



Um Olhar Sustentável sobre a Expansão dos Veículos Elétricos: Mobilidade em Transição

A Sustainable Perspective on the Expansion of Electric Vehicles: Mobility in Transition

Adriana Patrícia Prado de Oliveira

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais-PPGDPA, UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6893-0202>

Raquel Diniz Rufino

Professora Assistente da Escola de Saúde e Ciências Biológicas, Universidade Católica de Pernambuco. <https://orcid.org/0000-0001-6956-569X>

Galba Maria de Campos-Takaki

Professora Titular da Escola de Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco -UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: A transição para a eletromobilidade no Brasil avança de forma gradual, com projeções de que a frota nacional de veículos elétricos (VEs) apresentará um aumento de 10% até 2030. Embora a inserção dos VEs possibilite perspectivas importantes para a descarbonização e a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE), o país enfrenta severos desafios estruturais, regulatórios e de segurança nas edificações. Adicionalmente, o “coração pulsante” dessa tecnologia — as baterias, predominantemente de íon-lítio (LIBs) — carrega um paradoxo ambiental. A extração mineral atual demanda volumes críticos de água e energia, além de fomentar condições de trabalho inseguras e precárias em países em desenvolvimento. Análises químicas e regulatórias indicam que, devido às elevadas concentrações de metais como cobalto, cobre, níquel e chumbo, as baterias descartadas enquadram-se como resíduos perigosos com elevado potencial de lixiviação e ecotoxicidade. Tecnologias emergentes, como as baterias de estado sólido (ASSBs), e diretrizes de logística reversa e reciclagem (inspiradas nos modelos da União Europeia e da Ásia) vêm sendo alternativas importantes; contudo, a sustentabilidade real depende da melhoria da eficiência sistêmica dos veículos e de políticas públicas de forma integrada. Para alavancar o mercado de VEs no Brasil de forma sustentável, torna-se necessário estruturar um sistema de suporte robusto que equacione o abastecimento seguro à manutenção e à reciclagem, possibilitando perspectivas de mitigação dos danos ambientais e aos humanos ao longo da cadeia produtiva.

Palavras-chave: sustentabilidade; veículo elétrico; meio ambiente.

Abstract: The transition to electromobility in Brazil is progressing gradually, with projections indicating that the national fleet of electric vehicles (EVs) will increase by 10% by 2030. Although the integration of EVs offers significant prospects for decarbonization and the reduction of Greenhouse Gases (GHG), the country faces severe structural, regulatory, and building safety challenges. Additionally, the “beating heart” of this technology—batteries, predominantly lithium-ion (LIBs)—carries an environmental paradox. Current mineral extraction demands critical volumes of water and energy, in addition to fostering unsafe and precarious working conditions in developing countries. Chemical and regulatory analyses indicate that, due to high concentrations of metals such as cobalt, copper, nickel, and lead, discarded batteries qualify as hazardous waste with a high potential for leaching and ecotoxicity. Emerging technologies, such as solid-state batteries (ASSBs), and reverse logistics and recycling guidelines (inspired

by models from the European Union and Asia) have been important alternatives; however, real sustainability depends on improving the systemic efficiency of vehicles and on integrated public policies. To sustainably leverage the EV market in Brazil, it is necessary to structure a robust support system that balances secure fuel supply with maintenance and recycling, enabling prospects for mitigating environmental and human damage throughout the production chain.

Keywords: sustainability; electric vehicle; environment.

INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos representam uma mudança significativa na mobilidade global de diversos países com perspectivas de aprimorar a gestão ambiental e combater os danos causados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis. Essa transição energética vem impulsionando muitos governos a investirem em recursos e criarem políticas públicas que apoiem e contribuam para o avanço da descarbonização das atividades econômicas, além do combate às mudanças climáticas e, consequentemente, da melhoria da qualidade de vida e da saúde humana (Rodríguez; Santos, 2024).

Apesar do Brasil ser considerado uma potência climática e possuir um parque industrial automotivo solidificado, o mercado brasileiro ainda não possui incentivo suficiente, relativamente caro, nem tecnologia primordial para o desenvolvimento. Outros fatores também pesam no desenvolvimento dessa área, como a relação corporativista entre os principais atores automobilísticos, a dependência decisória do mercado internacional, a ausência de uma rota tecnológica paralela para a eletrificação da mobilidade, o conjunto vago de políticas para a transição tecnológica (Wolffenbüttel, 2019).

