expropriação de terras e deslocamento de comunidades, danos à saúde humana decorrentes de impactos ambientais, redução da disponibilidade de água e contaminação hídrica.²³ Esses riscos tendem a ser mais intensos em regiões produtoras de minerais em economias emergentes e em desenvolvimento (muitas no Sul Global), onde a capacidade de fiscalização pode ser desigual e onde comunidades frequentemente absorvem impactos significativos sem participação proporcional nos benefícios econômicos, no valor gerado ou na tomada de decisão. A governança inadequada na mineração de minerais críticos também tem sido associada a violações generalizadas de direitos humanos.²⁴ Além disso, a etapa de coleta de resíduos que antecede a reciclagem, em algumas regiões, ainda envolve práticas de trabalho perigosas ou até mesmo trabalho infantil.²⁵ Para além de suas consequências sociais, essas falhas de governança se traduzem em riscos econômicos concretos, incluindo penalidades regulatórias, atrasos em projetos, interrupções no fornecimento e danos reputacionais.



Ineficiência de produto e de sistema

Durante a fase de uso, as baterias frequentemente são subutilizadas, permanecendo grande parte do tempo ociosas, nem sempre conectadas às redes elétricas e perdendo desempenho com o envelhecimento.²⁶ Além disso, montadoras têm priorizado veículos com baterias grandes e de longa autonomia para atender às expectativas dos consumidores, o que aumenta a demanda por materiais críticos.²⁷ No entanto, muitos veículos são utilizados em contextos urbanos,²⁸ onde não há necessidade de baterias com autonomia tão elevada. Isso representa uma oportunidade perdida de aumentar a eficiência no uso de materiais — extraíndo mais valor a partir de uma menor quantidade de recursos — além de reduzir a pressão sobre as cadeias de suprimento.

Essas ineficiências são reforçadas por designs e arquiteturas de baterias que frequentemente priorizam o desempenho na primeira vida em detrimento da modularidade e da capacidade de reparo. Embora melhorias de desempenho sejam essenciais, algumas arquiteturas mais recentes e altamente integradas — como determinados designs cell-to-pack e cell-to-chassis — podem reduzir ainda mais a modularidade, a reparabilidade e a capacidade de manutenção. Isso dificulta que atores a jusante, nas etapas de fim de vida, consigam abrir, reparar, atualizar ou reconfigurar as baterias, limitando as oportunidades de extensão de uso e de recuperação de materiais ao final de sua vida útil.^{29,30}



Gargalos e disrupções na cadeia de suprimento

Outro desafio não está apenas na existência de minerais, mas na capacidade de convertê-los de forma confiável em materiais de grau bateria e células, além de movimentá-los ao longo da cadeia de suprimento. Atualmente, as atividades de mineração, processamento de materiais, fabricação de baterias e reciclagem no fim de vida estão altamente concentradas geograficamente.^{31,32} Essa concentração aumenta o risco de gargalos e disrupções na cadeia de suprimento, causados por eventos climáticos extremos, interrupções operacionais, falhas logísticas, atrasos regulatórios ou perturbações no comércio internacional. Como resposta, governos e reguladores têm intensificado o foco em segurança de abastecimento, acordos comerciais e incentivos, além de introduzir novas políticas e instrumentos econômicos para garantir o acesso a minerais críticos.³³ No entanto, essas políticas, isoladamente, não resolvem as ameaças estruturais de disrupção na cadeia de suprimento e podem, inclusive, inflacionar preços e desacelerar a transição para veículos elétricos e energias renováveis, ao criar fricções adicionais, aumentar custos e introduzir maior complexidade.³⁴

Esses riscos na cadeia de suprimento, combinados com o crescimento da demanda por baterias de veículos elétricos e seus minerais associados, bem como com possíveis descompassos futuros entre oferta e demanda, tornam os mercados mais suscetíveis a picos ou fortes oscilações nos preços de minerais críticos. Essa volatilidade de preços gera impactos amplos nas cadeias globais de suprimento: fabricantes enfrentam dificuldades para firmar contratos de longo prazo, comprometer-se com a expansão da produção e prever custos; enquanto empresas de mineração e recicladores lidam com maior incerteza ao tomar decisões de investimento de grande porte e longo prazo. Como consequência, há pressão sobre as margens dos atores da cadeia — como os fabricantes de baterias — e riscos de acessibilidade para os consumidores, com aumentos de preços que podem chegar a 40% a 50% em caso de choques prolongados na oferta de metais para baterias.³⁵



ENQUANTO OS ESFORÇOS DE RECICLAGEM E REAPROVEITAMENTO AVANÇAM RAPIDAMENTE, É NECESSÁRIA UMA TRANSFORMAÇÃO SISTÊMICA ABRANGENTE

Os esforços para reciclar baterias de veículos elétricos estão se intensificando. Empresas vêm reconhecendo o papel da reciclagem na redução de custos de materiais, na diminuição das pressões associadas à gestão de resíduos e na limitação da exposição a mercados voláteis de commodities. Avanços no rastreamento de ativos, na triagem com apoio de inteligência artificial e em tecnologias de processamento mais eficientes estão tornando a reciclagem cada vez mais viável e escalável. A rápida expansão das frotas globais de veículos elétricos e a vida útil das baterias — entre oito e 12 anos — devem gerar volumes expressivos para reciclagem. Segundo algumas estimativas, o mercado global de reciclagem de baterias pode crescer significativamente, passando de USD 13 bilhões em 2025 para USD 114,66 bilhões até 2035.³⁶ Paralelamente, governos ao redor do mundo vêm priorizando a reciclagem como um pilar para cadeias de suprimento seguras e resilientes. Por exemplo, a União Europeia introduziu requisitos mínimos de conteúdo reciclado para minerais-chave;³⁷ a China estabeleceu regulamentações rigorosas e construiu ampla infraestrutura de recuperação;³⁸ e metas ambiciosas de adoção de veículos elétricos no Sudeste Asiático estão gerando um impulso indireto para a indústria de reciclagem de baterias (por exemplo, a Tailândia pretende que 30% das vendas de veículos sejam elétricas até 2030, enquanto Indonésia e Vietnã visam à adoção total até 2050).³⁹ Em mercados emergentes que apresentam rápido crescimento da eletromobilidade, mas onde sistemas regulatórios e de reciclagem ainda estão em desenvolvimento, há uma oportunidade urgente de planejamento antecipado para estruturar sistemas adequados de gestão no fim de vida desses produtos.

Iniciativas para manter baterias de veículos elétricos em uso após sua retirada estão em andamento. À medida que as primeiras grandes ondas de veículos elétricos atingem o fim de sua vida útil, empresas e governos buscam escalar soluções para reaproveitar e reciclar essas baterias. Mesmo quando já não conseguem alimentar veículos de forma eficiente, as baterias geralmente ainda retêm entre 70% e 80% de sua capacidade original — suficiente para uma ampla gama de aplicações menos exigentes. Isso abre oportunidades significativas de investimento em mercados de segunda vida, como armazenamento estacionário de energia, sistemas de backup, microrredes e integração de fontes renováveis.

No entanto, essas soluções, isoladamente, não são capazes de resolver os desafios estruturais da cadeia de suprimento — o que exige um redesenho sistêmico. Para que o mundo alcance suas metas globais de descarbonização, o uso de baterias para veículos elétricos e o estoque de minerais críticos necessário para sustentá-las precisarão crescer de forma significativa nos próximos anos. Porém, expandir o sistema linear atual agravaria a degradação ambiental, os riscos sociais e as vulnerabilidades da cadeia de suprimento, tornando a transição cada vez mais custosa e instável. Para que essa transformação seja economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente justa, é necessário um redesenho fundamental do sistema de baterias para veículos elétricos. As decisões tomadas hoje irão determinar se o sistema linear será consolidado ou se será acelerada a transição para um modelo que mantenha os minerais críticos em uso de alto valor ao longo de múltiplos ciclos de vida. O momento de agir é agora, para garantir que a próxima onda de demanda por baterias de veículos elétricos seja atendida de forma a gerar resultados positivos do ponto de vista econômico, ambiental e social.

02

**UMA TRANSFORMAÇÃO
EM NÍVEL SISTÊMICO
RUMO A UMA
ECONOMIA CIRCULAR
DE BATERIAS PARA
VEÍCULOS ELÉTRICOS**



UMA VISÃO DE ECONOMIA CIRCULAR PARA BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Em uma economia circular ideal, as baterias de veículos elétricos entregam o máximo valor possível ao longo de suas fases de uso, e os minerais críticos utilizados em sua produção nunca se tornam resíduos. Essa é a ambição central de uma economia circular para baterias de veículos elétricos. Essa visão está alinhada aos princípios da economia circular e se estrutura em quatro pilares fundamentais:

- **Os serviços de mobilidade e armazenamento de energia** fornecidos pelas baterias de veículos elétricos são maximizados durante sua fase de uso, por meio de sua plena integração aos sistemas de mobilidade e energia.
- **As baterias são utilizadas em seu mais alto valor pelo maior tempo possível**, sendo projetadas para manutenção, reparo, recondicionamento e reciclagem.
- **Os materiais utilizados na fabricação das baterias permanecem em circulação** pelo maior tempo possível, retardando seu descarte como resíduos, por meio de sistemas de coleta e reciclagem de alta qualidade e economicamente viáveis.
- **O valor gerado pelas baterias é distribuído de forma justa**, por meio da adoção de modelos de negócio de alto valor ao longo de toda a cadeia de valor.

A concretização dessa visão traria benefícios ao longo de toda a cadeia de valor, incluindo:




- **Reduzir a demanda por minerais críticos virgens**, por meio de um uso mais eficiente das baterias e dos materiais nelas incorporados
- **Fortalecer a resiliência da cadeia de suprimento**, ao manter baterias e minerais críticos em circulação na economia, reduzindo a exposição à volatilidade de preços e a gargalos de oferta
- **Destruar valor econômico significativo**, ao utilizar de forma mais eficiente materiais e componentes existentes, resultando em menores custos de materiais e gestão de resíduos ao longo da cadeia, melhores serviços para usuários de baterias e novas fontes de receita para produtores
- **Contribuir para metas climáticas, de biodiversidade e de redução da poluição**, ao diminuir a necessidade de extração de novos minerais, apoiar a expansão de energias renováveis e reduzir a geração de resíduos de baterias e seus impactos ambientais associados
- **Distribuir oportunidades econômicas para países produtores de minerais**, permitindo que avancem na cadeia de valor e garantindo que países e comunidades locais detentores desses recursos sejam os principais beneficiários, em conformidade com os princípios das Nações Unidas que orientam a transição energética de minerais com base em equidade e justiça.⁴⁰

Essa visão complementa o foco atual em reciclagem e uso em cascata ao introduzir soluções sistêmicas. Até o momento, as iniciativas de economia circular no setor de baterias para veículos elétricos têm se concentrado principalmente na reciclagem de materiais e no uso em cascata das baterias, direcionando-as para aplicações secundárias quando deixam de cumprir sua função principal. Em contraste, oportunidades a montante que priorizam o redesenho do sistema e o uso de “ciclos internos” de maior valor — como reutilização e extensão de vida útil — têm recebido menos atenção. A reciclagem e o reaproveitamento por meio de usos em cascata continuarão sendo elementos essenciais de uma economia circular para baterias de veículos elétricos, embora o design das baterias ainda possa ser aprimorado para tornar sua adoção mais viável do ponto de vista técnico e econômico. No entanto, a visão apresentada acima amplia esse conceito de forma igualmente relevante, garantindo que os benefícios gerados sejam expandidos e maximizados. As alavancas descritas a seguir — que representam oportunidades para colocar em prática os diferentes elementos dessa visão — constituem os passos necessários para essa transformação em nível sistêmico.

A economia circular

A economia circular é um sistema em que materiais nunca se tornam resíduos e a natureza é regenerada. Nesse modelo, produtos e materiais são mantidos em circulação por meio de processos como manutenção, reutilização, recondicionamento, remanufatura, reciclagem e compostagem. A economia circular enfrenta as mudanças climáticas e outros desafios globais, como a perda de biodiversidade, os resíduos e a poluição, ao dissociar a atividade econômica do consumo de recursos finitos.

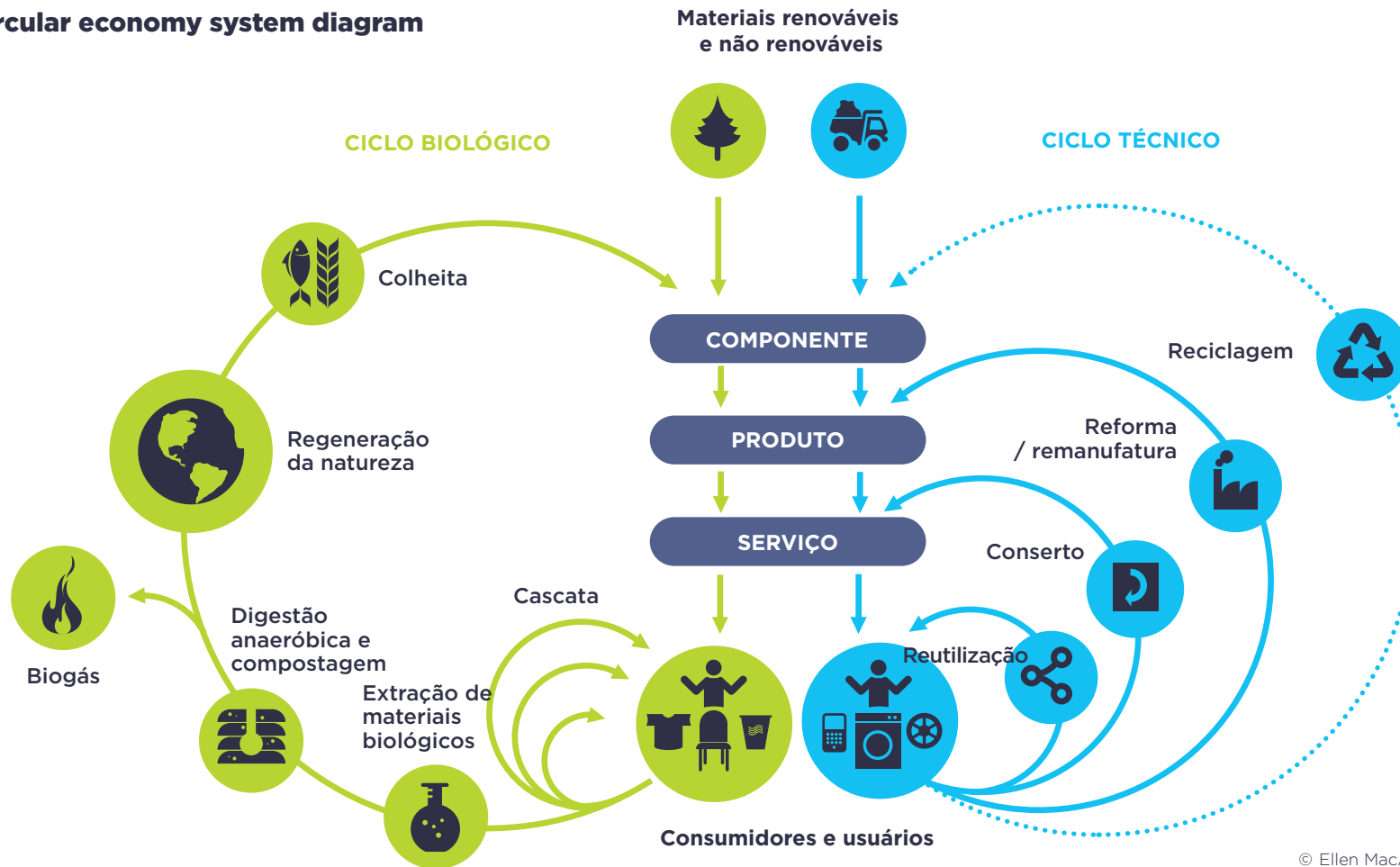
A economia circular se baseia em três princípios, orientados pelo design:

-  Eliminar resíduos e poluição
-  Manter produtos e materiais em circulação em seu mais alto valor
-  Regenerar a natureza

Sustentada pela transição para energia e materiais renováveis, a economia circular é um sistema resiliente que beneficia empresas, pessoas e o meio ambiente.



The circular economy system diagram



© Ellen MacArthur Foundation Desenho baseado em Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C)

THE FIVE CIRCULAR ECONOMY LOOPS FOR EV BATTERIES

Em uma economia circular para baterias de veículos elétricos, as intervenções podem ser organizadas em um conjunto de ciclos circulares nos quais as baterias e os minerais críticos nelas incorporados circulam pela economia, em vez de serem utilizados uma única vez e descartados. Esses ciclos frequentemente se reforçam mutuamente. Por exemplo, o design para desmontagem facilita o reparo, a segunda vida e a reciclagem; a reciclagem de alta qualidade cria uma oferta secundária confiável, tornando os modelos de negócio circulares mais atrativos; enquanto a coerência entre dados e políticas públicas sustenta todos os demais ciclos.

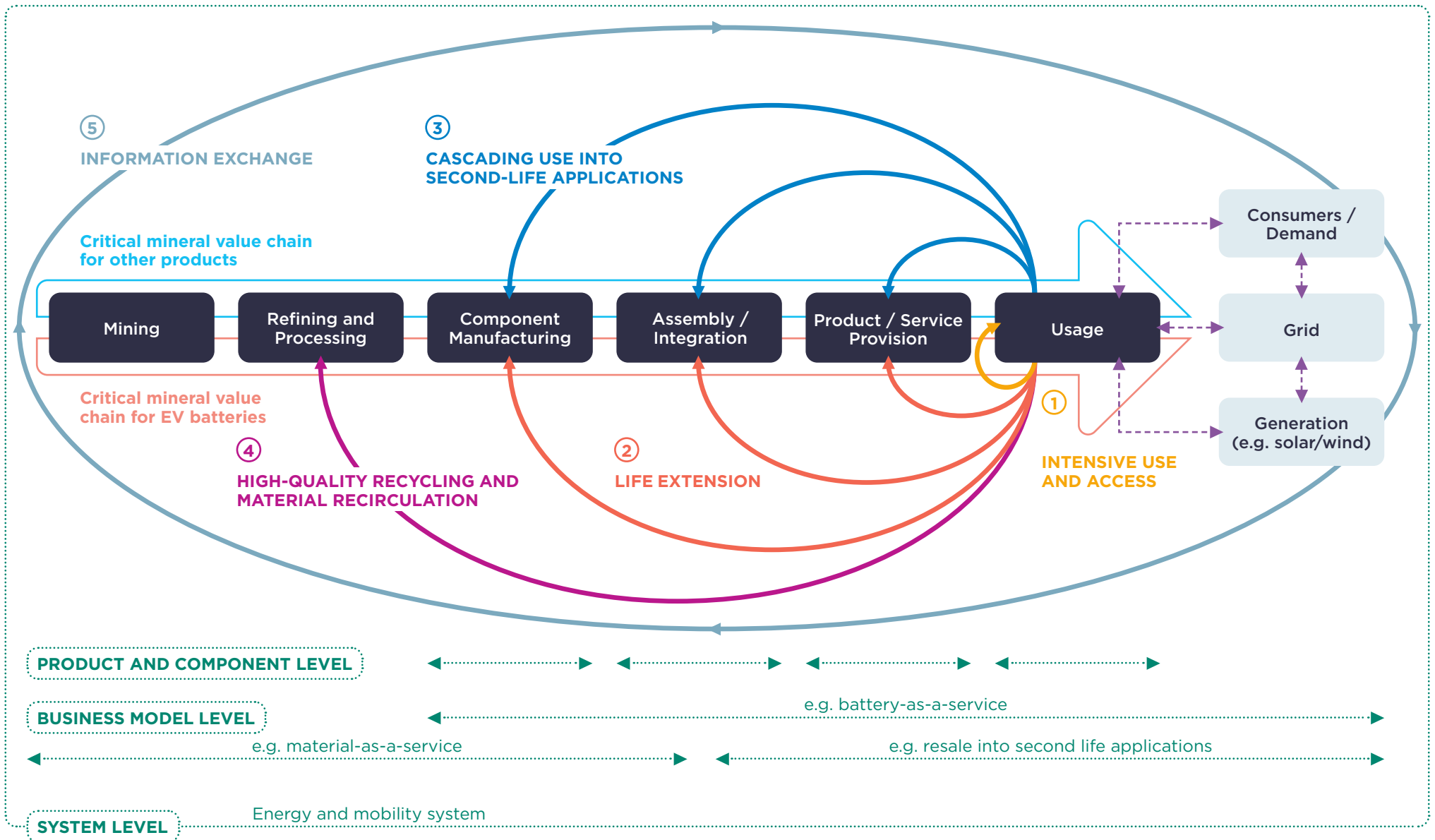
Ao mesmo tempo, esses ciclos são propositalmente simplificados. Eles não constituem um modelo detalhado do sistema nem uma representação completa de todos os riscos e trade-offs envolvidos. Vale destacar também que nem sempre são automaticamente cumulativos — por exemplo, maior utilização ou serviços Vehicle-to-Grid (V2G) podem acelerar a degradação se não forem bem geridos, e o uso em segunda vida pode atrasar o retorno de materiais para a produção de novas baterias. Por isso, análises de cenários, padrões, políticas públicas e prioridades da indústria são fundamentais para determinar qual caminho é mais adequado em cada contexto e para reduzir o risco de que a otimização local de um ciclo comprometa os resultados circulares do sistema como um todo, frente a objetivos econômicos ou regulatórios.

Esses ciclos cumprem duas funções principais no debate sobre economia circular para baterias de veículos elétricos:

- Oferecem uma linguagem simples para descrever como diferentes áreas de oportunidade funcionam
- Ajudam a evidenciar como diferentes atores — desde empresas de mineração até fabricantes do equipamento original (OEMs) e cidades — contribuem, na prática, para as mesmas dinâmicas sistêmicas, ainda que atuem em diferentes pontos da cadeia de valor

Com base no marco conceitual da economia circular e no diagrama sistêmico (ou “diagrama borboleta”) (ver Caixa 1), os cinco ciclos circulares mais relevantes para baterias de veículos elétricos são apresentados a seguir. Quatro desses ciclos descrevem a circulação física de baterias e materiais, enquanto o quinto é um ciclo habilitador que determina se os demais podem ocorrer em escala.

Como a economia circular impulsiona a inovação e a geração de valor no sistema de minerais críticos para baterias de veículos elétricos



Loops: where material and value can be retained

Levels: where decisions are made to unlock the loops

Energy flows: how energy transfers in the wider energy-mobility system

Este ciclo abrange estratégias que aumentam a quantidade de serviços de mobilidade e energia entregues por bateria, como sistemas de mobilidade compartilhada e sob demanda, que reduzem o tempo ocioso e melhoram a taxa de utilização, bem como o uso de veículos elétricos como armazenamento de energia distribuído por meio de serviços Vehicle-to-Grid (V2G) ou Vehicle-to-Home (V2H). Isso permite que cada bateria forneça mais passageiros-quilômetro, toneladas-quilômetro de carga ou quilowatt-hora ao longo de sua vida útil. Esse ciclo demonstra como uma maior utilização pode reduzir a intensidade material da mobilidade e do armazenamento (menor uso de minerais por unidade de serviço) e destaca que a principal relação está entre os serviços prestados e os minerais críticos em circulação no sistema.

Considerações importantes:

- **Efeitos sobre a demanda e riscos potenciais** de efeito rebote nos serviços de mobilidade e energia
- **Planejamento urbano, mudanças comportamentais e governança necessários** para reduzir a dependência de veículos privados (incluindo integração multimodal e disponibilidade de infraestrutura de recarga)
- **Interoperabilidade entre veículos, sistemas de recarga e plataformas de serviço**, incluindo compatibilidade física de carregamento, roaming/pagamento, compartilhamento de dados e, quando aplicável, comunicação V2G e participação em mercados — permitindo que ativos sejam compartilhados, carregados e monetizados entre diferentes operadores e regiões
- **Impactos de equidade e distribuição, incluindo quem tem acesso prioritário** e como os benefícios e custos são distribuídos entre usuários e regiões



Este ciclo abrange estratégias que desaceleram o ritmo com que as baterias avançam em sua primeira vida, mantendo-as em boas condições e retornando-as ao uso de alto valor quando falham. Isso inclui melhor operação e manutenção, reparo e substituição de módulos, bem como processos mais intensivos de recondicionamento e remanufatura, viabilizados por design modular, soluções de desvinculação (debonding) e diagnósticos integrados. Esse ciclo demonstra o aumento da vida útil técnica e econômica média das baterias em sua aplicação primária e, conseqüentemente, a necessidade de menos baterias novas — e de menor uso de minerais virgens — para entregar um determinado nível de serviços, contribuindo para o fortalecimento da resiliência da cadeia de suprimento.

Considerações importantes:

- **Viabilidade econômica, capacidades técnicas e estruturas de segurança** necessárias para oferecer esses serviços em escala
- **Condições nas quais a extensão da vida útil** pode ser menos eficiente em comparação com a substituição acelerada e a reciclagem de alta qualidade (por exemplo, quando novas químicas são significativamente mais eficientes)
- **Distribuição de responsabilidades, garantias e responsabilidades legais** entre fabricantes do equipamento original (OEMs), reparadores independentes, remanufaturadores, recicladores, seguradoras e reguladores
- **Abordagens de modularidade e padronização que preservem a inovação**, enfrentando preocupações relacionadas a bloqueio de design (design lock-in), redução da inovação competitiva, menor diferenciação ou desaceleração do avanço tecnológico



Este ciclo abrange a transição das baterias do uso automotivo de alto desempenho para aplicações de segunda vida com menores exigências de desempenho — como armazenamento behind-the-meter, microrredes ou sistemas de backup — quando passam a não atender mais aos requisitos do setor automotivo. Ele depende da capacidade de avaliar o estado de saúde das baterias; classificar e agregar packs e módulos usados; e direcioná-los para aplicações estacionárias seguras e adequadas, bem como para modelos de negócio compatíveis. Esse ciclo demonstra como o número de ciclos de vida úteis por bateria pode aumentar antes da desmontagem e reciclagem, e como cadeias de uso em cascata bem estruturadas podem reduzir a demanda por novos packs em armazenamento estacionário, aliviando a pressão sobre o fornecimento de minerais primários.

Considerações importantes:

- **Compromissos entre o adiamento da reciclagem e a disponibilidade oportuna de materiais secundários** para novas baterias de veículos elétricos (especialmente em mercados de rápido crescimento)
- **Desafios técnicos e regulatórios relacionados à recombinação de componentes usados heterogêneos** — como diferentes packs ou módulos — incluindo protocolos de teste, padrões, garantias, certificações e requisitos de segurança (especialmente no reaproveitamento em aplicações de segunda vida por meio de canais informais)
- **Acesso a mercado e captura de valor para ativos de segunda vida**, como sistemas de armazenamento em escala de rede, considerando regras de conexão, requisitos de despacho ou agregação e mecanismos de receita em diferentes contextos
- **Conformidade logística, de armazenamento e transporte de baterias usadas**, incluindo manuseio seguro, regras de armazenamento temporário e restrições ao transporte transfronteiriço (bem como o risco de desvio para canais pouco regulados)
- **Competitividade econômica dos sistemas de segunda vida em relação a novas soluções de armazenamento**, considerando fatores como a queda nos preços de baterias novas, novas químicas, expectativas de garantia e outros custos associados a testes, balanceamento do sistema (balance-of-system) e integração



Este ciclo representa a recuperação de minerais críticos de baterias em fim de vida com alto rendimento e qualidade adequada para baterias, por meio de rotas emergentes de hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas ou de reciclagem direta, assumindo que coleta, logística e pré-processamento conectem de forma confiável as baterias em fim de vida às instalações adequadas. Ele demonstra como o aumento da participação de materiais secundários na produção de células e baterias pode reduzir progressivamente a dependência da extração de recursos virgens, e como ciclos fechados — com perdas mínimas para escória, produtos de baixo valor ou resíduos não geridos — contribuem para estabilizar o fornecimento e viabilizar modelos de negócio circulares.

Considerações importantes:

- **Restrições relacionadas ao tempo de fim de vida e ao atraso na disponibilidade de fornecimento (feedstock)** em um mercado em rápido crescimento (incluindo o atraso adicional gerado pelo uso em segunda vida). Necessidade de alinhar fatores econômicos, operacionais e regulatórios entre a expansão da capacidade de reciclagem e os volumes disponíveis de matéria-prima, considerando incertezas quanto ao acesso e à qualidade do material, taxas de retorno, risco de subutilização e viabilidade de investimento
- **Impactos ambientais e sociais das operações de reciclagem**, incluindo uso de energia, emissões, poluição local e os mecanismos de governança necessários para sua gestão
- **Dinâmicas competitivas e riscos de qualidade** (por exemplo, rotas de baixo custo ou baixo rendimento competindo com processos de alta qualidade na ausência de padrões e incentivos claros)
- **Classificação regulatória e regras de transporte para intermediários de reciclagem** (especialmente massa negra, ou black mass), incluindo sua caracterização como material perigoso ou não, códigos de resíduos e implicações para fluxos transfronteiriços e capacidade de refino doméstico
- **Cálculo, verificação e comunicação de resultados harmonizados da eficiência de reciclagem** e da recuperação de materiais, incluindo requisitos de documentação e definições de frações de saída utilizáveis
- **Riscos de divergência entre a evolução das químicas de baterias e as rotas de reciclagem**, incluindo como mudanças na composição dos materiais afetam o valor de recuperação, os rendimentos e a viabilidade econômica do refino em grau bateria



Este ciclo habilitador sustenta todos os ciclos físicos anteriores ao capturar a circulação de dados sobre os fluxos de materiais, que determinam como baterias e materiais podem ser localizados, avaliados, movimentados e tratados para alcançar resultados circulares. Por exemplo, isso pode incluir passaportes digitais de produto e sistemas de rastreabilidade que apoiam a durabilidade, a reparabilidade e a recuperação de alta qualidade. Esse ciclo opera em nível sistêmico (ver mais na seção 2.3) e deve ser considerado em todas as etapas da cadeia de valor. Ele demonstra como melhores informações podem reduzir lacunas de responsabilização, tornar visíveis as responsabilidades ao longo da cadeia e criar as condições para investimentos em modelos de negócio circulares e infraestrutura.

Na prática, o acesso a informações e dados molda a forma como decisões são tomadas sobre o encaminhamento de baterias para reparo, reaproveitamento ou reciclagem. Por exemplo, sem informações confiáveis e portáteis sobre o estado de saúde das baterias, torna-se difícil avaliar baterias usadas, verificar sua adequação para aplicações de segunda vida ou direcionar packs de forma eficiente para o caminho de maior valor.



Considerações importantes:

- **Legitimidade das demandas por informação.** Definir quais dados e informações são mais relevantes para compartilhamento — e quem deve ter acesso a eles — será crucial para garantir que o que é compartilhado efetivamente viabilize o funcionamento dos demais ciclos materiais. Para isso, será necessário adotar processos de governança inclusivos, que representem produtores a montante, fabricantes, recicladores, trabalhadores e comunidades afetadas
- **Confiança, confidencialidade e arranjos de compartilhamento de dados entre atores.** A circulação de informações depende de estruturas confiáveis de compartilhamento de dados que protejam a sensibilidade comercial, esclareçam acesso e propriedade e evitem a retenção de dados que comprometa a rastreabilidade e o desempenho do sistema
- **Interoperabilidade e riscos de fragmentação em passaportes digitais e sistemas de rastreabilidade.** Múltiplas iniciativas não coordenadas podem gerar sistemas fragmentados, aumentar custos de conformidade e limitar a circulação transfronteiriça de baterias e materiais
- **Qualidade dos dados, verificação e mecanismos de auditoria.** Para que os dados de baterias sejam confiáveis, devem ser precisos, verificáveis e auditáveis ao longo do tempo. Isso requer protocolos acordados para coleta e relato de dados, mecanismos independentes de verificação e sistemas robustos de cadeia de custódia (chain of custody) que acompanhem materiais e componentes ao longo de seus ciclos de vida
- **Alinhamento regulatório transfronteiriço e complexidade jurídica.** Os fluxos de dados de baterias estão sujeitos a múltiplas regulações, incluindo direito comercial, definições de resíduos e fim de vida, regras de transporte e regulação financeira. Desalinhamentos entre jurisdições podem bloquear ciclos circulares, como a reutilização ou reciclagem entre países
- **Dimensões mais amplas de licença social e justiça.** A transparência sobre origem dos materiais, condições de trabalho, impactos ambientais e consentimento das comunidades é essencial para manter a confiança pública e a licença social para operar. A governança de dados deve garantir que os benefícios dos sistemas circulares de baterias sejam distribuídos de forma justa, sem reproduzir desigualdades existentes

Tabela 1 Como os ciclos da economia circular enfrentam os riscos sistêmicos na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos

Ciclos circulares ➤	Uso intensivo e acesso	Extensão de vida útil (reparo, recondicionamento e remanufatura)	Uso em cascata em aplicações de segunda vida	Reciclagem de alta qualidade e circulação de materiais	Intercâmbio de informações
Descompasso entre oferta e demanda	Aumenta a quantidade de serviços prestados por unidade de capacidade instalada (mobilidade compartilhada/sob demanda, V2G), reduzindo o uso de minerais por unidade de serviço.	Reduz a taxa de substituição das baterias existentes, permitindo que mais serviços sejam entregues a partir do mesmo estoque antes que nova produção seja necessária.	Redireciona baterias usadas para armazenamento estacionário e outras aplicações, substituindo novos packs e reduzindo a pressão sobre a demanda por minerais nesses setores, ainda que possa postergar a reciclagem.	Retorna minerais críticos ao sistema produtivo como materiais secundários, reduzindo progressivamente a demanda por novos materiais ao longo do tempo (com defasagem).	Melhora a visibilidade dos estoques de baterias e dos fluxos de materiais (por exemplo, por meio de passaportes digitais e sistemas de rastreabilidade).
Riscos ambientais	Reduz a demanda total por novas baterias, aliviando a pressão sobre atividades de mineração, processamento e fabricação — os processos mais ambientalmente impactantes da cadeia de valor.	Diminui as emissões associadas à produção e a pegada de uso de terra e energia relacionadas à fabricação de novos packs, graças à redução na necessidade de substituições e à melhor conservação das baterias.	Evita a produção de baterias adicionais e as emissões associadas, ao aproveitar a capacidade remanescente em aplicações de segunda vida, reduzindo, ao final, o volume total de resíduos gerados.	Substitui parte da demanda por mineração primária por fornecimento (feedstock) secundário, reduzindo a extração cumulativa e viabilizando padrões ambientais mais rigorosos em instalações controladas. Reinsere materiais no ciclo produtivo, evitando perdas para aterros, usos de menor valor ou vazamentos para fora do sistema.	Incorpora padrões ambientais, requisitos de relato e incentivos nas regulações, incentivando os atores da cadeia de valor a adotar práticas de produção e reciclagem de menor impacto e mais limpas.
Riscos sociais	Reduz a demanda total por novos minerais e a necessidade de expansão para novas fronteiras de extração, limitando os riscos associados para comunidades e trabalhadores.	Reduz a pressão para abertura ou expansão de minas em áreas de alto risco, atenuando impactos sociais e riscos à saúde e aos direitos humanos na margem.	Desloca parte da criação de valor da extração primária para atividades de serviço a jusante, que tendem a ser mais facilmente reguladas.	Constrói uma base de fornecimento secundário mais regulada que, quando bem gerida, substitui parte de fontes primárias de alto risco (por exemplo, mineração artesanal e de pequena escala em regiões sensíveis).	Torna visível o desempenho social ao longo de toda a cadeia (devida diligência; passaportes; consentimento livre, prévio e informado; normas trabalhistas) e vincula o acesso a mercados e financiamento à adoção de melhores práticas.

Ciclos circulares ➤**Ineficiência de produto e de sistema**

Enfrenta diretamente a subutilização ao dimensionar adequadamente as baterias, promover o uso compartilhado e permitir que baterias de veículos elétricos (VE) forneçam tanto serviços de mobilidade quanto de energia (por exemplo, V2G).

Gargalos e disrupções na cadeia de suprimento

Reduz a exposição a mercados voláteis de commodities primárias ao diminuir o crescimento da demanda por novos minerais por meio de um uso mais intensivo e eficiente da capacidade existente.

Uso intensivo e acesso**Extensão de vida útil (reparo, recondicionamento e remanufatura)**

Melhora o desempenho e a confiabilidade no uso real por meio de melhores práticas de manutenção e reparos oportunos, reduzindo períodos de inatividade e desempenho abaixo do esperado.

Reduz a necessidade de expansão contínua da oferta primária, aliviando a pressão sobre mercados restritos, que de outra forma poderiam resultar em fortes oscilações de preços.

Uso em cascata em aplicações de segunda vida

Aproveita a capacidade “ociosa” de baterias de veículos elétricos (VE) retiradas de uso em novas aplicações, transformando o que seria capacidade inativa ou desperdiçada em serviços úteis.

Adiciona flexibilidade ao sistema ao fornecer um “amortecedor” adicional de capacidade utilizável, que pode ser mobilizado em resposta a choques sem a necessidade de expandir imediatamente a produção.