De acordo com a Associação Brasileira de Veículos Elétricos – ABVE (2025), o mercado brasileiro de veículos elétricos leves encerrou o ano de 2024 com aproximadamente 177.358 unidades vendidas, com crescimento de cerca de 90% sobre as 93.927 unidades registradas em 2023 e com perspectivas de vendas de veículos eletrificados leves ultrapassando 200.000 unidades em 2025 (Rodríguez; Santos, 2024).

O processo de inserção de Veículos Elétricos (VEs) no Brasil poderá representar 10% dos veículos em circulação até 2030. A regulação da atividade e o planejamento das cidades são fundamentais para tornar viável essa transição, no sentido de garantir infraestrutura adequada, com o aumento da frota de VEs no Brasil. No contexto brasileiro, a implementação de veículos elétricos representa não apenas uma transição tecnológica, mas também um conjunto de obstáculos complexos e oportunidades (Pereira; Queiroz; Costa, 2024).

Os desafios a serem enfrentados pelo Brasil vão desde o gerenciamento do sistema de energia elétrica para alimentar as baterias, a infraestrutura e a disponibilidade das estações de carregamento, até questões relacionadas à autonomia das baterias, à velocidade de recarga e à duração, aos ciclos de carga e descarga e à vida útil (Christian, 2015).

Além dos problemas técnicos de infraestrutura das estações de carregamento das baterias, existem os riscos associados a possíveis incêndios envolvendo os veículos durante o processo de recarga. Os incêndios envolvendo essas baterias apresentam características distintas dos veículos convencionais e, em face dos riscos inerentes, requerem procedimentos específicos de segurança para as edificações.

No entanto, essa alternativa para inserção de VEs não parece vir acompanhada de uma proposta de estruturação de um sistema de suporte à operação adequada desses veículos, o que inclui regulamentação, abastecimento, manutenção, segurança e processo de reciclagem e descarte, dentre outros que o Brasil precisa equacionar para poder alavancar o mercado de VEs.

O cenário atual da mobilidade urbana contempla um número excessivo de veículos nas vias públicas, ocasionando diversos problemas, com repercussões ambientais, sobretudo a emissão de GEE (Gases de Efeito Estufa) para a atmosfera. A importância da temática sobre eletromobilidade para contribuir com o meio ambiente, relacionada à sustentabilidade ambiental e à busca por alternativas na redução do uso de combustíveis fósseis, deixando a cidade mais limpa. Portanto, torna-se essencial a redução das emissões de gases poluentes e a mitigação dos efeitos climáticos (Santana; Albuquerque; Silva, 2022).

Os veículos elétricos são essenciais para as estratégias globais de descarbonização, mas as baterias que os alimentam ainda exigem muita energia e recursos para serem produzidas e recicladas. Entre as diversas tecnologias de baterias usadas em veículos elétricos, as baterias de íon-lítio (LIBs) dominam atualmente as aplicações em VEs, devido à sua confiabilidade, vida útil, energia e densidade de potência. No entanto, os processos de produção e reciclagem são altamente intensivos em energia e recursos, contribuindo substancialmente para os impactos ambientais do ciclo de vida.

Matéria-prima das Baterias

As baterias são essenciais para o futuro da humanidade, mas acarretam custos ambientais e humanos elevados que precisam ser mitigados. Um futuro com baixas emissões de carbono depende dessa tecnologia, porém também acarreta outras consequências no meio ambiente; no caso, as baterias utilizam matérias-primas que são recursos não renováveis para fabricar as baterias (Abdelkareem *et al.*, 2023).

As baterias de íon-lítio (Li-ion) e polímero de lítio (Li-poly) tornaram-se recentemente dominantes em produtos eletrônicos de consumo devido às vantagens associadas à densidade de energia e à longevidade do produto. No entanto, a elevada taxa de descarte e a falta de uma política regulatória uniforme sobre sua destinação final significam que as baterias de lítio podem contribuir substancialmente para a poluição ambiental e impactos adversos à saúde humana devido a materiais potencialmente tóxicos (Kang; Chen; Ogunseitan, 2026).

Segundo Skeete *et al.* (2020), as várias composições químicas das baterias de lítio dificultam os processos de reutilização e reciclagem. Na estrutura, o eletrólito comumente utilizado é um sal condutor iônico, o ânodo é feito de grafite, e os cátodos variam conforme a aplicação — no caso de veículos elétricos, são comuns materiais como LiMn_2O_4 (LMO) e LiFePO_4 (LFP).

As baterias são formadas por camadas de eletrodos e eletrólitos que, combinadas, formam módulos de células para maximizar a carga. Castelvechchi (2021) destaca que, em média, uma bateria de íons de lítio utilizada em veículos contém aproximadamente 8 kg de lítio, 35 kg de níquel, 20 kg de manganês e 14 kg de cobalto. Esses valores podem variar conforme o tipo e modelo da bateria, refletindo a constante busca pela melhoria dos processos de reciclagem, essencial para a reutilização eficiente desses materiais valiosos. Isso responde à necessidade de reduzir o impacto ambiental gerado pelo descarte dessas baterias, especialmente com o aumento da adoção de veículos elétricos.

Conforme afirma Locorotondo (2020), as baterias de íons de lítio são projetadas para terem uma durabilidade mínima de 10 anos, mas, ao atingirem 80% da capacidade de carga nominal, são substituídas devido à necessidade de manter os aspectos satisfatórios na usabilidade dos automóveis elétricos, visando à permanência da qualidade da aceleração e da autonomia dos veículos.

A recuperação de metais valiosos, como lítio e cobalto, é uma estratégia eficaz para reduzir a dependência de atividades de mineração, mitigando os impactos ambientais associados à extração intensiva de recursos naturais. Além disso, tecnologias como a hidrometalurgia oferecem vantagens ao possibilitarem a recuperação de materiais com elevada pureza, tornando o processo economicamente viável (Jin *et al.*, 2022).

Cerca de um terço do lítio mundial — o principal componente das baterias — vem de salinas na Argentina e no Chile, onde o material é extraído usando enormes quantidades de água em uma área árida. O grau de lítio de bateria também pode ser produzido expondo o material a temperaturas muito elevadas — um processo usado na China e na Austrália — que consome grandes quantidades de energia. Em relação ao cobalto, que é um importante mineral de uma bateria, cerca de 70% desse elemento é encontrado em apenas um país: a República Democrática do Congo (RDC). Cerca de 90% do cobalto da RDC vem das minas industriais (90.000 toneladas anualmente). (Kang; Chen; Ogunseitan, 2026).

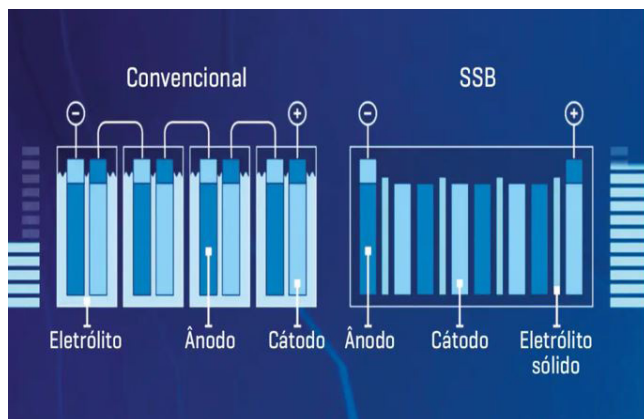
Assim, a tecnologia de íon-lítio tem desvantagens para as pessoas e para o planeta, visto que a extração das matérias-primas, principalmente lítio e cobalto, requer grandes quantidades de energia e água, órgãos regulamentadores, líderes da indústria e pesquisadores precisam buscar soluções mais sustentáveis para reduzir as consequências negativas. Assim, os autores afirmam que as baterias de íons de lítio dominam o mercado atual de veículos elétricos, devido à sua densidade energética e à estabilidade (Zhu; Ciez, 2026).

Segundo os autores acima, em alguns países possuem estudos, ainda iniciais para as baterias de estado sólido (ASSBs), na busca de desenvolver produtos

com mais sustentabilidade como alternativa mais segura e com maior densidade de energia às atuais baterias de íon-lítio (LIBs), segundo os autores Zhu; Ciez, 2026 mencionam que os impactos ambientais dessas baterias ao longo do ciclo de vida, especialmente considerando o estágio inicial das tecnologias de reciclagem, permanecem pouco explorados.

De acordo com a Figura 1, é possível verificar o contraste com as baterias de íon-lítio convencionais, porque as baterias de estado sólido usam eletrólitos sólidos em vez de líquidos, o que permite o uso de ânodos de lítio metálico, resultando em maior densidade de energia, segurança aprimorada e maior estabilidade. No nível do veículo, isso poderia se traduzir em baterias com a mesma área volumétrica, mas com maior capacidade de armazenamento de energia, aumentando a autonomia do veículo. (Zhu; Ciez, 2026).

Figura 1 – Comparação de funcionamento entre as baterias convencionais e de lítio.



Fonte: Esquema da Revista Quatro Rodas.