Reciclagem de alta qualidade e circulação de materiais

Incentiva escolhas de materiais mais deliberadas e designs modulares que evitem bloqueios ineficientes (lock-ins), a partir de retroalimentação para o design e o planejamento do sistema (quando a reciclagem de alta qualidade é prevista e valorizada).

Cria uma base de recursos secundários mais distribuída geograficamente, capaz de amortecer choques de preços e reduzir a dependência de um conjunto restrito de fornecedores primários e regiões.

Intercâmbio de informações

Orienta o design de produtos, os modelos de negócio e a regulação, por meio do uso de dados sobre utilização, desempenho e degradação — desincentivando o superdimensionamento, a ociosidade de ativos e incentivando o uso eficiente.

Apoia a diversificação e a resiliência por meio de dados transparentes, contratos estáveis de longo prazo e marcos regulatórios que incentivam novos entrantes, infraestrutura compartilhada e uma captura de valor mais equilibrada entre regiões.

OS TRÊS NÍVEIS DE AÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR PARA BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para avançar da visão à implementação, esses ciclos são traduzidos em três níveis de ação distintos, porém interdependentes. Esses dois conceitos podem ser explicados da seguinte forma:

- **Ciclos** descrevem o que acontece com baterias e minerais ao longo do tempo — as formas como são utilizados por mais tempo, utilizados de forma mais intensiva, direcionados para novas aplicações ou, por fim, reciclados.
- **Níveis** descrevem onde são tomadas as decisões que podem viabilizar ou bloquear esses ciclos — **no design de produtos e componentes**, nos **modelos de negócio** e estruturas de propriedade, e nos **sistemas** mais amplos de políticas públicas, infraestrutura e financiamento.

Uma intervenção ou mecanismo de economia circular pode, portanto, ser entendido como a ativação de um ou mais ciclos, em um ou mais níveis de ação. Esse enquadramento ajuda a esclarecer (i) como diferentes intervenções se complementam e (ii) como enfrentam desafios de escala, ao evidenciar onde surgem os fatores limitantes nas decisões que moldam produtos, mercados e sistemas.



01 Nível de produtos e componentes

onde se define o potencial técnico da economia circular

Este nível trata de como baterias, veículos e componentes são projetados, dimensionados, montados e especificados — incluindo escolhas de química, arquitetura dos packs, soluções de união e adesão, e diagnósticos integrados.

As decisões de design nesse nível determinam:

- **Quão efetivamente os ciclos internos (manutenção, reparo) podem ser realizados**, por exemplo, por meio de designs modulares de packs, adesivos com possibilidade de desvinculação (debondable) e formatos padronizados
- **Quão facilmente as baterias podem ser reaproveitadas** ou direcionadas para aplicações de segunda vida, como armazenamento estacionário
- **Quão eficientemente os materiais podem ser recuperados no fim de vida**, e a que custo, por meio de design para desmontagem e reciclagem de alta qualidade
- **Quanto da demanda por minerais críticos é gerada desde o início**, por meio do dimensionamento adequado das baterias (rightsizing), melhorias na densidade energética e substituição de materiais

Em outras palavras, o design de produtos e componentes é onde se define o limite técnico da economia circular: ele determina quais ciclos são possíveis, qual o valor que podem gerar e quais serão seus resultados econômicos e ambientais.

02 Nível de modelos de negócio

onde o valor da economia circular é criado e capturado ao longo do tempo

Este nível trata de como o valor é incentivado, gerado, compartilhado e mitigado em termos de risco ao longo do ciclo de vida das baterias — por exemplo, por meio de modelos como Product-as-a-Service (PaaS), Battery-as-a-Service (BaaS) e Material-as-a-Service (MaaS), mercados de segunda vida, logística baseada em serviços e logística reversa, ou otimização de frotas orientada por dados.

Os modelos de negócio nesse nível moldam:

- **Estruturas de propriedade e incentivos:** quem detém a bateria ou os materiais nela incorporados em cada etapa, quem é recompensado por projetar para durabilidade e recuperação, e quem é responsável pelo fim de vida
- **Ativação dos ciclos na prática:** modelos baseados em serviço, leasing e desempenho (como BaaS, MaaS e ofertas estruturadas de segunda vida) viabilizam alta utilização, manutenção e upgrades planejados, além de fluxos de retorno previsíveis para reparo, remanufatura, reaproveitamento e reciclagem
- **Distribuição de riscos e retornos ao longo da cadeia de valor** especialmente entre países produtores de minerais, fabricantes de baterias, fabricantes do equipamento original (OEMs) e operadores

Assim, os modelos de negócio são o ponto em que os ciclos circulares deixam de ser apenas possibilidades técnicas e se tornam propostas concretas e financiáveis — determinando se a economia circular é suficientemente rentável, para um número suficiente de atores, a ponto de escalar.

03 Nível de sistemas

onde são criadas as condições habilitadoras da economia circular

Este nível trata de como infraestrutura, políticas públicas, financiamento e a colaboração ao longo da cadeia de valor são estruturados (ou reestruturados) para acelerar e viabilizar a economia circular, incluindo:

- **Sistemas de mobilidade e energia**, como mobilidade sob demanda, V2G e infraestrutura de troca de baterias integrada à rede
- **Infraestrutura circular regional** para reparo, remanufatura e reciclagem, bem como a força de trabalho, competências e capacidades, além de padrões de segurança e qualidade necessários para operar essa infraestrutura em escala
- **Regras para movimentação de baterias e materiais recuperados entre países**, bem como para a classificação entre resíduos e recursos secundários
- **Mecanismos de transparência e rastreabilidade**, como passaportes de baterias e padrões de desempenho ESG na mineração e no processamento
- **Economia política, definição de regras e estabelecimento de padrões.** Decisões sobre dados, relato e rastreabilidade moldam quem pode participar, quem assume os custos e quem captura valor ao longo da cadeia de valor de baterias para veículos elétricos

As decisões tomadas nesse nível determinam:

- **Se soluções circulares podem escalar na prática**, por exemplo, se regras e logística transfronteiriças permitem que baterias sejam movimentadas para onde há capacidade disponível, ou se políticas públicas e financiamento apoiam a infraestrutura regional de reciclagem e reaproveitamento
- **Como os benefícios e os custos de uma economia circular de baterias para veículos elétricos são distribuídos entre regiões**, especialmente entre países produtores de minerais e economias emergentes
- **Em que medida a economia circular pode reduzir riscos sistêmicos**, como os identificados anteriormente — descompasso entre oferta e demanda, impactos ambientais, questões sociais, ineficiência de produto e sistema, e gargalos e disrupções na cadeia de suprimento

Ações em nível sistêmico ajudam a evitar que iniciativas circulares permaneçam como projetos piloto isolados, transformando ciclos e modelos de negócio em uma cadeia de valor global de baterias para veículos elétricos coesa e resiliente.

Tabela 2 Como os ciclos da economia circular operam nos níveis de produto e componente, modelo de negócio e sistema

Cada ciclo requer intervenções coordenadas nos níveis de produto e componente, modelo de negócio e sistema; lacunas em qualquer um desses níveis podem impedir que os fluxos circulares alcancem escala.

Níveis de ação ➤

Produtos e componentes

Modelos de negócio

Sistemas

Uso intensivo e acesso

- Packs dimensionados adequadamente para ciclos reais de uso
- Carregamento bidirecional e gestão térmica robusta
- Telemetria integrada (uso, degradação) para otimização

- Mobilidade compartilhada/sob demanda e otimização de frotas
- Acesso flexível de autonomia (assinatura, troca de baterias, leasing)
- Agregação V2G e contratos de compartilhamento de receita

- Planejamento multimodal e redes de recarga/troca de baterias
- Regras e tarifas da rede para V2G (conexão, agregação)
- Padrões de interoperabilidade (recarga, comunicação)

Extensão de vida útil (reparo, recondição e remanufatura)

- Arquiteturas modulares; fixações reversíveis / soluções de desvinculação (debonding)
- Componentes acessíveis; documentação para reparo; interfaces padronizadas
- Diagnósticos e dados de estado de saúde (state of health); transparência de química (passaporte)

- Contratos de serviço e garantias estendidas
- Programas de devolução do núcleo (core-return), troca e upgrade
- Mercados para módulos reparados/recondicionados; alocação clara de responsabilidades

- Centros de reparo/remanufatura e força de trabalho qualificada
- Direito ao reparo: acesso a peças e informações técnicas
- Padrões de segurança e certificação; regras de transporte em conformidade

Uso em cascata em aplicações de segunda vida

- Design para desmontagem segura e reaproveitamento
- Padronização da classificação do estado de saúde e de interfaces (tensão, comunicação)
- Sistema de Gestão de Bateria (Battery Management System – BMS) e recursos de segurança preparados para reaproveitamento

- Serviços de armazenamento em segunda vida (leasing, pagamento por kWh)
- Plataformas de agregação e correspondência (matching) para packs/módulos usados
- Garantias e compromissos de desempenho para ativos de segunda vida

- Incentivos de rede e acesso a mercado para armazenamento distribuído
- Padrões de qualificação, segurança e garantia para segunda vida
- Licenciamento e conexão simplificados; adoção de passaportes

Reciclagem de alta qualidade e circulação de materiais

- Rotulagem clara de materiais/química; design para desmontagem automatizada
- Escolhas de união que permitam separação e classificação com alto rendimento
- Escolhas de químicas e materiais que favoreçam a recuperação de alta qualidade

- Retorno e coleta integrados a contratos de venda/serviço
- Acordos de longo prazo de fornecimento (feedstock) e escoamento (offtake) (aquisição em circuito fechado)
- Modelos de precificação e contratos que recompensam rendimento, qualidade e rastreabilidade

- Capacidade regional de coleta, pré-processamento e reciclagem
- Requisitos de conteúdo reciclado e padrões de qualidade de materiais
- Definições alinhadas de fim de vida/fim da condição de resíduo (end-of-waste) e regras de movimentação em conformidade

Intercâmbio de informações

- Identificador único da bateria e passaporte digital de produto
- Conjunto de dados comum: química, origem (provenance), histórico de uso e estado de saúde
- Cibersegurança e design com acesso controlado

- Acordos de compartilhamento de dados e intermediários confiáveis
- Contratos que definem responsabilidades, valor residual e responsabilidades legais
- Serviços de garantia/auditoria para validação de declarações (por exemplo, teor de conteúdo reciclado, divulgação ESG)

- Padrões interoperáveis e governança para acesso e consentimento
- Definições e regras coerentes (fim de vida, resíduo/fim da condição de resíduo)
- Sinais de política pública que reduzem riscos de investimento e diminuem fricções

O valor gerado pela transição para uma economia circular de baterias para veículos elétricos deve ser distribuído de forma justa entre regiões e ao longo da cadeia de valor

A cadeia de valor de baterias para veículos elétricos, altamente centralizada e vulnerável, gera incerteza econômica para todos os países, uma vez que nenhum é autossuficiente e todos estão expostos a disrupções na cadeia de suprimento.⁴¹ Ao mesmo tempo, a construção de cadeias de valor totalmente independentes, de ponta a ponta, não será viável no curto prazo, dado que a distribuição geológica dos recursos é desigual e que, para regiões ricas em recursos, avançar na cadeia de valor exige acesso a capital, tecnologia e competências — fatores que dependem da cooperação internacional.⁴² Nesse contexto, uma maior colaboração é essencial tanto para distribuir o valor de forma mais equitativa entre regiões quanto para reduzir riscos sistêmicos. A transição de um modelo centrado na gestão da escassez e dos riscos para sistemas colaborativos pode fortalecer a resiliência e impulsionar a inovação ao longo da cadeia de valor de baterias para veículos elétricos.⁴³

Alcançar essa mudança exige repensar como a cooperação é estruturada, de modo a evitar a reprodução de práticas extrativas lineares. À medida que a economia circular para baterias de veículos elétricos avança, ainda será necessário expandir a mineração no curto prazo para viabilizar a transição. Nesse processo, a cooperação internacional deve garantir que essa expansão ocorra de forma responsável, com ênfase em transparência, gestão ambiental, responsabilidade social e governança ética ao longo de todo o ciclo de vida da mineração.^{44,45} No entanto, essas práticas ainda estão longe de serem a norma no setor.⁴⁶ Embora padrões voluntários e iniciativas tenham contribuído para avanços na mineração responsável,⁴⁷ é necessário complementá-los com regulações vinculantes que assegurem a aplicação consistente dessas exigências.

A cooperação internacional também deve permitir que países em desenvolvimento — onde se encontra a maior parte desses recursos — não se limitem à exportação de matérias-primas de baixo valor, mas participem plenamente do desenvolvimento de cadeias de suprimento circulares para baterias de veículos elétricos, agregando valor às suas exportações por meio do processamento de materiais e do desenvolvimento de tecnologias de fim de vida, como reciclagem, reaproveitamento e reparo.⁴⁸ Isso pode ser viabilizado por meio de acordos de transferência de tecnologia, investimento estrangeiro direto, acordos comerciais mais justos e apoio ao desenvolvimento de capacidades.

Por fim, os esforços de cooperação internacional devem reconhecer explicitamente e engajar o setor informal, que desempenha um papel relevante tanto a montante, na mineração artesanal e de pequena escala, quanto a jusante, em atividades de fim de vida como coleta, desmontagem e reciclagem.^{49,50} Em muitos países em desenvolvimento, atores informais garantem meios de subsistência para milhões de pessoas e fornecem uma parcela significativa de minerais críticos e materiais secundários, mas frequentemente operam fora de marcos regulatórios, enfrentando condições de trabalho inseguras, impactos ambientais e instabilidade econômica.⁵¹ Uma transição justa para sistemas circulares colaborativos exige, portanto, políticas que apoiem a formalização gradual, a melhoria das condições de trabalho, o acesso a financiamento e tecnologia e a integração desses atores em cadeias de suprimento responsáveis⁵² — possivelmente por meio de modelos cooperativos, parcerias público-privadas e modelos inclusivos de reciclagem.⁵³ Isso pode fortalecer a resiliência das cadeias de valor de baterias para veículos elétricos e garantir que sua expansão gere valor de forma mais equitativa entre os diferentes atores regionais.

03

**CINCO ÁREAS
DE DESTAQUE
PARA
IMPULSIONAR
A ECONOMIA
CIRCULAR
DE BATERIAS
PARA VEÍCULOS
ELÉTRICOS**

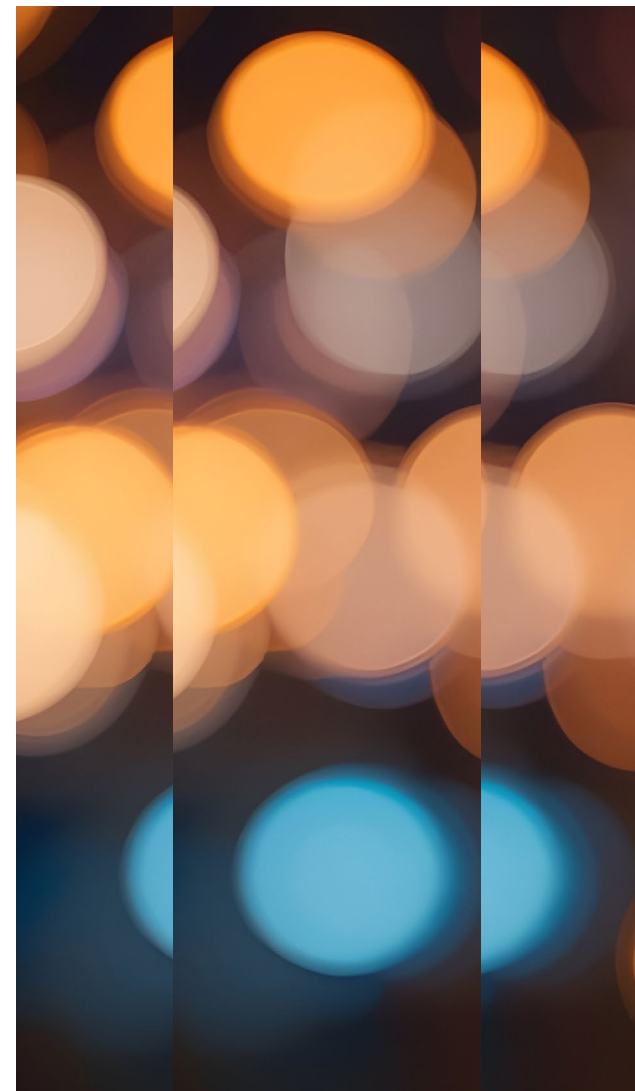
Abordagens isoladas de economia circular vêm sendo cada vez mais reconhecidas como uma limitação na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos. À medida que essas baterias escalam rapidamente, existem diferentes formas de responder. Uma delas é tratar a circularidade como um conjunto de soluções de fim de vida — necessárias, mas, em última instância, reativas. Outra é reconhecer uma mudança mais profunda: o marco da economia circular pode funcionar como uma “chave mestra” para a era das baterias, pois altera aquilo que o sistema busca otimizar — de volume processado para utilização, de produtos de ciclo único para ativos geridos ao longo do tempo, de intervenções isoladas para ciclos que se reforçam mutuamente. Quando bem aplicada, a economia circular não abre apenas uma porta, mas várias: decisões de design, modelos comerciais, logística reversa, arquiteturas de dados, casos de investimento e alinhamento de políticas públicas.

Cinco “áreas de destaque” para ação estratégica em economia circular oferecem oportunidades de atuação imediata ao longo da cadeia de valor. Desenvolvidos por meio de um processo estruturado de engajamento com mais de 30 organizações do setor de baterias para veículos elétricos, esses casos destacam áreas-chave nas quais a ação coordenada de empresas, investidores e formuladores de políticas públicas pode acelerar o progresso e a implementação efetiva dos ciclos circulares nos diferentes níveis. Essas áreas não constituem uma lista exaustiva de todas as ações necessárias para concretizar a visão apresentada no Capítulo 2, mas sim identificam oportunidades imediatas e de alto impacto capazes de impulsionar mudanças significativas rumo a uma economia circular para baterias de veículos elétricos, ao mesmo

tempo em que enfrentam os riscos sistêmicos existentes. Para uma visão completa de como diferentes atores ao longo da cadeia de valor podem destravar oportunidades de economia circular, consulte o Apêndice.

As oportunidades a seguir mostram não apenas o que precisa acontecer com baterias e minerais, mas também onde as decisões precisam evoluir dentro e ao longo do sistema — em equipes de design e engenharia, em conselhos administrativos e negociações contratuais, e nos âmbitos de políticas públicas, infraestrutura e cooperação internacional. Elas também indicam quem precisa agir para desbloquear os benefícios de uma economia circular de baterias para veículos elétricos e garantir que esse modelo se torne a norma, e não a exceção.