Segundo os autores Zhu e Ciez (2026), elas podem ser uma opção mais sustentável se usadas para projetos de veículos mais leves ou aerodinâmicos, mas não oferecem benefícios ambientais significativos em relação às LIBs convencionais. Do ponto de vista das políticas públicas, a concretização do potencial de sustentabilidade das ASSBs depende menos da química em si e mais de melhorias na eficiência do sistema, como estruturas de integração favoráveis e da vida útil real da bateria.

Conforme a Tabela 1 resume o estudo comparativo entre as duas baterias. Com isso, os autores afirmam que a simples substituição das LIBs por ASSBs não garante benefícios ambientais significativos, e o uso de maior densidade de energia seria apenas para estender a autonomia do veículo (Zhu; Ciez, 2026).

Tabela 1. – Principais características funcionais.

Aspectos	Bateria LIBs	Bateria ASSBs
Eletrodo	Líquido	Sólido
Ânodo	Grafite	Lítio metálico
Segurança	Menor	Maior
Densidade energética	Menor	Maior
Reciclagem	Consolidada	Complexa
Maturidade Tecnológica	Consolidada	Emergente

Fonte: Autoria própria (2026).

Os autores Zhu e Ciez (2026) afirmam que estratégias combinadas podem melhorar a eficiência do veículo, como redução de peso e design aerodinâmico. Assim, as baterias ASSBs podem contribuir para menores emissões de GEE ao longo do ciclo de vida. Essas informações são relevantes para formuladores de políticas, indústrias e pesquisadores que desenvolvem baterias de próxima geração, destacando a necessidade de alinhar a inovação em baterias, a capacidade de reciclagem e os padrões de eficiência de veículos para gerar benefícios ambientais significativos.

A Vida Útil da Bateria

A rápida expansão da mobilidade elétrica traz novos desafios ambientais relacionados ao ciclo de vida das baterias de íon-lítio. Essas baterias contêm metais críticos, como lítio, cobalto e níquel, cuja extração e descarte inadequados podem causar contaminação do solo e da água, bem como riscos à saúde humana (Zeng; Li; Singh, 2023). Do ponto de vista técnico, a reutilização e a reciclagem enfrentam barreiras significativas, incluindo elevados custos operacionais, riscos de segurança devido à instabilidade química e complexidades logísticas associadas ao transporte e à triagem das baterias ao final da vida útil.

As vantagens das baterias de lítio levaram à adoção em veículos elétricos, aplicações militares e aeroespaciais. Consequentemente, o mercado global de baterias de lítio deverá aumentar, com uma vida útil relativamente curta, de cerca de 2 a 4 anos, as baterias recarregáveis de lítio em dispositivos eletrônicos portáteis contribuirão substancialmente para o crescente problema do lixo eletrônico (e-lixo), sendo o segmento de crescimento mais rápido do fluxo de resíduos sólidos dos EUA (Zhu; Ciez, 2026).

Entre os principais riscos estão a instabilidade térmica das células após múltiplos ciclos de carga e descarga, o que aumenta a probabilidade de curto-circuito e incêndios, além da complexidade do desmonte e da triagem das baterias usadas. Há também limitações econômicas relacionadas aos elevados custos logísticos e à ausência de padronização entre fabricantes, o que dificulta a reutilização segura dos módulos em novos sistemas de armazenamento (Rodríguez; Santos, 2024).

Nesse contexto, o reaproveitamento das baterias de íon-lítio torna-se essencial para consolidar práticas sustentáveis e viabilizar a economia circular no

setor automotivo. Apesar do potencial promissor da reutilização das baterias de íons de lítio, essa prática ainda enfrenta desafios técnicos e ambientais que limitam sua aplicação em larga escala, sendo uma alternativa viável para os impactos ambientais e socioambientais. As características gerais de forma comparativa das baterias de lítio, alcalinas e níquel são apresentadas na Tabela 2, evidenciando que a bateria de lítio tem potencial promissor.

Tabela 2 - Características gerais das baterias de forma comparativa.

Característica	LiFeS2	Alcalina	Ni-Cd ou NiMH
Desempenho/ Temperatura elevada	Superior	Bom	Superior
Peso	33%<Alcalina	33%>LiFe S2	33%>Alcalina
Durabilidade	+ de 20 anos	5 a 10 anos	3 a 5 anos
Resistência/ vazamento	Superior	Bom	Bom
Curva de descarga	Plana	Inclinada	Plana
Capacidade (mAh)	Superior	Boa	Superior

Fonte: Autoria própria (2026).

Em países como a Alemanha e o Reino Unido, por exemplo, há projetos-piloto que consistem na filtração do lítio em salmouras quentes sob rochas graníticas. Nos Estados Unidos, as normas para a reciclagem de baterias são majoritariamente definidas em âmbito estadual, com a Califórnia se destacando por liderar iniciativas que incentivam o uso de veículos elétricos e a criação de parcerias para a reciclagem de baterias em parceria com a indústria. A China, um dos maiores produtores de baterias de lítio, implementou regulamentos rigorosos que exigem que os fabricantes estabeleçam sistemas de coleta e reciclagem, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais associados (Sixt, 2023).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), de 2010, aponta para o assunto, mencionando a importância da destinação final correta para produtos considerados nocivos para o meio ambiente. A lei traz as diretrizes para que os produtos considerados tóxicos retornem à indústria. Ainda precisamos melhorar em nível de leis e de suporte de monitoramento e de fiscalização para avançar em práticas mais sustentáveis para o ciclo de vida da bateria, desde a sua produção até sua destinação final.

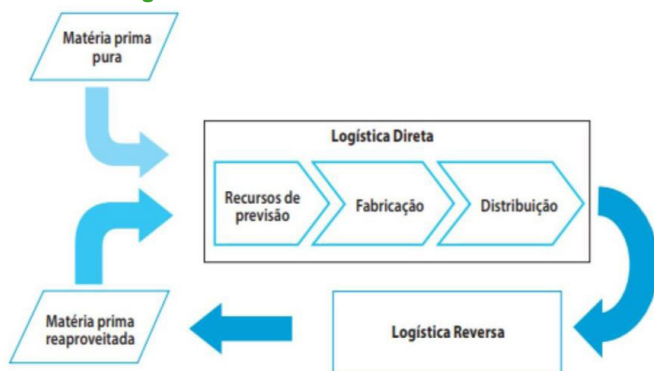
A reciclagem das baterias pode recuperar uma fração dos materiais, mas os próprios processos de reciclagem também exigem energia e recursos consideráveis. Uma intervenção crucial, que precisa de mais tecnologia, é investir numa cadeia cíclica de matérias como a reutilização em vez de, ou além de, reciclar ou descartar em aterros sanitários.

Segundo Garcia (2022), a economia linear, marcada pela extração, produção, aquisição, uso e descarte de recursos no meio ambiente, resulta na exaustão dos recursos finitos do planeta e agrava os problemas ambientais, em contrapartida, o conceito de economia circular difere desse modelo ao requerer a participação ativa de empresas, cidadãos e líderes políticos, esta abordagem demanda alterações não apenas nos processos de concepção, produção e comercialização de bens e

serviços por parte das empresas, mas também nos comportamentos e padrões de consumo tanto dos consumidores quanto das entidades governamentais.

O processo de logística reversa, operação e controle no movimento de retorno do produto pós-venda e consumo, que traz informações, por meio dos canais de distribuição reversa, agregando valores à economia circular. No Brasil, os princípios que compõem a logística reversa são: pós-consumo e reuso. A logística reversa é o caminho para que a empresa obtenha lucros e maior destaque no mercado. A logística reversa no Brasil visa reaproveitar resíduos, dando uma nova vida, ou seja, uma segunda vida, evitando que detritos que poderiam contaminar a natureza tenham outro destino. Contudo, o sistema funciona com envolvimento de diversos setores, incluindo consumidor, fabricante e comerciante (Cenedesi; Correa, 2023). Conforme a Figura 2, o ciclo de vida da bateria é cíclico; após o consumo, as baterias entram no processo de logística reversa, ou seja, voltam para o fabricante para reutilização com outra finalidade ou para a reciclagem para extrair os minerais e entram novamente na cadeia produtiva, favorecendo a economia circular e mitigando os impactos ambientais.

Figura 2 – Ciclo de vida da bateria.



Fonte: Lacerda, 2022

O Oak Ridge National Laboratory (2023) desenvolveu uma tecnologia que possibilita a reutilização de baterias desgastadas, com aplicação em sistema de armazenamento de energia para redes elétricas, equilibrando a oferta de energia nos períodos de picos de demanda, reduzindo a dependência de sistemas convencionais que utilizam combustíveis fósseis para geração. Essa estratégia viabiliza a integração de baterias de diferentes fabricantes e capacidades de armazenamento variadas, gerando reservas de energia para a rede de eletricidade.

Apesar do potencial promissor da reutilização das baterias de íon-lítio, essa prática enfrenta desafios técnicos, ambientais e políticos que limitam sua aplicação em larga escala. Entre os principais riscos estão a instabilidade térmica das células após múltiplos ciclos de carga e descarga, o que aumenta a probabilidade de curtos-circuitos e incêndios, além da complexidade do desmonte e da triagem das baterias usadas. Há também limitações econômicas relacionadas aos elevados custos logísticos e à ausência de padronização entre fabricantes, o que dificulta a

reutilização segura dos módulos em novos sistemas de armazenamento (Rodriguez; Santos, 2026).