No entanto, o surgimento dessas primeiras áreas de destaque não significa que já alcançamos uma resposta definitiva, nem que o trabalho restante seja apenas incremental. O sistema de baterias é complexo, e os resultados que importam para as lideranças — como custos, resiliência, emissões e abastecimento — são moldados a montante e em múltiplas interfaces: onde estão os incentivos, como o valor é distribuído e quais informações e infraestruturas tornam os ciclos economicamente viáveis. Este relatório não oferece uma conclusão definitiva, mas sim **um modelo analítico replicável e um conjunto inicial de áreas prioritárias** como ponto de partida para a colaboração ao longo da cadeia de valor e entre setores: uma linguagem comum para orientar o diálogo desde já e uma base prática sobre a qual análises mais aprofundadas, projetos piloto e colaborações industriais podem ser desenvolvidos.



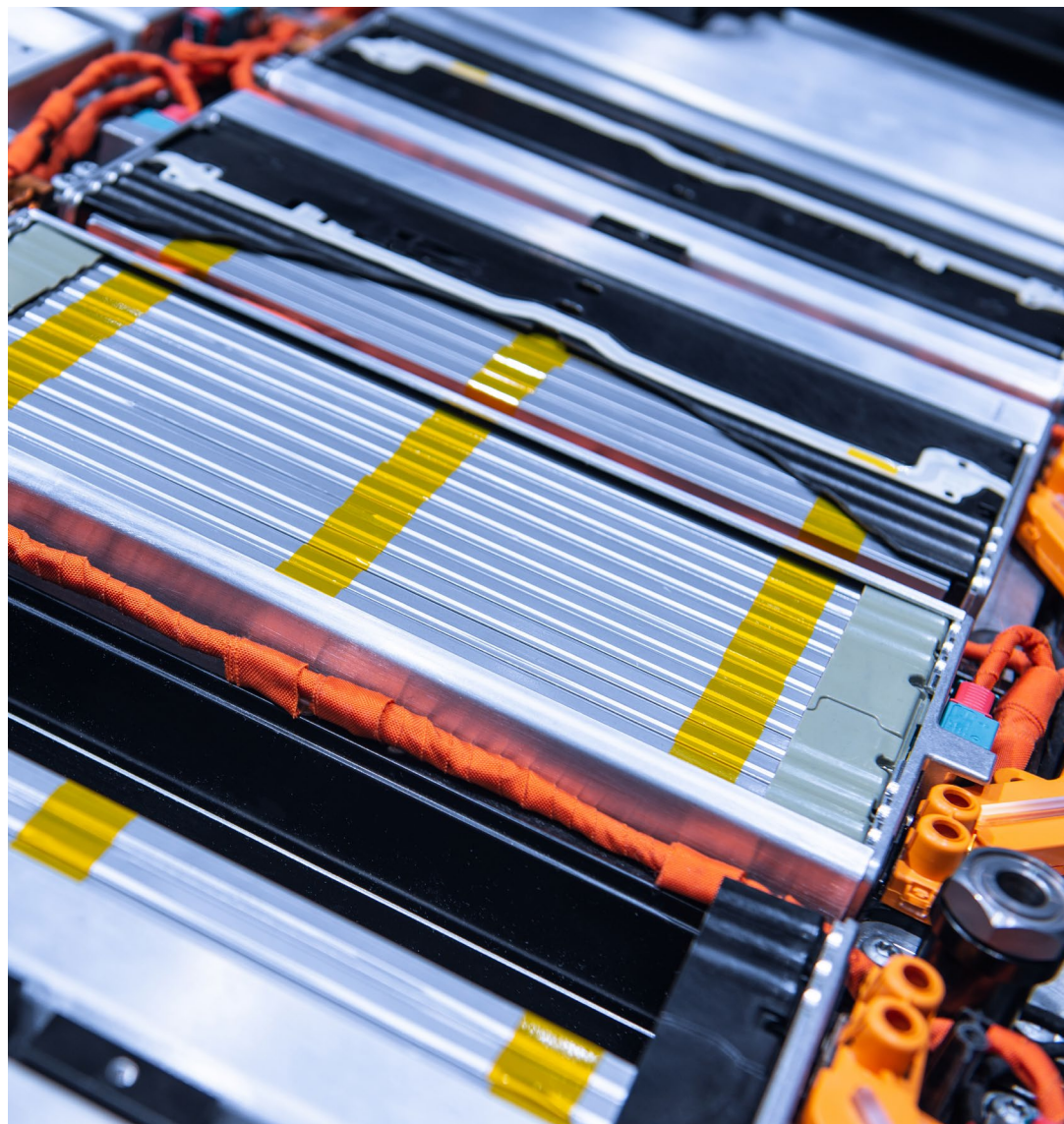
PROJETAR BATERIAS PARA CIRCULARIDADE, NÃO PARA DESCARTE

Quais benefícios essa oportunidade desbloqueia

Redesenhar baterias de veículos elétricos para diagnóstico, desmontagem, modularidade e rastreabilidade torna tecnicamente e economicamente viável operar, em escala, os ciclos de reparo, recondicionamento, segunda vida e reciclagem de alta qualidade. Trata-se de um habilitador fundamental de uma economia circular de baterias para veículos elétricos, ao transformar baterias de um design de uso único em componentes duráveis de um sistema mais amplo de mobilidade e energia — concebidos intencionalmente para durar, ser desmontados e reutilizados em múltiplos ciclos e aplicações. Esse redesenho reduz o custo ao longo do ciclo de vida ao evitar substituições prematuras, permitindo um reparo e reaproveitamento mais eficazes de produtos e materiais (por exemplo, ao viabilizar que prestadores de serviços desses ciclos consigam reprocessar materiais de forma prática e eficiente), além de preservar por mais tempo um maior valor residual em packs de bateria e módulos. Também fortalece a resiliência ao possibilitar maior capacidade regional de reparo, remanufatura e recuperação de materiais, reduzindo a exposição a choques no fornecimento primário. Ao estender a vida útil e melhorar os rendimentos de recuperação, o redesenho das baterias reduz as emissões por kWh entregue e apoia o abastecimento responsável, por meio de uma composição de materiais mais clara e rastreável, facilitando a conformidade e aumentando a transparência.

Quais ciclos são viabilizados

- Extensão de vida útil por meio de reparo, recondicionamento e remanufatura
- Uso em cascata em aplicações de segunda vida
- Reciclagem de alta qualidade e circulação de materiais
- Intercâmbio de informações



Como pode ser aplicado em cada nível

Produtos e componentes

- Introduzir arquiteturas modulares de packs de bateria e módulos que permitam isolar e substituir células ou módulos defeituosos sem a necessidade de descartar o pack completo.
- Substituir uniões permanentes e de difícil separação por soluções que permitam desvinculação (debonding) e desmontagem eficientes, reduzindo o tempo de reparo e aumentando as taxas de recuperação na reciclagem.
- Integrar diagnósticos e rastreabilidade (por exemplo, por meio de sensores incorporados e passaportes digitais de produto), de modo que a condição da bateria, sua química e seu design sejam visíveis para reparadores, integradores de segunda vida e recicladores, viabilizando maior circulação e ganhos de eficiência.

Modelos de negócio

- Viabilizar modelos de serviço baseados em reparo e upgrade (em vez de substituição prematura), melhorando o custo total de propriedade e ampliando a geração de receita de cada pack de bateria ao longo do tempo.
- Reduzir o custo e a complexidade de recuperar packs e componentes para segunda vida e reciclagem, fortalecendo o caso de negócio para modelos como BaaS e outros que dependem de fluxos reversos eficientes.

Sistemas

- Dar suporte a requisitos regulatórios de durabilidade mínima, reparabilidade e reciclabilidade, bem como ao uso de passaportes digitais de produto.
- Ampliar a disponibilidade e a eficiência da infraestrutura regional de reparo e reciclagem, fortalecendo a resiliência e reduzindo o impacto ambiental por tonelada de material processado.

Quem precisa agir

» Fabricantes de células e baterias:

Liderar o estabelecimento de novos padrões de design alinhados aos requisitos da economia circular, incluindo a modularidade de células e componentes (como fixações de packs padronizadas ou interoperáveis), o uso de soluções de desvinculação (debonding) e a adoção de diagnósticos integrados. Colaborar com reparadores, remanufaturadores e recicladores para compreender como os designs atuais limitam esses processos e definir novos padrões que permitam que as baterias sejam reintegradas aos ciclos com maior eficiência e melhor relação custo-benefício.

» Fabricantes de veículos (OEMs):

Incorporar critérios de design circular de baterias nas decisões de plataforma e nos requisitos para fornecedores. Projetar veículos que permitam a remoção e reinstalação das baterias.

» Reparadores, remanufaturadores e recicladores:

Fornecer feedback sobre barreiras de design que dificultam o reparo, a remanufatura e a reciclagem eficientes, e colaborar na definição de diretrizes de design compartilhadas com atores a montante da cadeia de valor.

» Organismos de padronização e formuladores de políticas públicas:

Estabelecer padrões e regulações comuns para durabilidade, reparabilidade, reciclabilidade e disponibilização de dados, que apoiem essas mudanças de design e criem os incentivos econômicos necessários para sua adoção.

» Financiamento e alocação de capital:

Alinhar decisões de investimento a métricas de intensidade material e de utilização, de modo a reduzir a demanda por minerais críticos nos sistemas de mobilidade e armazenamento.

REPENSAR O SERVIÇO DE BATERIAS EM SISTEMAS OTIMIZADOS DE ENERGIA E MOBILIDADE

Quais benefícios essa oportunidade desbloqueia

Projetar baterias de veículos elétricos adequadas à finalidade (fit for purpose) — alinhadas às funções e serviços que precisam entregar —, em conjunto com a reconfiguração dos sistemas de mobilidade e energia para atender às necessidades de deslocamento, reduz o superdimensionamento estrutural de capacidade e a especificação excessiva de tecnologia, diminuindo assim a demanda por minerais. Ao mesmo tempo, a qualidade e a utilidade do serviço são mantidas ou até aprimoradas (por exemplo, em termos de toneladas de minerais críticos por passageiro-quilômetro). Isso implica repensar o valor das baterias — deixando de maximizar a capacidade em cada veículo e passando a garantir o desempenho adequado para cada uso, com sistemas de mobilidade projetados para viabilizar o acesso a serviços, e não baterias cada vez maiores.

O sistema de energia e mobilidade pode ser redesenhado para que o acesso a “mais” passageiros-quilômetro seja viabilizado por serviços e infraestrutura, e não por baterias maiores. Essa mudança desloca o mercado de uma lógica padronizada de superdimensionamento para ofertas mais direcionadas e eficientes. Em alguns casos, isso exige criatividade em design de produto, marca e serviços — por exemplo, tornar uma autonomia “suficiente” percebida como premium e sem atrito, e redefinir os conceitos de desempenho e experiência do usuário.

Quais ciclos são viabilizados

- Uso intensivo e acesso
- Extensão de vida útil por meio de reparo, condicionamento e remanufatura
- Intercâmbio de informações



Como pode ser aplicado em cada nível

Produtos e componentes

- Dimensionar baterias com base em perfis reais de uso, em vez de adotar, por padrão, packs grandes e de longa autonomia para todas as aplicações. Inovar para que uma autonomia “suficiente” seja percebida como a escolha padrão pelos consumidores.
- Adaptar químicas e designs de packs de bateria de acordo com o uso: por exemplo, baterias de alto desempenho para frotas de longa distância e packs menores e mais eficientes em termos de materiais para veículos urbanos.

Modelos de negócio

- Expandir serviços de mobilidade compartilhada e sob demanda (incluindo mecanismos de gestão de demanda e intervenções) que aumentem a utilização de veículos e baterias, tornando viável o uso de baterias menores para muitos usuários.
- Implantar modelos como troca de baterias, assinaturas ou outros que permitam acesso a veículos com diferentes autonomies conforme a necessidade, reduzindo a dependência de possuir — ou pagar por — baterias superdimensionadas.

Sistemas

- Investir em infraestrutura de recarga e troca de baterias — especialmente em áreas urbanas — que permita recargas frequentes e convenientes, reduzindo a ansiedade de autonomia.
- Integrar soluções V2G e V2H para que as baterias forneçam tanto serviços de mobilidade quanto de armazenamento de energia, maximizando os kWh entregues por unidade de minerais críticos.

Quem precisa agir

» Fabricantes de baterias e fabricantes do equipamento original (OEMs):

Incorporar o dimensionamento adequado (rightsizing) no planejamento de produtos e no design dos veículos. Adotar modelos de negócio circulares, como assinaturas e troca de baterias, para viabilizar um uso mais eficiente e econômico dos minerais das baterias por quilômetro rodado. Comunicar de forma transparente com os usuários finais sobre as necessidades reais de autonomia, contribuindo para reduzir a ansiedade de autonomia e incentivar escolhas de baterias adequadamente dimensionadas.

» Cidades e provedores de mobilidade:

Planejar e implementar serviços de mobilidade compartilhada, redes de recarga e estratégias de transporte multimodal que favoreçam o uso intensivo de veículos com dimensionamento adequado. Exigir que operadores de pontos de recarga promovam a interoperabilidade entre diferentes baterias e infraestruturas de carregamento, incluindo a implementação de carregadores bidirecionais. Comunicar os benefícios e viabilizar a adoção de sistemas multimodais para incentivar a adesão dos usuários. Introduzir precificação variável (por exemplo, tarifas de estacionamento diferenciadas de acordo com o peso da bateria e do veículo) para incentivar a escolha por veículos adequadamente dimensionados.

» Provedores de energia e operadores de rede:

Desenvolver marcos regulatórios e estruturas tarifárias que viabilizem serviços V2G e soluções correlatas. Atuar em conjunto com reguladores, operadores de pontos de recarga e autoridades municipais para antecipar necessidades de modernização da rede e desenvolver infraestrutura de recarga que permita o uso eficiente e em larga escala das baterias de veículos elétricos.

» Formuladores de políticas públicas:

Alinhar políticas de planejamento urbano, transporte e energia para viabilizar o dimensionamento adequado, a mobilidade compartilhada e a integração à rede, tornando essas soluções economicamente viáveis. Revisar regras de compras públicas nesses setores para criar sinais de demanda consistentes.

» Prestadores de serviços de reparo, leasing e aluguel de veículos elétricos:

Colaborar com outros atores do sistema para integrar de forma fluida atividades dos ciclos internos, como o reparo, aos sistemas de mobilidade, viabilizando a adoção de soluções de mobilidade mais otimizadas.

ESCALAR MODELOS DE NEGÓCIO CIRCULARES

Quais benefícios essa oportunidade desbloqueia

Modelos de negócio circulares transformam baterias de veículos elétricos e seus materiais em ativos de longo prazo, em vez de produtos vendidos apenas uma vez.

Esses modelos recompensam durabilidade, desempenho, recuperação e aplicação em segunda vida ao longo de múltiplos ciclos de uso, permitindo gerar mais valor a partir do mesmo estoque de baterias e minerais. Modelos como Material-as-a-Service (MaaS), Battery-as-a-Service (BaaS), assinaturas de upgrade e manutenção, garantias baseadas em desempenho e ofertas estruturadas de segunda vida podem alinhar incentivos comerciais essenciais em torno de durabilidade, disponibilidade (uptime), recuperação e valor residual — em vez de substituição prematura. Ao manter a propriedade com um único ator, esses modelos também podem facilitar o monitoramento da localização de produtos e materiais, evitando que se percam ao longo da cadeia.

Quais ciclos são viabilizados

- Uso intensivo e acesso
- Extensão de vida útil por meio de reparo, recondicionamento e remanufatura
- Uso em cascata em aplicações de segunda vida
- Reciclagem de alta qualidade e circulação de materiais



Como pode ser aplicado em cada nível

Produtos e componentes

- Projetar para durabilidade, reparabilidade, segunda vida e reciclabilidade, de modo a viabilizar uma retenção de valor mais eficaz ao migrar para modelos de negócio que permitem aos provedores manter a propriedade das baterias ou dos materiais nelas incorporados.
- Estabelecer arranjos contratuais que exijam transparência nas decisões de design e apoiem investimentos em capacidades adequadas de reparo e reciclagem.

Modelos de negócio

- Modelos Battery-as-a-Service (BaaS) que transferem a propriedade das baterias para operadores especializados, responsáveis por carregamento, manutenção, upgrades e fim de vida, frequentemente utilizando packs padronizados, intercambiáveis e monitoramento centralizado.
- Modelos Material-as-a-Service (MaaS) que permitem que empresas de mineração, processamento e reciclagem “aluguem” minerais críticos ao longo da cadeia, mantendo a propriedade à medida que circulam por múltiplos ciclos de vida de produtos.
- Modelos de negócio de segunda vida que criam novas fontes de receita ao redirecionar baterias para armazenamento estacionário e outras aplicações quando deixam de atender aos requisitos de desempenho automotivo. Há um potencial particularmente forte de demanda por essas soluções no Sul Global, em regiões onde a infraestrutura de rede elétrica ainda está em desenvolvimento.

Sistemas

- Utilizar modelos de negócio circulares baseados em contratos para sustentar fluxos previsíveis e de longo prazo de materiais e produtos, apoiando o planejamento de infraestrutura regional, investimentos e desenho de políticas públicas.
- Garantir que modelos de negócio circulares ao longo da cadeia de valor contribuam para redistribuir oportunidades econômicas, permitindo que países produtores de minerais e outros atores atualmente com margens reduzidas capturem mais valor a partir dos mesmos recursos.
- Projetar deliberadamente modelos de negócio e sistemas para equilibrar de forma ótima os compromissos (trade-offs) entre uso de materiais e eficiência, evitando consequências indesejadas na adoção de modelos como BaaS ou troca de baterias. Por exemplo, embora modelos de troca possam aumentar a utilização e o valor ao longo da vida útil, também podem elevar a demanda devido à redução de custos iniciais ou ao aumento da conveniência, além de potencialmente exigir estoques adicionais de baterias como “amortecedor” nas redes de troca. Assim, o resultado líquido em termos de uso de minerais depende das escolhas de design do sistema e do modelo de negócio — não sendo uma consequência automática do modelo de serviço adotado.

Quem precisa agir

➤ Empresas de mineração e processamento::

Pilot and scale MaaS arrangements that keep materials in predictable loops and incentivise high-quality recovery.