Várias oportunidades para diferentes setores industriais com a reutilização de baterias. Skeete *et al.* (2020) destacam que o setor de energia renovável é um dos mais beneficiados, uma vez que baterias de segunda vida podem ser integradas a sistemas solares ou eólicos, permitindo o armazenamento eficiente de energia e atenuando a variabilidade na produção dessas fontes energéticas.

Na indústria, essas baterias podem ser reutilizadas em processos produtivos para fornecer energia de backup. Essa prática possibilita a redução dos custos operacionais e apoia a sustentabilidade das operações industriais, destacando-se como uma solução eficiente e econômica. De acordo com os autores Rodriguez e Santos (2026), no cenário atual, os métodos de reciclagem que existem podem variar entre técnicas térmicas, físicas e até separações químicas. Eles são: pirometalurgia, hidrometalurgia e indução térmica. Todos apresentam vantagens e desafios, como expressa a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Comparação média entre os métodos de reciclagem de baterias.

Aspecto	Mineração	Reciclagem Pirometalurgia	Reciclagem Hidrometalurgia	Reciclagem Indução técnica
Custo (por tonelada)	US\$ 5.000 a US\$ 10.000	US\$ 2.000	US\$ 1.500 a US\$ 3.000	US\$ 1.500 a US\$ 2.500
Consumo de Energia	20-30 gigajoule/tonelada (para extração de lítio)	5-10 gigajoule/tonelada (depende do processo)	2-6 gigajoule/tonelada (químico)	5-8 gigajoule/tonelada (térmico)
Impacto Ambiental	Emissões de CO ₂ : 50-150 kg/tonelada de material extraído	Emissões de CO ₂ : 30-50 kg/tonelada	Emissões de CO ₂ : 10-30 kg/tonelada	Emissões de CO ₂ : 10-30 kg/tonelada
Custo de operação	Alto (extração, transporte e tratamento)	Moderado (consumo energético e materiais)	Moderado (químicos e energia)	Moderado (energia e equipamentos)

Fonte: Adaptado de Eixos (2024) e Conexão Mineral (2024).

Os autores Rodriguez e Santos (2026) afirmam que, do ponto de vista ambiental, a reutilização contribui para a expressiva redução da geração de resíduos perigosos e diminui a demanda por matéria-prima, resultando em benefícios diretos para a mitigação dos impactos ambientais, promovendo práticas alinhadas às metas globais de sustentabilidade e à transição para uma economia verde.

Impactos para a Saúde Humana e Ambiental

A exposição humana e ambiental a essas substâncias químicas é normalmente regulamentada durante a fabricação de baterias de lítio por meio de leis de saúde e segurança ocupacional. Além do potencial total de toxicidade humana e do potencial total de ecotoxicidade, a exploração de minerais de forma não sustentável pode

prejudicar gerações futuras no que se refere ao potencial total de esgotamento de recursos (Kang; Chen; Ogunseitan, 2026).

As baterias representam uma fração significativa na constituição de diversos produtos eletrônicos, contendo metais de alto valor agregado e, devido à geração contínua ao longo do ciclo de vida dos produtos eletrônicos e ao incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias e veículos elétricos, as baterias são identificadas como agentes na produção de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) em todo o planeta (Zeng *et al.*, 2015).

Os metais encontrados nas baterias são produtos classificados como resíduos perigosos de acordo com as regulamentações federais dos EUA, usando o Procedimento de Lixiviação de Características de Toxicidade (TCLP14), e de acordo com as regulamentações do estado da Califórnia, usando o Teste de Extração de Resíduos (WET) e a Concentração Limite de Tolerância Total (TTLC15), e (ii) usar modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida do material e de avaliação de riscos para avaliar o esgotamento de recursos e os potenciais de toxicidade das baterias de lítio devido ao seu conteúdo metálico (Kang; Chen; Ogunseitan, 2026).

Os resultados dos testes de lixiviação de metais TTLC, TCLP e WET mostram que todas as baterias de lítio devem ser classificadas como resíduos perigosos, segundo as regulamentações da Califórnia, principalmente devido aos níveis elevados de cobalto e cobre e, em alguns casos, de níquel. Esses resultados fornecem uma nova justificativa para que as baterias de lítio sejam incluídas na regulamentação de Resíduos Universais da Califórnia, que consiste em sete categorias de resíduos perigosos amplamente produzidos por residências e muitos tipos diferentes de empresas, incluindo dispositivos eletrônicos, baterias de níquel-cádmio, lâmpadas elétricas contendo mercúrio e latas de aerossol não vazias. Além disso, de acordo com as regulamentações dos EUA, algumas das baterias de íon-lítio podem ser classificadas como resíduos perigosos devido aos níveis elevados de chumbo (Pb) (Kang; Chen; Ogunseitan, 2026).