➤ Fabricantes de baterias e fabricantes do equipamento original (OEMs):

Expandir modelos Battery-as-a-Service (BaaS) e outras ofertas baseadas em serviços, incluindo sistemas de troca de baterias e serviços integrados de mobilidade e energia. Quando as baterias atingirem o fim de sua vida útil em aplicações automotivas, estruturar ofertas para revenda em aplicações secundárias, como sistemas de armazenamento de energia. Investir na qualificação e capacitação da força de trabalho para viabilizar a entrega desses novos modelos de negócio baseados em serviços.

➤ Recicladores:

Experimentar modelos de negócio focados em “gestão de materiais” (material stewardship), de forma independente ou em colaboração com outros atores da cadeia de valor, para capturar mais oportunidades de geração de valor e ir além de modelos tradicionais de venda única de materiais reciclados.

➤ Empresas de energia e utilities:

Estabelecer parcerias com OEMs, atores da cadeia de suprimento, gestores de ativos e investidores para aplicações de segunda vida, integrando essas soluções ao planejamento da rede elétrica.

➤ Instituições financeiras e seguradoras:

Desenvolver instrumentos que reconheçam o valor dos ativos representados por baterias e materiais ao longo de múltiplos ciclos de vida.

➤ Formuladores de políticas públicas:

Fortalecer a colaboração transfronteiriça e avançar na harmonização de regras para classificação de fim de vida e transporte de baterias, viabilizando a criação de um mercado eficiente de segunda vida.

CONSTRUIR E COINVESTIR EM INFRAESTRUTURA CIRCULAR REGIONAL

Quais benefícios essa oportunidade desbloqueia

Reimaginar a cadeia de valor de baterias como uma rede intencionalmente projetada de infraestrutura regional e inter-regional, que permita que materiais circulem de forma eficiente, resiliente e transparente. A expansão da logística reversa regional e da capacidade de processamento — realizada por meio de investimentos colaborativos — pode garantir que baterias e minerais críticos circulem de maneira eficiente, resiliente e transparente, ao mesmo tempo em que diversifica as oportunidades econômicas entre regiões. O fortalecimento da capacidade regional pode ser especialmente relevante em termos de sensibilidade ao tempo, aumento da viabilidade de investimentos (bankability) e coerência de políticas públicas. Em alguns casos, ao reduzir distâncias de transporte e melhorar a eficiência do processamento, pode também contribuir para a redução de emissões por tonelada processada. No entanto, a escala inter-regional pode ser mais atrativa para atividades que exigem alta especialização e elevados investimentos de capital (capex). A infraestrutura circular é complexa, e é fundamental mobilizar atores ao longo da cadeia de valor para construir uma base sólida de evidências e critérios compartilhados de decisão sobre o que deve ser desenvolvido em nível local, regional e internacional.

Quais ciclos são viabilizados

- Extensão de vida útil por meio de reparo, condicionamento e remanufatura
- Uso em cascata em aplicações de segunda vida
- Reciclagem de alta qualidade (por meio de hubs regionais de processamento)
- Intercâmbio de informações



Como pode ser aplicado em cada nível

Produtos e componentes

- Desenvolver instalações regionais para diagnóstico, reparo, remanufatura e reaproveitamento, de modo a viabilizar a manutenção de produtos e componentes em circulação próximos aos locais onde são utilizados. Isso é particularmente importante considerando que as aplicações de segunda vida em cascata podem ocorrer em geografias muito diferentes daquelas da primeira vida; viabilizar a coleta e a recirculação de materiais nas regiões onde efetivamente chegam ao fim de sua vida útil torna sua circulação mais eficiente em termos de custo e reduz o risco de vazamento para fora do sistema.
- Adaptar instalações de reciclagem co-localizadas ou em rede às químicas e aos designs mais predominantes em cada região.

Modelos de negócio

- Compartilhar investimentos em infraestrutura para reduzir riscos e custos para atores individuais, estruturando esses arranjos em torno de contratos de longo prazo que garantam o fornecimento (feedstock) para recicladores e o abastecimento para fabricantes e OEMs.
- Desenvolver novas ofertas de serviços relacionadas ao transporte, agregação, diagnóstico e processamento de baterias no fim da primeira vida e além.

Sistemas

- Estabelecer hubs regionais de forma estratégica para coleta, reparo, integração em segunda vida e reciclagem, reduzindo a dependência de um número limitado de centros globais de processamento e aumentando a resiliência a choques e disrupções comerciais.
- Cocriar e disponibilizar a infraestrutura necessária em parceria com países produtores de minerais, apoiando esses territórios na progressão ao longo da cadeia de valor, especialmente em atividades de processamento, remanufatura e reciclagem.

Quem precisa agir

» Matérias-primas e fornecimento a montante:

Coinvestir em logística reversa e infraestrutura de reciclagem para viabilizar o teste e a escala de modelos de negócio circulares, como MaaS.

» Fabricantes de baterias, OEMs e recicladores:

Coinvestir em instalações regionais e redes logísticas, compartilhando riscos e expertise. Desenvolver hubs regionais nos locais adequados, com capacidade para lidar com os volumes necessários em todas as etapas do processo de recirculação — da coleta à triagem, reciclagem e reprocessamento de minerais — garantindo viabilidade econômica. Em um primeiro momento, colaborar com outros atores da cadeia de valor que utilizem químicas de baterias semelhantes para destravar ganhos de eficiência na reciclagem. Considerar a formação de alianças de compradores para garantir demanda por minerais críticos circulares. Engajar empresas de mineração e processamento para aproveitar sua expertise em manuseio de materiais e desenvolver capacidade regional de reprocessamento.

» Prestadores de logística:

Desenvolver serviços especializados e em conformidade regulatória para o transporte de baterias usadas e em fim de vida dentro e entre regiões.

» Governos e instituições financeiras de desenvolvimento:

Fornecer marcos regulatórios habilitadores, instrumentos de mitigação de risco e financiamento público para catalisar investimentos privados, especialmente em economias emergentes e em desenvolvimento, com foco na construção de infraestrutura regional de coleta, triagem, reciclagem e processamento. Apoiar o desenvolvimento de mecanismos de transparência e rastreabilidade que tragam previsibilidade sobre fluxos futuros de materiais, reduzindo riscos de investimento nas regiões e nas escalas necessárias (ver mais no capítulo 3.5).

» Formuladores de políticas públicas:

Alinhar regras e incentivos para que as baterias sejam direcionadas às instalações mais adequadas para alcançar o melhor resultado circular (seja reparo, segunda vida ou reciclagem), ao mesmo tempo em que se evita o vazamento de materiais e se apoia o desenvolvimento — e investimento — em capacidades locais ou regionais onde agreguem valor. Facilitar o diálogo sobre investimentos e capacidades inter e intra-regionais, por meio da criação de fóruns para identificação de prioridades regionais, análise baseada em evidências de gargalos e lacunas de capacidade, e discussão sobre quando a capacidade distribuída regional é mais necessária e quando hubs especializados oferecem maior eficiência.

» Financiamento e alocação de capital:

Mobilizar instrumentos de financiamento combinado (blended finance) e mecanismos de compartilhamento de risco para atrair investimentos públicos e privados em infraestrutura de coleta, diagnóstico, remanufatura e reciclagem de alta qualidade.

» Instituições de educação e capacitação:

Estabelecer parcerias com empresas e governos para desenvolver programas de formação, pesquisa e desenvolvimento voltados a empregos na economia circular na cadeia de valor de baterias para veículos elétricos.

CRIAR AS CONDIÇÕES PARA QUE O SISTEMA OPERACIONAL CIRCULAR FUNCIONE

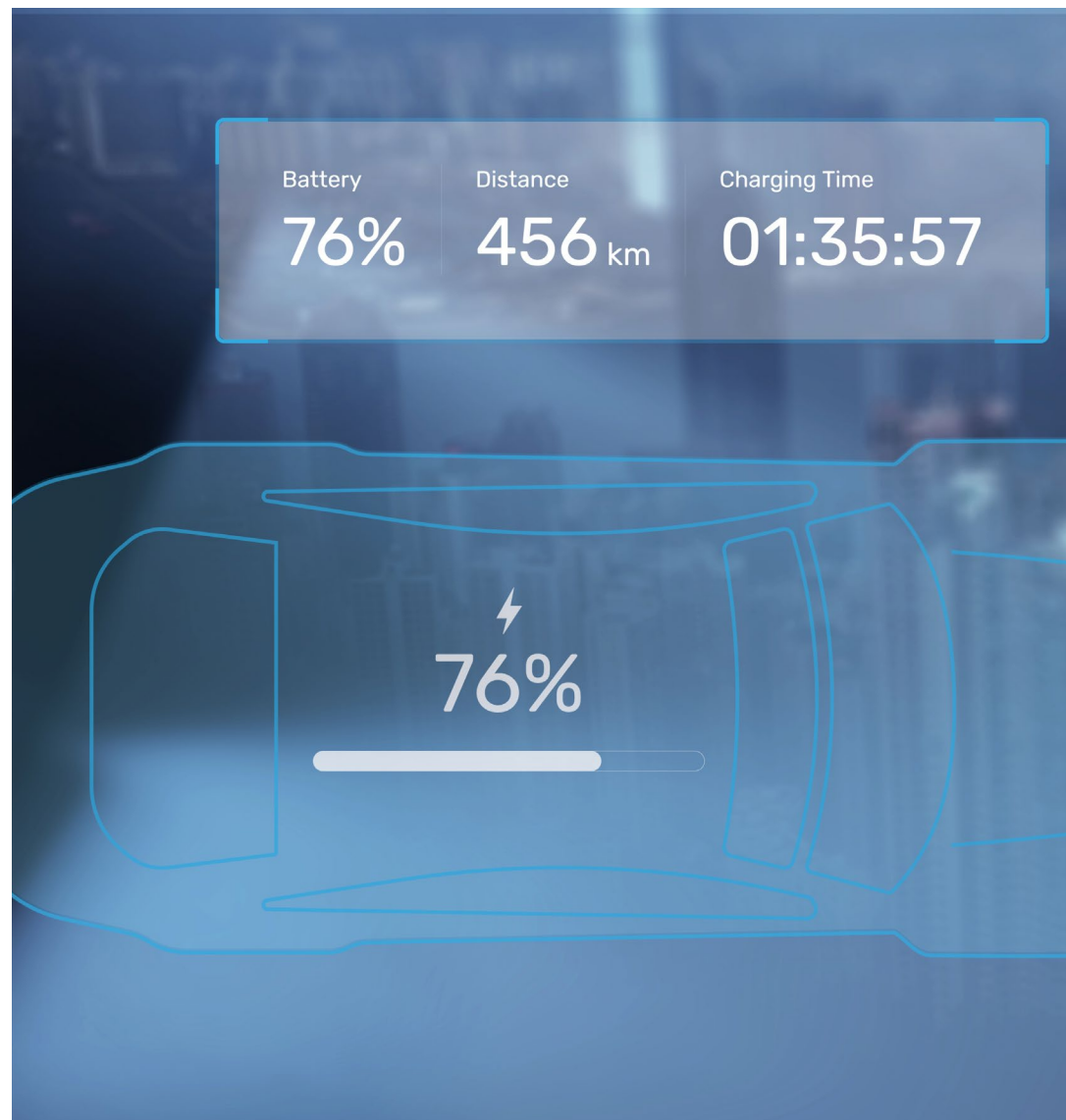
Quais benefícios essa oportunidade desbloqueia

Dados e políticas públicas são o sistema operacional de uma economia circular de baterias para veículos elétricos. Alinhar dados, definições e regras entre países é essencial para destravar investimentos e fazer com que todos os demais ciclos funcionem na prática. Sem políticas coerentes e visibilidade sobre dados de produtos, componentes e materiais, as baterias se tornam “ativos invisíveis” — difíceis de localizar, classificar e circular tecnicamente entre os diferentes ciclos. Os atores da cadeia de valor passam a não ter acesso às informações essenciais necessárias para viabilizar a recirculação das baterias na prática (por exemplo, dados sobre como reparar uma bateria de forma segura e técnica), e seu transporte para reparo, segunda vida ou reciclagem permanece caro e arriscado.

Ao criar transparência e rastreabilidade sobre fluxos atualmente pouco visíveis na economia de baterias para veículos elétricos, reduzem-se os custos de transação, viabiliza-se o funcionamento em escala de mercados secundários de produtos e minerais, e aumenta-se a confiança de empresas e investidores para financiar infraestrutura e novos modelos de negócio. A maior transparência sobre desempenho ambiental e social também fortalece o abastecimento responsável e reforça a confiança dos consumidores. Criar as condições para que o sistema operacional circular funcione dessa forma também fortalece a resiliência e impulsiona o desempenho comercial, ao melhorar o planejamento de fluxos futuros de materiais e reduzir a ocorrência de ativos encalhados (stranded assets) decorrentes de incertezas regulatórias.

Quais ciclos são viabilizados

- Intercâmbio de informações
- Todos os demais ciclos



Como pode ser aplicado em cada nível

Produtos e componentes

- Utilizar passaportes digitais de produto e ferramentas correlatas para registrar design, química, histórico de uso e estado de saúde das baterias. Disponibilizar essas informações aos atores relevantes quando necessário, para viabilizar decisões eficazes sobre reparo, segunda vida e reciclagem.

Modelos de negócio

- Coletar dados confiáveis sobre localização, condição e disponibilidade das baterias para sustentar mercados de BaaS, MaaS e segunda vida, permitindo que os atores planejem modelos de negócio com base em fluxos previstos de baterias usadas.

Sistemas

- Harmonizar definições de resíduo, fim de vida e “fim da condição de resíduo” (end-of-waste), juntamente com regras consistentes para o transporte de baterias e materiais recuperados, reduzindo fricções e incertezas entre países e viabilizando a circulação inter-regional quando a escala for necessária.
- Fornecer sinais claros e coerentes de políticas públicas para dar confiança aos investidores na construção de infraestrutura circular e no teste de novos modelos de negócio em escala.
- Reforçar a confiança de mercado por meio da demonstração de mecanismos robustos de governança e garantia (auditoria, certificação e integridade de dados).

Quem precisa agir

» Formuladores de políticas públicas e reguladores:

Avançar na harmonização de regras transfronteiriças para classificação de fim de vida, transporte e tratamento de baterias. Tornar obrigatória e apoiar a adoção de passaportes digitais de produto e de estruturas de compartilhamento de dados ao longo da cadeia de valor. Por exemplo, no caso da massa negra e da classificação por códigos de resíduos, as definições regulatórias não estão apenas desalinhadas, mas podem aumentar de forma comprovada os custos de transação e os encargos, enfraquecendo o caso de negócio para a reciclagem.

» Coalizões da indústria e organismos de padronização:

Definir requisitos comuns de dados, modelos de governança e mecanismos de garantia para passaportes de baterias e ferramentas de rastreabilidade. Trabalhar para assegurar sua adoção global e por todos os provedores de passaportes de baterias, minimizando fragmentação e divergências.

» Empresas ao longo da cadeia de valor:

Compartilhar dados relevantes (dentro de estruturas de governança acordadas) ao longo da cadeia de valor para viabilizar a circulação eficiente de baterias (por exemplo, por meio de reparo, remanufatura e reciclagem). Participar de projetos piloto que agreguem informações para orientar o planejamento de infraestrutura e o desenho de políticas públicas.

04

**ANÁLISES
APROFUNDADAS
E ESTUDOS DE
CASO NOS TRÊS
NÍVEIS DE AÇÃO**

As baterias de veículos elétricos estão no centro da transição para a eletrificação, reunindo alguns dos desafios mais complexos relacionados a recursos, custos e compromissos (trade-offs) de sustentabilidade. Uma economia circular de baterias verdadeiramente eficaz não se resume a uma única mudança tecnológica ou a soluções de fim de vida. Trata-se de uma abordagem ao longo de todo o ciclo de vida: manter as baterias gerando valor pelo maior tempo possível, recuperar esse valor por meio de reparo e reaproveitamento, e reinserir os materiais na produção com alta qualidade.

Este capítulo adota uma abordagem prática, voltada para “como isso funciona na prática”, oferecendo um panorama do que já está relativamente consolidado em comparação com o que ainda é emergente. Ele analisa como os três níveis de ação se reforçam mutuamente. Em linha com o marco da economia circular apresentado no Capítulo 2, começa pelo **produto**, pois o design define as limitações; avança para os **modelos de negócio**, pois os incentivos determinam o que é efetivamente implementado; e, por fim, amplia a perspectiva para os **sistemas**, pois são as redes que determinam o que ganha escala. Em termos simples, os produtos tornam a economia circular possível, os modelos de negócio a tornam viável economicamente, e os sistemas a tornam escalável.

Para ancorar essas trajetórias na realidade operacional, o capítulo inclui estudos de caso breves sobre inovação em desvinculação (debonding) e ligantes solúveis (GRST e Bostik), logística reversa e viabilização do reparo de baterias (DHL), células de bateria com materiais recuperados (Altilium e JLR) e sistemas padronizados de troca de baterias com integração à rede (ecossistema Choco-Swap da CATL). Em conjunto, esses exemplos mostram como a circularidade se concretiza quando design, operações e incentivos comerciais estão alinhados.



Projetar baterias de veículos elétricos para desmontagem, modularidade e rastreabilidade desbloqueia o potencial econômico de serviços de alto valor durante o uso e de caminhos de pós-uso

Fabricantes vêm, cada vez mais, projetando baterias que integram características como modularidade, padronização, rastreabilidade e diagnósticos, com o objetivo de facilitar o reparo, o reaproveitamento e a reciclagem no fim de vida. Sistemas modulares de packs de bateria, compostos por conjuntos de células removíveis com sensores de diagnóstico, permitem reparos mais direcionados, rápidos e acessíveis, evitando a substituição completa do pack e reduzindo o tempo de inatividade.

O design para desmontagem não apenas reduz custos de manutenção e geração de resíduos, como também aumenta a eficiência da recuperação de materiais, contribuindo para a redução do uso de recursos e do impacto ambiental. Em comparação com designs tradicionais, soluções modulares já demonstraram, em alguns casos, melhorar a reciclabilidade geral em 15% a 20%.⁵⁴

A padronização de componentes entre diferentes modelos, bem como o uso de fixações mecânicas (parafusos, porcas) em vez de uniões permanentes — permitindo intervenções automatizadas — são outras estratégias de design que podem aumentar ainda mais a vida útil das baterias. Quando combinadas com ferramentas de rastreabilidade, como blockchain ou passaportes digitais de produto, essas abordagens incentivam o reaproveitamento em aplicações de segunda vida e a adoção de modelos de negócio circulares, como troca de baterias ou leasing, abrindo novas fontes de receita além da venda inicial do veículo.

Embora o design para desmontagem ainda não seja prática comum na indústria de baterias, avanços tecnológicos e exigências regulatórias voltadas à economia circular tendem a acelerar significativamente sua adoção.