Além das emissões de gases de efeito estufa, a toxicidade dos metais exerce grande influência sobre o meio ambiente e os seres humanos, especialmente os trabalhadores que atuam próximos a esses materiais nas instalações de fabricação. Do ponto de vista ambiental, o lançamento de poluentes afeta a natureza do solo, da água e das plantas.

A liberação de poluentes na fabricação de baterias tem efeitos adversos na saúde humana, como sintomas de insuficiência renal ou riscos carcinogênicos e não carcinogênicos, podendo ocorrer exposição por diferentes vias, como inalação, contato com a pele ou os olhos, ingestão e injeção, dependendo do material extraído. Os resultados mostram consistência na alta contribuição da exposição ocupacional para seis metais: cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), lítio (Li), manganês (Mn), níquel (Ni) e chumbo (Pb), sendo necessárias melhorias significativas para reduzir esses efeitos adversos sobre o meio ambiente e a saúde humana (Abdelkareem *et al.*, 2023).

A Tabela 4, apresenta metais, Co, Cu, Ni e Pb que, em condições simuladas de aterro sanitário, liberaram concentrações que excederiam os limites regulamentares, tornando as baterias de lítio perigosas sob as leis federais e estaduais dos EUA. Esses resultados exigem maior coordenação das políticas regulatórias para apoiar a reciclagem de baterias recarregáveis e estratégias aprimoradas para reduzir os níveis de componentes químicos perigosos em produtos eletrônicos para consumo.

Tabela 4 - Identificação dos metais tóxicos.

Minerais presentes	Elevadas concentrações	Maior impacto ambiental:	Compostos perigosos
Cobalto (Co)	Alumínio (Al)	Cobalto (Co)	LiClO_4 Perclorato de lítio
Cobre (Cu)	Cobalto (Co)	Cobre (Cu)	LiBF_4 Tetrafluoroborato de lítio
Níquel (Ni)	Cobre Cu)	Níquel (Ni)	LiPF_6 Hexafluorofosfato de lítio
Chumbo (Pb)	Lítio (Li)	Tálio (Tl)	
Alumínio (Al)		Prata (Ag)	
Prata (Ag)			
Tálio (Tl)			
Lítio (Li)			

Fonte: Autora (2026).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos se dividem em dois tipos, os não perigosos e os perigosos, e são classificados de acordo com os seus impactos socioambientais. As baterias de pequeno, médio ou grande porte que alimentam dispositivos eletrônicos e os veículos elétricos são classificadas como perigosas, por possuírem metais pesados em sua composição, entre os quais se encontram chumbo, lítio e zinco. Esses metais têm grande potencial tóxico, se descartados de forma incorreta no meio ambiente, podem atingir as camadas mais profundas do solo no processo de degradação, comprometendo a qualidade dos aquíferos e trazendo danos significativos a todo o bioma (Santos *et al.*, 2013; Soares, 2021).

Conforme mostra a Tabela 5 abaixo, as questões ambientais e humanas estão relacionadas ao ciclo de vida das baterias, desde sua fabricação até sua destinação final. Levando em consideração as legislações que exigem que alguns produtos sigam um fluxo de retorno ao fabricante depois da sua vida útil, em que o fabricante pode reutilizar ou reciclar, e posteriormente, o produto volta à cadeia produtiva. Esse mecanismo é importante para reduzir os danos ambientais e humanos.

Tabela 5 - Potencial de danos.

Impactos Ambientais	Impactos Humanos
Aumento de resíduo eletrônico	Intoxicação por metais pesados
Contaminação de aterros sanitários	Problemas respiratórios
Poluição da água e do solo	Danos Neurológicos
Toxicidade para os seres vivos	Riscos ocupacionais

Fonte: Autora, 2026

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eletromobilidade é uma realidade no contexto atual como alternativa sustentável para diminuir as alterações climáticas e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Contudo, a expansão de veículos elétricos tem sido uma realidade global, e vários países têm atuado em gestão e logística para este crescimento; porém, o Brasil vem neste mesmo ritmo para estruturar uma mobilidade mais limpa e sustentável. Com isso, torna-se importante os países organizarem um sistema de suporte operacional incluindo regulamentação, abastecimento, manutenção, segurança e logística reserva para efetivar todo gerenciamento como:

Manutenção energética: Falta de um sistema robusto para o gerenciamento da rede elétrica nacional e ausência de padronização.