Benefícios:

- Designs modulares de baterias, em comparação com designs tradicionais, já demonstraram aumentar a reciclabilidade geral em 15% a 20%
- Embora o investimento inicial em design para desmontagem possa ser maior, ele gera diversos benefícios econômicos, como redução de custos de mão de obra, melhoria na recuperação de materiais, extensão da vida útil do produto por meio de reparos e upgrades, e maior conformidade regulatória
- O uso de características específicas de design (número de módulos e fixações, complexidade do design e acessibilidade) pode reduzir significativamente os custos de processamento no fim de vida — em até 75% por pack de bateria, dependendo da configuração adotada.⁵⁵

Estudo de caso:**Soluções de desvinculação (debonding) da GRST e da Bostik**

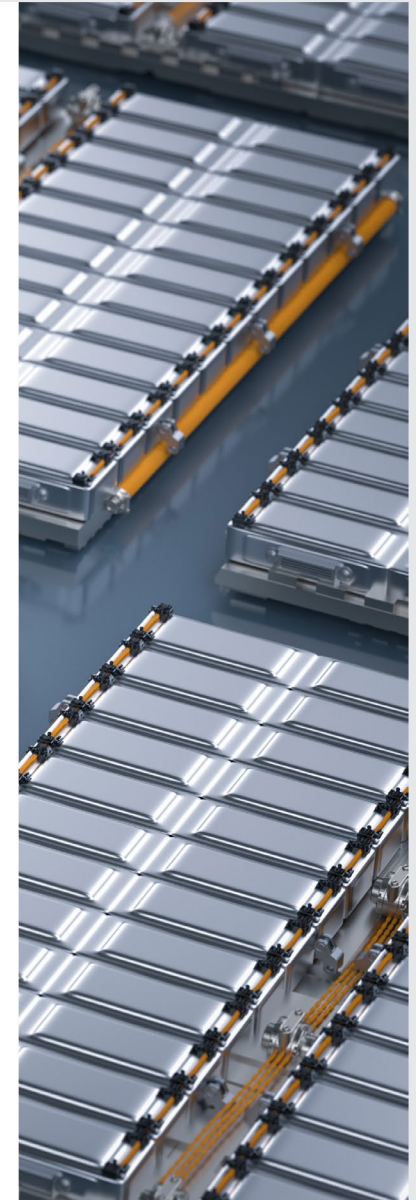
Tecnologias emergentes estão transformando as baterias de veículos elétricos e aumentando sua reciclabilidade ao simplificar a desmontagem por meio de soluções de desvinculação (debonding).

A GRST (Green, Renewable and Sustainable Technology) é uma empresa de tecnologia de baterias de íons de lítio especializada em ligantes (binders), um tipo de “cola” de alta tecnologia utilizada para fixar os materiais ativos aos eletrodos. A empresa utiliza materiais livres de PFAS e solúveis em água, projetados para facilitar o reparo e a reciclagem. Esses ligantes podem ser facilmente incorporados (drop-in) aos processos existentes de fabricação de baterias e são compatíveis com as principais químicas, sem impactar desempenho ou custo. Na fase de reciclagem, os ligantes da GRST podem ser dissolvidos em água reciclável, evitando a necessidade de processos térmicos, químicos ou de moagem mecânica exigidos por ligantes convencionais. Como resultado, a GRST afirma alcançar taxas de recuperação de massa negra (black mass) de alta pureza superiores a 99,9%, além de reduzir as emissões de carbono em até 90%. Essa abordagem elimina a necessidade de os recicladores lidarem com materiais fluorados à base de PFAS. Além de permitir a recuperação de minerais das baterias, os ligantes da GRST podem ser separados da massa negra e reciclados para uso em outras indústrias. Ao simplificar a desmontagem de baterias, maximizar a recuperação de minerais e minimizar o impacto ambiental, a tecnologia da GRST viabiliza a implementação eficaz de um sistema de ciclo fechado ao longo do ciclo de vida das baterias.

A Bostik, empresa global de adesivos pertencente ao grupo Arkema, também desenvolve soluções de união e desvinculação adaptadas para baterias de veículos elétricos. Os materiais de interface térmica da empresa — especialmente os gap fillers termicamente condutivos — são projetados para serem removíveis e reposicionáveis. Tratam-se de materiais não curáveis e livres de silicone, que mantêm a mesma viscosidade líquida ao longo de sua vida útil, aumentando a eficiência na desmontagem, além de melhorar a reparabilidade e a reciclabilidade.

Esses materiais também podem prolongar a vida útil das baterias por meio de uma gestão térmica de alto desempenho. Além disso, a Bostik lançou o Prep DB, um primer inovador de desmontagem voltado para a indústria automotiva. A solução garante forte adesão estrutural durante o uso, ao mesmo tempo em que permite uma separação limpa ativada por calor no fim de vida. Essa abordagem simplifica os processos de reparo e facilita a recuperação de materiais, aumentando a reciclabilidade e reduzindo resíduos.

Para mais informações, consulte os sites da GRST e da Bostik



Viabilizar o reparo de baterias de veículos elétricos oferece alto retorno econômico ao evitar substituições prematuras e reduzir significativamente custos e demanda por materiais

O reparo de baterias com falhas, danos ou degradação é essencial para estender sua vida útil, reduzindo a aposentadoria prematura e a necessidade de reciclagem, além de evitar emissões associadas à produção de novas baterias. Escalar o reparo envolve tanto desafios de conformidade e logística quanto de engenharia. As baterias de veículos elétricos são classificadas como cargas perigosas, e packs defeituosos ou danificados — que apresentam riscos de aquecimento, incêndio ou curto-circuito — são difíceis de transportar e manusear. Isso significa que triagem, descarga segura, embalagens em conformidade e rotas certificadas de logística reversa são pré-requisitos para viabilizar o reparo em escala. Estima-se que 92% dos módulos em packs de bateria que falham durante o período de garantia ainda sejam considerados funcionais,⁵⁶ o que evidencia o enorme desperdício de materiais quando baterias são substituídas prematuramente.

Globalmente, fabricantes do equipamento original (OEMs) e fabricantes de baterias vêm adotando modelos de negócio circulares que permitem reparar partes das baterias em nível de módulo ou célula, prolongando sua vida útil. Uma vez identificada uma falha ou dano, técnicos desses fabricantes podem realizar diagnósticos, reparar ou substituir componentes defeituosos e devolver a bateria ao usuário. Segundo algumas estimativas, a taxa de reparo de baterias com falha pode atingir 95% até 2030 (em comparação com 80% em 2019), com economia associada de USD 2 bilhões e redução de 2 Mt de emissões de CO₂.⁵⁷ Para os consumidores finais, esses serviços representam uma solução financeiramente mais vantajosa, pois prolongam a vida útil do veículo. Para OEMs e fabricantes de baterias, serviços de reparo de alta qualidade contribuem para fortalecer a reputação junto aos clientes e, quando combinados com modelos como BaaS, geram ganhos de eficiência ao permitir a extração de maior valor de cada bateria ao longo do tempo.

Benefícios:

- O reparo de baterias com falha prolonga a vida útil dos minerais críticos incorporados, aumentando a utilização de valor dos materiais
- O reparo de baterias com alto valor residual pode gerar economias de até USD 2 bilhões até 2030, além de oferecer soluções mais acessíveis aos consumidores
- O reparo de baterias consome significativamente menos energia do que a produção de novas baterias, resultando em uma redução direta nas emissões associadas de gases de efeito estufa.

Estudo de caso:**Serviços logísticos para baterias de veículos elétricos da DHL**

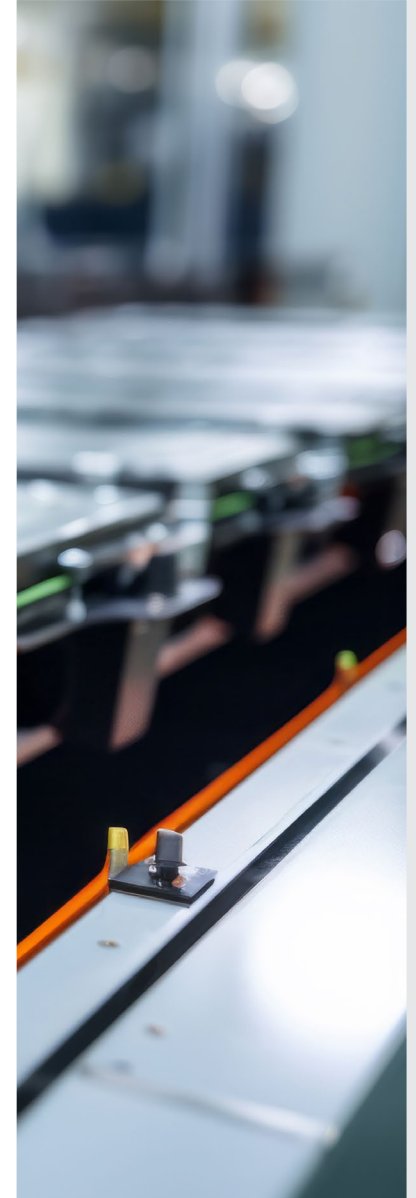
Uma economia circular para baterias de veículos elétricos requer serviços de transporte eficientes e infraestrutura de logística reversa, incluindo coleta, transporte e armazenamento de componentes com falha, danificados ou baterias em fim de vida. Atenta a essa tendência, a DHL reporta uma rede crescente de mais de 15 Centros de Excelência (CoEs) para veículos elétricos em todo o mundo, incluindo um centro especificamente voltado à logística circular de baterias na Europa, que oferece soluções integradas de ponta a ponta para o ciclo de vida pós-venda (aftermarket) das baterias.

Esses Centros de Excelência enfrentam desafios logísticos centrais relacionados às baterias de veículos elétricos. Como essas baterias são classificadas como cargas perigosas para transporte, a DHL apoia seus clientes no processo de certificação e na navegação pelos diversos requisitos de conformidade entre diferentes regiões. Para movimentações transfronteiriças, o diagnóstico e a classificação das baterias, bem como a gestão de volumes imprevisíveis, são realizados em instalações de armazenamento da rede da DHL, garantindo conformidade e otimizando as opções de transporte.

Em parceria com a Cox Automotive, a DHL oferece serviços de triagem e logística para reparo de baterias no Centro de Excelência do Reino Unido. A instalação conta com aproximadamente 3.250 m² dedicados ao reparo de baterias e tem capacidade para processar milhares de unidades por ano. Como parte da parceria, a DHL investiu mais de GBP 800.000 em um sistema de armazenamento de energia (Battery Energy Storage System - BESS), utilizado para descarregar baterias e recircular a energia de volta para a própria instalação. Além disso, a empresa assegura que baterias danificadas sejam descarregadas e armazenadas com segurança, preparando-as para reparo.

Por meio de logística especializada, expertise regulatória e soluções orientadas à economia circular, a DHL demonstra como é possível apoiar de forma eficiente modelos de negócio circulares para baterias de veículos elétricos.

Para mais informações, consulte o site da DHL.



Aumentar a escala e a eficiência da reciclagem de baterias de veículos elétricos é fundamental para reinserir minerais críticos na economia após as baterias esgotarem outras opções de uso pós-vida.

Avanços significativos nas tecnologias de reciclagem de baterias estão melhorando as taxas de recuperação de materiais críticos, como lítio, cobalto e níquel. Inovações como pirometalurgia e hidrometalurgia, extração eletroquímica e recuperação de grafite aumentam a eficiência dos processos de reciclagem. As oportunidades são expressivas: sob condições ideais, uma análise de fluxo de materiais estima que a reciclagem de baterias em fim de vida poderia suprir, globalmente, 60% do cobalto, 53% do lítio, 57% do manganês e 53% do níquel necessários para baterias de íons de lítio até 2040.⁵⁸ Além disso, minerais reciclados, como níquel, cobalto e lítio, emitem aproximadamente 80% menos gases de efeito estufa do que materiais virgens provenientes da mineração.⁵⁹

À medida que os teores dos minérios naturalmente diminuem, o custo de extração da mesma quantidade de minerais tende a aumentar ao longo do tempo. Sem avanços na reciclagem, os investimentos totais em mineração necessários para alcançar emissões líquidas zero até 2050 precisariam ser cerca de 30% maiores, intensificando ainda mais o desafio de mobilizar o financiamento necessário.⁶⁰ Por outro lado, a expansão da reciclagem de baterias oferece vantagens socioeconômicas relevantes — desde a mitigação da volatilidade de preços e do risco de abastecimento até a criação de empregos qualificados em âmbito doméstico. Adotando uma abordagem holística (considerando impacto econômico, geração de empregos, redução de emissões, uso de água e terra), a reciclagem de baterias poderia gerar um valor líquido entre USD 11,3 bilhões e USD 40,3 bilhões até 2040 — um retorno sobre investimento significativamente superior ao da mineração convencional, segundo estudo focado nos Estados Unidos.⁶¹

Apesar dessas vantagens, a expansão da reciclagem de baterias entre regiões ainda é limitada pela restrita disponibilidade de fornecimento (feedstock), uma vez que a maioria das baterias ainda está em seu primeiro ciclo de uso. Além disso, baterias podem ser deslocadas para outras regiões ao atingirem o fim de sua vida útil, desviando materiais das instalações locais de reciclagem. Diversas fontes apontam restrições de curto prazo, já que sucata de fabricação deve continuar sendo a principal fonte de material até 2030. Ao mesmo tempo, a rápida evolução das químicas de baterias dificulta decisões de investimento, ao aumentar a incerteza sobre a composição e os volumes futuros de

material disponível. Esses desafios são agravados por designs de baterias que priorizam desempenho em detrimento da modularidade, tornando a desmontagem e a reciclagem mais complexas, além da limitada visibilidade ao longo da cadeia de valor enfrentada por recicladores a jusante, o que compromete sua capacidade de prever volumes de baterias em fim de vida.

No longo prazo, o desenvolvimento de uma cadeia de valor de reciclagem eficiente e competitiva exigirá esforços abrangentes para maximizar taxas de coleta, promover designs que facilitem desmontagem e reciclagem, garantir que processos industriais se adaptem às mudanças nas químicas das baterias e aumentar a visibilidade ao longo de toda a cadeia.

Em apoio a esses esforços, diversos países estão criando condições para um ecossistema robusto de reciclagem de baterias para veículos elétricos, com o objetivo de fortalecer a resiliência da cadeia de suprimento e reduzir emissões associadas ao uso de matérias-primas. O novo Regulamento de Baterias da União Europeia é um importante motor regulatório, estabelecendo requisitos mínimos de conteúdo reciclado (16% para cobalto, 85% para chumbo, 6% para lítio e 6% para níquel a partir de 2031), metas ambiciosas de recuperação de materiais (por exemplo, 80% para lítio até 2031) e a implementação de “passaportes de baterias” digitais para maior transparência.⁶² Em outros contextos, o Reino Unido também promove a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) e estabelece metas elevadas de reciclagem (95% dos packs de baterias de veículos elétricos até 2035),⁶³ enquanto países como Estados Unidos e China vêm implementando políticas focadas em REP, coleta e recuperação de materiais.

Benefícios:

- A reciclagem ajuda a reduzir a dependência de recursos virgens e fortalece a cadeia de suprimento de baterias para veículos elétricos, ao criar uma fonte mais resiliente e em circuito fechado de materiais críticos
- A indústria de reciclagem já começa a contribuir para a redução dos custos de veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia
- A própria indústria de reciclagem gera novas oportunidades econômicas e empregos nas etapas de coleta, processamento e manufatura

Estudo de caso:**Parceria entre Altilium e Jaguar Land Rover em baterias com materiais recuperados**

A Altilium, empresa britânica de tecnologia limpa, e a Jaguar Land Rover (JLR) apresentaram as primeiras células de baterias para veículos elétricos do Reino Unido produzidas a partir de materiais catódicos ativos recuperados (Cathode Active Materials – CAM) na Cenex Expo 2025.

Utilizando o processo EcoCathode da Altilium, as novas células tipo pouch multicamadas NMC 811, de padrão automotivo, foram projetadas e fabricadas com sucesso no UK Battery Industrialisation Centre (UKBIC), empregando CAM (incluindo cobalto, lítio, níquel e manganês) recuperados de baterias de veículos elétricos em fim de vida. Segundo as empresas, a proporção de CAM recuperado nas células atende às metas do Regulamento de Baterias da União Europeia para 2036 em termos de conteúdo mínimo reciclado (26% de cobalto, 12% de lítio e 15% de níquel).

Os testes eletroquímicos iniciais indicam que as células produzidas com materiais recuperados apresentam desempenho comparável ao daquelas fabricadas com materiais virgens, representando um avanço importante na validação da adequação desses materiais para aplicações de alto desempenho em veículos elétricos.

Avaliações independentes mostraram que, além de alcançar qualidade comparável, as células de baterias produzidas com materiais recuperados também apresentam reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa. Uma Análise de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA) independente conduzida pela Minviro, com base no processo da Altilium e no design e fabricação das células no UKBIC, concluiu que células pouch NMC 811 utilizando 100% de CAM recuperado podem reduzir as emissões em cerca de 32% em comparação com células produzidas com materiais virgens. Além dos benefícios em emissões, a avaliação também indicou que essas células podem resultar em uma redução de 30% na formação de material particulado, 58% menos ecotoxicidade em água doce e 38% menos impactos associados ao uso de recursos minerais e metálicos.

Demonstrar que materiais recuperados podem oferecer desempenho de alta qualidade com impacto ambiental significativamente menor não apenas contribui para o cumprimento de requisitos regulatórios, mas também abre caminho para cadeias de suprimento de baterias para veículos elétricos mais sustentáveis e resilientes, tornando esse modelo uma referência promissora para futuras iniciativas de reciclagem.

Para mais informações, consulte os sites da Altilium e da JLR.



Modelos BaaS aumentam a taxa de utilização das baterias de veículos elétricos, geram valor econômico e reduzem o desperdício estrutural de baterias ociosas e sujeitas à degradação ao longo do tempo

Modelos de negócio como o Battery-as-a-Service (BaaS) — que incluem leasing, aluguel e troca de baterias — transferem a propriedade, o monitoramento de saúde, a eficiência e a gestão de fim de vida das baterias dos usuários para os provedores. Cada vez mais, fabricantes de veículos estão adotando modelos BaaS, nos quais os usuários compram o veículo, mas assinam, alugam ou pagam pelo uso da capacidade da bateria. Esse modelo reduz o custo inicial de aquisição dos veículos elétricos para os consumidores, ao mesmo tempo em que oferece opções flexíveis de upgrade e acesso contínuo a baterias bem mantidas. Ao manter a propriedade e o controle sobre um grande volume de baterias, montadoras e fabricantes são incentivados a adotar designs que permitam uso prolongado, upgrades, reparo e reaproveitamento, além de facilitar a recuperação eficiente de materiais no fim de vida, sem incorrer em custos adicionais de coleta.

Modelos BaaS também viabilizam a implantação de estações de troca de baterias, nas quais os usuários podem substituir rapidamente suas baterias, ao mesmo tempo em que permitem a gestão completa do ciclo de vida — do carregamento e manutenção até a reutilização e reciclagem. Para garantir eficiência nessas trocas, designs padronizados de baterias vêm se tornando cada vez mais comuns. Além disso, estações de troca podem funcionar como unidades distribuídas de armazenamento de energia. Quando conectadas à rede, possibilitam carregamento inteligente em horários de baixa demanda, reduzindo custos, além de fornecer suporte para gestão de picos de carga e regulação de frequência (ver estudo de caso da CATL). Como solução para reduzir a “ansiedade de autonomia” e o tempo de recarga, a infraestrutura de troca de baterias está em rápida expansão — especialmente na Ásia — com projeção de crescimento de USD 1,46 bilhão em 2025 para USD 22,72 bilhões em 2035, com taxa composta anual (CAGR) de 31,5%.⁶⁴

Benefícios:

- Modelos BaaS incentivam provedores a projetar baterias alinhadas à economia circular, prolongando sua vida útil e desempenho. Por meio de monitoramento, manutenção e coleta centralizados, esses modelos aumentam a eficiência no uso de recursos
- Modelos BaaS criam novas oportunidades de negócio para provedores de baterias, montadoras e serviços financeiros
- Ao dissociar a compra da bateria da do veículo, fabricantes podem reduzir o custo inicial de aquisição (em até 30% a 40%),⁶⁵ Modelos BaaS incentivam provedores a projetar baterias alinhadas à economia circular, prolongando sua vida útil e desempenho. Por meio de monitoramento, manutenção e coleta centralizados, esses modelos aumentam a eficiência no uso de recursos
- Modelos BaaS criam novas oportunidades de negócio para provedores de baterias, montadoras e serviços financeiros
- Ao dissociar a compra da bateria da do veículo, fabricantes podem reduzir o custo inicial de aquisição (em até 30% a 40%)

Modelos MaaS permitem que empresas de mineração e processamento gerem maiores retornos econômicos e repassem ganhos de eficiência ao longo da cadeia de valor

No modelo Material-as-a-Service (MaaS), empresas de mineração alugam os minerais extraídos para atores a jusante, mantendo a propriedade do material ao longo de todo o seu ciclo de vida. Isso rompe com a lógica de uso único de matérias-primas e promove sua circulação contínua. O leasing de materiais amplia oportunidades de negócio para empresas de mineração, pois acordos de serviço de longo prazo geram fluxos de receita recorrentes — enquanto o produto permanece em uso — em vez de vendas pontuais. O MaaS também pode gerar receita para recicladores e reprocessadores, que podem atuar como parceiros contratados de recuperação, remunerados por meio de taxas de serviço (tolling), tarifas operacionais ou participação nas receitas provenientes dos materiais recuperados. De forma geral, o MaaS pressupõe rastreabilidade dos ativos e design circular que facilite a desmontagem das baterias, sua coleta e a recuperação de minerais.

Ao viabilizar ciclos de materiais, o MaaS não apenas contribui para o desenvolvimento de uma fonte secundária de suprimento em nível nacional ou regional, como também incentiva o fortalecimento de indústrias locais de processamento, remanufatura e reciclagem nos países produtores de minerais. Isso pode impulsionar a diversificação econômica e a criação de empregos qualificados. Pela própria natureza contratual do MaaS, os participantes da cadeia tendem a aderir a princípios de design da economia circular (como Design for Disassembly – DfD e extensão da vida útil) e a padrões mais elevados de desempenho ambiental, social e de governança (ESG). Modelos BaaS e MaaS têm potencial para se reforçarem mutuamente, mas isso exige um desenho comercial intencional e colaboração entre os atores. Ao adotar uma perspectiva de cadeia de valor, é fundamental compreender como esses modelos emergentes interagem entre si e como o setor pode ser mobilizado para explorar soluções mutuamente benéficas.

Benefícios:

- Modelos MaaS fortalecem a circulação de minerais críticos, garantindo que os materiais alugados tenham destinos definidos ao final da vida útil das baterias, aumentando significativamente sua reutilização e reciclabilidade
- Ciclos fechados de minerais críticos em mercados regionais e domésticos podem reduzir a vulnerabilidade das cadeias de suprimento
- Por meio do MaaS, países produtores podem desenvolver indústrias locais além da simples exportação de minerais, deslocando o foco da extração para a gestão de materiais e criando fluxos de receita diversificados, além de fomentar a geração de empregos qualificados em áreas como gestão de dados, logística e aplicações de segunda vida.

Modelos de negócio de segunda vida mantêm as baterias em uso mesmo quando já não cumprem sua função primária

O reaproveitamento de baterias usadas de veículos elétricos em aplicações menos exigentes — como armazenamento estacionário de energia, sistemas de backup e estabilização da rede — cria novos fluxos de valor e estende a vida útil das baterias, mantendo os materiais em uso e reduzindo a geração de resíduos. Entre os principais modelos estão a revenda direta, programas de leasing de baterias e parcerias estratégicas entre os setores de energia e automotivo. Ao vender baterias usadas para empresas de reaproveitamento ou usuários finais (por exemplo, empresas de armazenamento de energia), fabricantes podem diluir o custo da bateria ao longo de um período mais longo de geração de receita e reduzir custos de gestão de resíduos. A utilização dessas baterias em aplicações de segunda vida também pode contribuir para a estabilização da rede elétrica em regiões onde a infraestrutura ainda é limitada, ampliando o acesso à energia de forma mais confiável e a menor custo para pessoas e empresas.

Plataformas de mercado e soluções B2B estão surgindo para viabilizar o reaproveitamento e a reutilização de baterias em fim de vida, conectando OEMs automotivos, integradores de segunda vida e recicladores, com o objetivo de maximizar o valor ao longo do ciclo de vida e garantir o manejo responsável. Alternativamente, ao manter a propriedade dos produtos e materiais por meio de modelos como leasing e aluguel, OEMs podem atuar como operadores de ativos ou estabelecer parcerias com empresas do setor energético, capturando receitas adicionais associadas à segunda vida das baterias. À medida que os mercados de segunda vida amadurecem, montadoras e fabricantes de baterias tendem a enxergar esses modelos como oportunidades estratégicas desde o início — retendo a propriedade de ativos valiosos, capturando novas fontes de receita e aumentando a eficiência no uso de recursos ao longo de todo o ciclo de vida das baterias. Projeções de mercado indicam que esse setor pode alcançar cerca de USD 7 bilhões até 2033.⁶⁶

Benefícios:

- Modelos de negócio que promovem a segunda vida de baterias são fundamentais para reduzir resíduos e a demanda por novos minerais
- Montadoras e provedores de mobilidade podem gerar receita adicional ao desenvolver um mercado robusto para baterias de segunda vida
- A extensão da vida útil por meio de aplicações de segunda vida reduz significativamente a pegada de carbono das baterias (por unidade de capacidade ao longo do tempo), de forma mais expressiva do que cenários de reciclagem imediata.⁶⁷

Estudo de caso: **Ecosistema Choco-Swap da CATL**

A CATL, em cooperação com quase 100 parceiros, lançou um ecossistema que combina um modelo BaaS com baterias padronizadas e sistemas de manutenção, além de infraestrutura de troca integrada à rede elétrica na China. Esse modelo inovador de negócio circular para gestão de energia em veículos elétricos gera benefícios para consumidores, montadoras e para o sistema energético.

Modelo BaaS:

Ao mesmo tempo em que permite a compra e recompra de baterias, o sistema “Choco-Swap” viabiliza o desenvolvimento de um modelo BaaS. Nesse modelo, os usuários podem adquirir um veículo elétrico sem o seu componente mais caro — a bateria — e pagar uma taxa mensal pelo uso da bateria e pelos serviços de troca. Os usuários podem optar entre carregar, trocar, alugar ou fazer upgrade das baterias conforme a necessidade. A inclusão de inspeções como parte do serviço contribui para manter as baterias em alto nível de desempenho, prolongando sua vida útil. Nesse modelo, a receita está vinculada ao uso, criando incentivos para maximizar o tempo em que baterias e componentes permanecem produtivos.

Manutenção e padronização:

A CATL utiliza o maior banco de dados de baterias do mundo para monitorar, em tempo real, o desempenho e a degradação de cada célula intercambiável. Segundo a empresa, essa abordagem orientada por dados permite uso otimizado e manutenção preditiva, resultando em um aumento estimado de 30% na vida útil das baterias. Além disso, a introdução de packs de bateria modulares e padronizados, compatíveis com diversos modelos de veículos, favorece a ampla adoção da infraestrutura de troca. Com a gestão centralizada das baterias, a coleta no

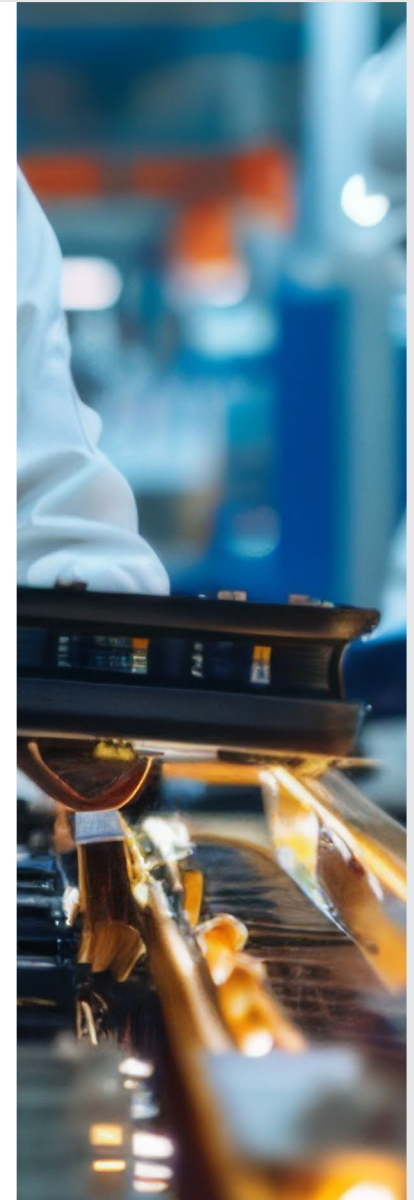
fim de vida é facilitada, já que as baterias usadas podem ser recuperadas em grande escala nas estações, em vez de depender de coleta individual — um passo fundamental para a viabilização de ciclos fechados de materiais.

Armazenamento de energia distribuído:

A CATL anunciou a implantação de 30.000 estações de troca de baterias na China, em parceria com outros atores, a partir de 2025. Essas estações não apenas viabilizam a troca de baterias, como também integram funções de carregamento e armazenamento de energia, atuando como unidades distribuídas de armazenamento. Cada estação, conectada por uma plataforma de despacho baseada em nuvem, interage com a rede elétrica, permitindo funcionalidades de bateria para rede (Battery-to-Grid - B2G). As estações realizam carregamento inteligente em horários de baixa demanda, reduzindo custos, e respondem em tempo real às variações de carga da rede. A CATL afirma que o sistema pode armazenar coletivamente até 33,6 milhões de kWh, além de mais 1,12 bilhão de kWh armazenados nos veículos — formando uma rede distribuída robusta que contribui para a resiliência da rede e a integração de energias renováveis nas regiões onde opera.

Ao alinhar parceiros industriais em torno de um modelo comum, o ecossistema Choco-Swap da CATL aumenta a conveniência para os usuários, fortalece a segurança de abastecimento para fabricantes e contribui para a construção de um sistema de mobilidade e energia circular, orientado por dados e eficiente no uso de materiais.

Para mais informações, consulte o site da CATL.



Dimensionar adequadamente as baterias (rightsizing) e aumentar a densidade energética reduz o desperdício estrutural de capacidade ociosa e os custos de materiais

Aumentar a densidade energética das baterias e otimizar sua capacidade de acordo com o uso pretendido pode ajudar a reduzir a demanda por minerais críticos. Por meio de inovações em química de baterias e melhorias de design, a densidade energética tem aumentado significativamente nos últimos anos, gerando ganhos de eficiência material e redução de custos. Por exemplo, um estudo mostrou que, entre 2015 e 2019, a demanda projetada de minerais por bateria para 2030 caiu em mais de 3,6 vezes para o cobalto e 1,4 vez para o lítio.⁶⁸ Mantidas as atuais taxas de inovação, a densidade energética das baterias deve aumentar mais de 25% até 2050,⁶⁹ com implicações adicionais para a demanda por materiais.

Embora a densidade energética tenha avançado significativamente desde a introdução das baterias no mercado, o tamanho médio das baterias também tem aumentado, à medida que fabricantes buscam ampliar a autonomia dos veículos e atender à demanda por modelos maiores, como SUVs e picapes.⁷⁰ Essa tendência, impulsionada pela ansiedade de autonomia dos consumidores, pode comprometer os ganhos de eficiência, ao mesmo tempo em que aumenta a demanda por minerais. Projetar baterias com tamanho adequado à sua função — adaptando a autonomia às necessidades reais de deslocamento de passageiros e transporte de cargas, em vez de adotar um modelo padronizado de baterias grandes — pode reduzir custos e demanda por materiais. Fabricantes podem facilitar esse dimensionamento adequado ao desenvolver soluções alinhadas a diferentes requisitos de autonomia e capacidade de passageiros. Por exemplo, em frotas de transporte compartilhado, como táxis, serviços de car-sharing e mobilidade sob demanda, altas taxas de uso e

maiores necessidades de autonomia justificam baterias de alto desempenho. Por outro lado, em cidades compactas e densamente povoadas, onde as distâncias de deslocamento são menores — na Europa, por exemplo, a média diária é de apenas 12,4 km por pessoa⁷¹ — baterias menores são mais adequadas. elétricos com menor autonomia serão importantes para reduzir a ansiedade de autonomia e ajustar expectativas. Um estudo estima que reverter a tendência atual de aumento do tamanho das baterias teria o impacto material mais significativo e imediato — uma redução de 20% no tamanho médio das baterias poderia diminuir a demanda global anual por baterias e minerais em 28% até 2035 e 27% até 2050.⁷²

Benefícios:

- Otimizar a eficiência e o dimensionamento das baterias pode reduzir pela metade a demanda por minerais até 2050.⁷³
- Para motoristas urbanos e rurais, dobrar o tamanho da bateria pode aumentar o custo total de propriedade entre 20% e 23%, indicando que o dimensionamento adequado gera economias substanciais.⁷⁴
- O dimensionamento adequado das baterias se integra a um sistema de mobilidade circular, que busca aumentar a utilização de cada veículo por meio de serviços sob demanda, projetar veículos de acordo com seu uso específico e distribuir deslocamentos entre diferentes modais, incluindo transporte público, caminhada e bicicleta.

Sistemas de transporte sob demanda, habilitados digitalmente, podem maximizar os quilômetros de mobilidade entregues por cada bateria de veículo elétrico ao longo de sua vida útil

Oferecer um sistema de transporte multimodal, sob demanda, digitalmente integrado e de zero emissões é um elemento central da economia circular nas cidades. Esse tipo de sistema urbano utilizaria tecnologias digitais para integrar diferentes modos de transporte, permitindo que as pessoas transitem entre opções individuais, compartilhadas e públicas dentro de um sistema otimizado. Ele seria apoiado por uma plataforma digital que possibilita o planejamento de viagens e um sistema de pagamento único, criando uma experiência mais conveniente para o usuário. Esse modelo também contribui para reduzir a ansiedade de autonomia e a consequente demanda por baterias maiores, ao permitir o acesso a diferentes tipos de veículos elétricos conforme a necessidade. O aumento resultante nas taxas de utilização dos veículos levaria à redução do número total de veículos em circulação e à diminuição do congestionamento. Além disso, liberaria áreas urbanas significativas, que poderiam ser destinadas a espaços verdes, parques, habitação ou atividades comerciais, gerando benefícios relevantes para a natureza, o clima e a sociedade — conforme destacado no relatório Building Prosperity da Fundação Ellen MacArthur.⁷⁵

Adicionalmente, considerando que a maioria dos carros particulares permanece estacionada cerca de 90% do tempo,⁷⁶ a mobilidade sob demanda pode aumentar a produtividade material das baterias, maximizando o uso dos recursos incorporados. Outros elementos-chave no desenho de sistemas de mobilidade urbana incluem: desenvolvimento de cidades compactas para maior eficiência nos deslocamentos; infraestrutura de recarga e estações de troca de baterias; e soluções baseadas em dados para otimização dos sistemas de mobilidade.

Benefícios:

- Um sistema de transporte menos dependente de veículos individuais pode reduzir a demanda global por minerais em 6% a 8% até 2035 e em 17% até 2050.⁷⁷
- Um sistema de mobilidade compartilhada na Europa poderia reduzir a demanda por matérias-primas entre 26% e 54% até 2050.⁷⁸
- Opções de mobilidade sob demanda oferecem economias significativas para os domicílios e beneficiam de forma desproporcional grupos mais vulneráveis.

Sistemas V2G ampliam os serviços de armazenamento de energia oferecidos pelas baterias de veículos elétricos ao longo de sua vida útil, desempenhando um papel relevante em redes elétricas baseadas em fontes renováveis

Por meio da tecnologia V2G, baterias de veículos elétricos podem devolver energia à rede durante períodos de pico de demanda, transformando cada veículo em uma unidade móvel de armazenamento. Em escala, isso cria um sistema energético distribuído que aumenta a estabilidade e a resiliência da rede, ao mesmo tempo em que reduz os custos de eletricidade para os usuários. Quando milhares de veículos elétricos operam de forma integrada, eles podem fornecer serviços de flexibilidade ao sistema elétrico, reduzindo a necessidade de investimentos em infraestrutura cara e em grandes instalações centralizadas de armazenamento. Isso também evita os custos materiais e ambientais associados à construção de novas redes de transmissão e distribuição de alta capacidade. Um estudo sugere que equipar apenas 50% dos veículos elétricos com tecnologia V2G poderia reduzir a demanda total por materiais primários para armazenamento estacionário na União Europeia em até 7,5% entre 2020 e 2050.⁷⁹ Medidas desse tipo podem mitigar riscos geopolíticos e aumentar a segurança no fornecimento de materiais. A China já anunciou 30 projetos-piloto de V2G em nove cidades, evidenciando o potencial prático dessa solução. Esses benefícios podem ser particularmente relevantes em regiões com infraestrutura de rede elétrica ainda em desenvolvimento, contribuindo para maior resiliência dos sistemas energéticos, especialmente no Sul Global.

Benefits:

- Soluções V2G ajudam a atender às necessidades de armazenamento de energia, evitando a demanda por materiais associada à construção de novas infraestruturas de transmissão e distribuição
- Provedores de energia evitam investimentos elevados em infraestrutura, enquanto domicílios e frotas podem gerar nova renda ao carregar veículos em horários de baixa demanda e vender energia à rede nos períodos de pico
- Ao reduzir a necessidade de usinas fósseis de ponta para atender picos de demanda, soluções V2G contribuem para evitar emissões adicionais de gases de efeito estufa.

Desbloqueando as cinco áreas de destaque da economia circular: onde agir e quem deve liderar

Cadeia de valor de baterias de veículos elétricos

5 pontos positivos	Projetar baterias para a circularidade, não para o descarte	Reformular o serviço de baterias em sistemas otimizados de energia e mobilidade	Escalar modelos de negócios circulares	Desenvolver e co-investir em infraestrutura circular regional	Fazer o sistema operacional circular funcionar
<p>Matérias-primas e cadeia de suprimentos upstream</p>			<p>Testar e escalar modelos de MaaS que mantenham os materiais em ciclos previsíveis e incentivem a recuperação de alta qualidade.</p>	<p>Co-investir em logística reversa e infraestrutura de reciclagem para viabilizar o teste e a expansão de modelos de negócios circulares, como MaaS.</p>	<p>Informar formuladores de políticas públicas sobre as condições necessárias para escalar modelos de negócios circulares</p>
<p>Fabricação de baterias e veículos</p>	<p>Estabelecer padrões de design circular (por exemplo, em torno de modularidade, fixadores interoperáveis, soluções de descolagem e diagnósticos integrados).</p> <p>Cocriar produtos e componentes com atores a jusante (reparadores, remanufaturadores, recicladores) para permitir ciclos eficazes ao final da primeira vida útil.</p> <p>Incluir critérios de design circular nos requisitos para fornecedores.</p>	<p>Dimensionar adequadamente as baterias desde o design, por meio do planejamento de produto e da arquitetura do veículo.</p> <p>Implementar modelos de negócios circulares (assinatura, troca) para maximizar a produtividade mineral por quilômetro rodado.</p> <p>Engajar-se com outros atores do sistema, como operadores de rede elétrica e cidades, para planejar a implementação eficaz de soluções de mobilidade otimizadas.</p>	<p>Escalar modelos de BaaS e baseados em serviços, incluindo troca de baterias e serviços integrados de mobilidade e energia.</p> <p>Viabilizar mercados de segunda vida ao redirecionar baterias de veículos elétricos para aplicações de segunda utilização, como armazenamento estacionário de energia.</p> <p>Investir na capacitação e formação para viabilizar novos modelos de negócios baseados em serviços, quando relevante.</p>	<p>Co-investir em hubs regionais de recirculação com atores ao longo da cadeia de valor para compartilhar riscos, expertise e infraestrutura. Considerar o alinhamento com outros que utilizam químicas de baterias semelhantes para melhorar a eficiência e a viabilidade econômica.</p> <p>Desenvolver capacidade regional ponta a ponta (coleta, triagem, reciclagem, reprocessamento) em escala, quando relevante.</p> <p>Formar alianças de compradores para garantir demanda por minerais críticos circulares.</p>	<p>Informar formuladores de políticas públicas sobre as condições necessárias para escalar a reparação, a remanufatura e a reciclagem</p>
<p>Fase de uso, extensão da vida útil e reciclagem</p>	<p>Fornecer feedback a fabricantes de baterias e veículos sobre barreiras de design à reparação, remanufatura e reciclagem.</p> <p>Colaborar com atores da cadeia de valor no desenvolvimento de diretrizes de design que possibilitem uma reparação, remanufatura e reciclagem mais eficazes.</p>	<p>Trabalhar com outros atores do sistema para integrar de forma fluida atividades de ciclo interno, como reparo, aos sistemas de mobilidade, viabilizando a adoção de soluções de mobilidade otimizadas.</p>	<p>Experimentar modelos de negócios de “gestão de materiais” para gerar mais valor do que a venda pontual de materiais reciclados.</p>	<p>Desenvolver serviços especializados e em conformidade para o transporte de baterias usadas e em fim de vida, dentro e entre regiões.</p>	<p>Informar formuladores de políticas públicas sobre as condições necessárias para ampliar a reparação, a remanufatura e a reciclagem</p>

5 pontos positivos



Projetar baterias para a circularidade, não para o descarte

Reformular o serviço de baterias em sistemas otimizados de energia e mobilidade

Escalar modelos de negócios circulares

Desenvolver e co-investir em infraestrutura circular regional

Fazer o sistema operacional circular funcionar

67

Integração dos sistemas de energia e mobilidade

Desenvolver marcos regulatórios e tarifas que viabilizem o V2G e serviços relacionados. Engajar-se com reguladores, operadores de pontos de recarga e cidades para desenvolver a infraestrutura de carregamento e ampliar o uso de baterias de veículos elétricos.

Estabelecer parcerias com atores da cadeia de suprimentos, gestores de ativos e investidores para aplicações de segunda vida e planejamento da rede elétrica.

Finanças e alocação de capital

Alinhar decisões de investimento com métricas de intensidade material e de utilização para reduzir a demanda por minerais críticos em mobilidade e armazenamento

Desenhar instrumentos para reconhecer o valor dos ativos das baterias e dos materiais ao longo de múltiplos ciclos de vida.

Implementar mecanismos de financiamento combinado e instrumentos de compartilhamento de riscos para mobilizar investimentos públicos e privados em infraestrutura de coleta, diagnóstico, remanufatura e reciclagem de alta qualidade.

Governança, normas e coordenação

Criar padrões e regulamentações para durabilidade, reparabilidade, reciclabilidade e disponibilização de dados. Criar os incentivos econômicos necessários para estimular a adoção de baterias de veículos elétricos projetadas com insumos circulares e para recirculação.

Apoiar o desenvolvimento de serviços de mobilidade compartilhada, redes de carregamento e transporte multimodal para promover o dimensionamento adequado dos veículos e comunicar seus benefícios. Exigir que operadores de pontos de recarga aumentem a interoperabilidade entre baterias e infraestruturas de carregamento e implementem carregadores bidirecionais. Introduzir precificação variável (por exemplo, taxas de estacionamento com base no peso da bateria e do veículo). Revisar regras de compras públicas para criar sinais de demanda para a adoção de soluções circulares.

Fortalecer a colaboração transfronteiriça e alinhar regras sobre a classificação de fim de vida e o transporte de baterias para criar um mercado de segunda vida e facilitar a movimentação de componentes e minerais em fim de vida.

Oferecer marcos regulatórios favoráveis, instrumentos de mitigação de risco e financiamento público para catalisar o investimento privado, especialmente em economias emergentes e em desenvolvimento, a fim de construir infraestrutura regional de coleta, triagem, reciclagem e processamento. Desenvolver marcos de transparência e rastreabilidade para gerar segurança sobre os fluxos projetados de materiais e reduzir o risco dos investimentos nas regiões. Alinhar regras de transporte transfronteiriço e incentivos de políticas públicas para viabilizar a movimentação eficiente e a recirculação de materiais de baterias (reparo, segunda vida, reciclagem), apoiando o desenvolvimento de capacidade local/regional onde isso agregue valor.

Definir requisitos comuns de dados, modelos de governança e mecanismos de garantia para passaportes de baterias e ferramentas de rastreabilidade, assegurando a adoção global entre todos os provedores.

Garantir que os dados relevantes sejam compartilhados ao longo da cadeia de valor (dentro de estruturas de governança) para viabilizar a recirculação eficiente das baterias.

Participar de projetos-piloto para orientar o planejamento de infraestrutura e o desenho de políticas públicas.

<p>1 BloombergNEF, Perspectivas para Veículos Elétricos 2025 (2025)</p> <p>2 Tamanho do setor automotivo deve atingir US\$ 6.678,28 bilhões até 2032, Fintech Futures (2024)</p> <p>3 Fortune Business Insights, tamanho do mercado de veículos elétricos (EV), participação e análise do setor e previsão regional, 2025-2032 (2025)</p> <p>4 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air ... Please! (2024)</p> <p>5 Agência Internacional de Energia, Global EV Outlook 2025 (2025)</p> <p>6 Agência Internacional de Energia, World Energy Outlook 2025 (2025)</p> <p>7 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Centro de Monitoramento da Conservação Mundial, Critical Transitions: Circularity, equity, and responsibility in the quest for energy transition minerals (2024)</p> <p>8 Agência Internacional de Energia, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (2021)</p> <p>9 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Centro de Monitoramento da Conservação Mundial, Critical Transitions: Circularity, equity, and responsibility in the quest for energy transition minerals (2024)</p> <p>10 Agência Internacional de Energia, Global Critical Minerals Outlook 2025 (2025)</p> <p>11 Agência Internacional de Energia, Recycling of Critical Minerals (2024)</p> <p>12 <i>ibid.</i></p> <p>13 Lamb, I. P., et al., Global threats of extractive industries to vertebrate biodiversity, <i>Current Biology</i> (2024)</p> <p>14 Stanimirova, R., et al., Mining Is Increasingly Pushing into Critical Rainforests and Protected Areas, World Resources Institute (2024)</p> <p>15 World Wildlife Fund, Extracted Forests: Unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation (2023)</p>	<p>16 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e GRID-Arendal, Mine Tailings Storage: Safety Is no Accident (A segurança não é um acidente) (2017)</p> <p>17 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Painel Internacional de Recursos, Global Resources Outlook 2024 (2024)</p> <p>18 Agência Internacional de Energia, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions: Mineral Requirements for Clean Energy Transitions (Requisitos minerais para transições de energia limpa) (2021)</p> <p>19 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Centro de Monitoramento da Conservação Mundial, Critical Transitions: Circularity, equity, and responsibility in the quest for energy transition minerals (2024)</p> <p>20 Gaines, L., et al., Tracking flows of End-of-Life Battery Materials and Manufacturing Scrap, Batteries (2023)</p> <p>21 Gong, W. T., et al., Capturing potential social risks along the global supply chains for NCM batteries manufactured in China, Sustainable Production and Consumption (2025)</p> <p>22 Domingues, A. M., et al., Lifecycle social impacts of lithium-ion batteries: Consequences and future research agenda for a safe and just transition (Consequências e agenda de pesquisa futura para uma transição segura e justa), Energy Research & Social Science (2024)</p> <p>23 Mancini, L. e Sala, S., Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks, Resources Policy (2018)</p> <p>24 De Haes S. e Brink H., Social impacts of mining critical raw materials: Challenges and entry points for governance, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency (2025)</p> <p>25 Organização Internacional do Trabalho, The Global Impact of e-waste: Addressing the challenge (2012)</p> <p>26 Aguilar Lopez, F., et al., On the potential of vehicle-to-grid and second-life batteries to provide energy and material security, Nature Communications (2024)</p> <p>27 Agência Internacional de Energia, Global EV Outlook 2025 (2025)</p> <p>28 Yale Environment 360, More Than Half of Commutes Globally Made by Car. Study Finds (2024)</p>	<p>29 Rettenmeier, M., Möller, M., and Sauer, A., Disassembly technologies of end-of-life automotive battery packs as the cornerstone for a circular battery value chain: A process-oriented analysis, Resources, Conservation and Recycling (2024)</p> <p>30 Donaldson, P., Cell-to-pack batteries, E-Mobility Engineering (n.d.)</p> <p>31 Ritchie, H. e Rosado, P., Which countries have the critical minerals needed for the energy transition? Nosso mundo em dados (2024)</p> <p>32 Agência Internacional de Energia, Global EV Outlook 2025 (2025)</p> <p>33 Agência Internacional de Energia, Critical Minerals Policy Tracker (atualizado em 2025)</p> <p>34 Agência Internacional de Energia Renovável, Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials (2023)</p> <p>35 Agência Internacional de Energia, Global Critical Minerals Outlook 2025 (2025)</p> <p>36 Precedence Research, Lithium-ion Battery Recycling Market Size, Share and Trends 2026 to 2035 (2026)</p> <p>37 União Europeia, Regulamento (UE) 2023/1542 sobre baterias e resíduos de baterias, que altera a Diretiva 2008/98/CE e o Regulamento (UE) 2019/1020 e revoga a Diretiva 2006/66/CE, Jornal Oficial da União Europeia (2023)</p> <p>38 Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação, Notice on Issuing of "Interim Measures for the Management of Recycling and Utilisation of Power Batteries for New Energy Vehicles", Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da República Popular da China (2020)</p> <p>39 Revolução na reciclagem de baterias no sudeste da Ásia, Speeda (2025)</p> <p>40 Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa, UN Guidance for Action on Critical Energy Transition Minerals (2025)</p> <p>41 Agência Internacional de Energia Renovável, Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials (2023)</p> <p>42 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Critical Transitions: Circularity, equity, and responsibility in the quest for energy transition minerals (2024)</p>
--	--	--

- 43 Mazzocco, I. e Featherston, R., The Global EV Shift: The Role of China and Industrial Policy in Emerging Economies, Centro de Estudos Estratégicos e Internacionais (2025)
- 44 Initiative for Responsible Mining Assurance, IRMA Standard for Responsible Mining v1.0 (2018)
- 45 ICMM, Mineração Responsável (n.d.)
- 46 Fórum Mundial de Recursos e Índice de Mineração Responsável, Relatório RMI+ 2025 (2025)
- 47 Isso inclui o Guia de Due Diligence da OCDE para Cadeias de Suprimento Responsáveis de Minerais de Áreas Afetadas por Conflitos e de Alto Risco (Fonte: OCDE, 2016), a criação de padrões pela Iniciativa para Garantia de Mineração Responsável (Fonte: IRMA, 2024), o padrão Towards Sustainable Mining desenvolvido pela Associação de Mineração do Canadá (Fonte: TSM) e estruturas de garantia como a Copper Mark (Fonte: Copper Mark)
- 48 Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Critical Transitions: Circularity, equity, and responsibility in the quest for energy transition minerals (2024)
- 49 Fórum Intergovernamental sobre Mineração, Minerais, Metais e Desenvolvimento Sustentável (IGF), Artisanal and Small-scale Mining of Critical Minerals, Instituto Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (2024)
- 50 Bouvier, M. e Dias, S.M., Waste Pickers in Brazil: Um perfil estatístico, WIEGO (2021)
- 51 Banco Mundial, Achieving Sustainable and Inclusive Artisanal and Small-Scale Mining (ASM): A Renewed Framework for World Bank Engagement (2024)
- 52 Tingini, T. L. e Eniowo, O. D., Breaking the informal cycle: integrating artisanal and small-scale mining into the formal economy, Mineral Economics (2025)
- 53 Pisano, V., et al., The Brazilian National Solid Waste Policy: perspectives of the waste pickers' cooperative networks, Ambiente e Sociedade (2022)
- 54 Chen, H., Yang, Y., and Dong, Z., The effect of product design on recycling efficiency of lithium-ion batteries through structural equation modeling and life cycle assessment, Scientific Reports (2025)
- 55 Lander, L., et al., Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs (Uma avaliação técnico-econômica do impacto do design da bateria nos custos de desmontagem), Applied Energy (2023)
- 56 Autocraft EV Solutions, Closing the EV Confidence Gap: The Role of Battery Remanufacturing (2025)
- 57 Fórum Econômico Mundial e Global Battery Alliance, A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation (2019)
- 58 Dunn, J., et al., Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles, Environmental Science & Technology (2021)
- 59 ibid.
- 60 Agência Internacional de Energia, Recycling of Critical Minerals (2024)
- 61 Buzwani, M., et al., Battery Recycling: How Accounting for Social and Environmental Benefits Boosts Returns, Rocky Mountain Institute (2025)
- 62 Regulamento (UE) 2023/1542 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de julho de 2023, relativo a pilhas e resíduos de pilhas, que altera a Diretiva 2008/98/CE e o Regulamento (UE) 2019/1020 e revoga a Diretiva 2006/66/CE (JO L 191 de 28.7.2023, pp. 1-117)
- 63 Departamento de Negócios e Comércio, Estratégia de baterias do Reino Unido (2023)
- 64 Guerra, M., Battery Swapping Market (Mercado de troca de baterias): CATL e Ample lideram a expansão global, tecnologia de baterias (2024)
- 65 Frost & Sullivan, Battery-as-a-Service (BaaS): pronta para revolucionar o mercado global de veículos elétricos (EV) (2025)
- 66 IDTechEx, Baterias de veículos elétricos de segunda vida 2023-2033 (2023)
- 67 Um estudo de 2025 sobre a frota de veículos elétricos da Califórnia projetou que uma abordagem de "segundo uso primeiro" poderia aumentar o total de emissões evitadas para 56 milhões de toneladas
- até 2050, em comparação com 48 milhões de toneladas em um cenário de reciclagem imediata. Fonte: Shaikh, K., California could slash 56 million tons of CO₂ emissions by using retired EV batteries, Interesting Engineering (2025)
- 68 Rocky Mountain Institute, The Battery Mineral Loop: The path from extraction to circularity (2024)
- 69 Ibid.
- 70 Zhang-Billert, Y., et al., For Electric Vehicles, Smaller Is Better (Para veículos elétricos, menor é melhor), World Resources Institute (2025)
- 71 Ibid.
- 72 Conselho Internacional de Transporte Limpo, Electrifying road transport with less mining: A global and regional battery material outlook (2024)
- 73 Dunn, J., et al., Reducing battery electric vehicle mineral demand through efficiency, range, and new technology, Transportation Research Part D: Transport and Environment (2025)
- 74 Conselho Internacional de Transporte Limpo, Quanto maior, melhor? How battery size affects real-world energy consumption, cost of ownership, and life-cycle emissions of electric vehicles (2024)
- 75 Fundação Ellen MacArthur, Building Prosperity: Unlocking the potential of a nature-positive, circular economy for Europe (2024)
- 76 Ellen MacArthur Foundation, Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe (2015)
- 77 Conselho Internacional de Transporte Limpo, Electrifying road transport with less mining: A global and regional battery material outlook (2024)
- 78 Husmann, J., et al., Determining the key drivers of the potential secondary battery raw materials supply from the urban mine in the European Union, Resources, Conservation and Recycling (2025)
- 79 Aguilar Lopez, F., et al., On the potential of vehicle-to-grid and second-life batteries to provide energy and material security, Nature Communications (2024)



© COPYRIGHT 2026
ELLEN MACARTHUR FOUNDATION

www.ellenmacarthurfoundation.org

Charity Registration No.: 1130306
OSCR Registration No.: SC043120
Company No.: 6897785