Segurança predial: O processo de recarga apresenta riscos específicos de incêndio e instabilidade térmica, exigindo novas regulamentações e procedimentos de segurança para as edificações urbanas.

Vulnerabilidade jurídica: Efetividade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com mecanismo de monitoramento e de fiscalização para o ciclo completo das baterias desde a produção até o pós-consumo.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10004:2024. **Resíduos sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas,

ABDELKAREEM, M. ALI; A., MOHAMAD; KHURI, Siren; ALAMI, Abdul Hai; SAYED, Enas Taha; DEEPA, T. D.; OLABI, A. G. **Environmental aspects of batteries**. Sustainable Horizons, v. 8, id.100074, 2023. 10.1016/j.horiz.2023.100074

Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE. (2025). **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024**. Disponível: <https://abve.org.br/eletrificados-superam-previsoes-passam-de-170-mil-e-batem-todos-os-recordes-em-2024/>. Acesso em: 22 maio 2026.

BARROS, THIAGO V. *et al.* **Recovery of lithium and cobalt from lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries using supercritical water**. Environmental Pollution, v. 359, p. 124570, 2024. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124570.

BRASIL. Lei Federal 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2010.

CASTELVECCHI, D. **Electric cars and batteries: how will the world produce enough?** Nature, 596(7872), 336–339, 2021. doi: 10.1038/d41586-021-02222-1.

CENEDESI, J. L. G.; CORREA, N. L. de S. **Logística reversa de pilhas e baterias**. In: Simpósio de Logística das Fatecs (FATECLOG), 14., 2023, Americana. Anais [...]. Americana: FATEC Americana, 2023.

CHEN, M., M, X., CHEN, B., & ZHOU, T. Environmental and safety challenges of lithium-ion battery recycling from electric vehicles: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 154, 111874, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5585/2025.29279>

GARCÍA, Ana Carretero. Economía circular versus economía lineal. Propuestas normativas en España y Francia relativas al uso de envases y a la información dirigida al consumidor sobre cualidades ambientales de los productos. **Revista CESCO de Derecho de Consumo**, n. 42, p. 19-52, 2022.

JIN, S., ZHANG, X., *et al.* A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: Urgent status and technology advances. **Journal of Cleaner Production**, 340, 130535, 2022. <https://10.1016/j.jclepro.2022.130535>

KANG, D. H. P.; CHEN, M.; OLADELE, A. O. Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 10, p. 5495–5503, 2013. <https://doi:10.1021/es400614y>

LACERDA, L. **Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. 1. ED. RIO DE JANEIRO: ED. COPPEAD/UFRJ, 2002.

LOCOROTONDO, E., DALESSANDRO, S., *et al.* **Impedance spectroscopy characterization of lithium batteries with different ages in second life application**. In 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1–6), 2020.

PEREIRA, L. A.; QUEIROZ, E. S.; COSTA, J. V. S.; QUEIROZ, V. N. A. Desafios e objetivos na implementação de modelos automobilísticos elétricos no Brasil. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 2, 12 p., 2024.

DUOSS, E.B. Batteries Need to be Greener and Ethical. **Nature**. v. 595, n. 7865, p 7, 2021.

RODRÍGUEZ, S. D. S.; SANTOS, J. P. dos. **Viabilidade da reciclagem e reutilização das baterias dos carros elétricos**. *Exacta*, São Paulo, v.24, e29279, p. 1-26, 2026.

SANTANA, D.W.S.; ALBUQUERQUE, L.S.L.; SILVA, L.R. **Mobilidade na Região Metropolitana do Recife: Uma análise da relação capitalista e da carência de alternativas para o deslocamento coletivo**. XVII Simpósio Nacional de Geografia Urbana – SIMPURB, 19 p. Curitiba, 2022.

SIXT. **Reciclagem de bateria de carro elétrico: o futuro sustentável da mobilidade**. <https://www.sixt.com.br/magazine/reciclagem-das-baterias-dos-carros-eletricos>, 2023.

STRUBEN, J., & STERMAN, J. D. Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. **Electronic Journal**, v.35, n.6, p.1070-1097, 2008. <https://DOI:10.2139/ssrn.881800>

SKEETE, J. P., WELLS, P., DONG, X., HEIDRICH, O., & HARPER, G. Beyond the Event horizon: Battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition. **Energy Research & Social Science**, v.69, 101581, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101581>

ZHU, ZHU; CIEZ, R. E. Comparing the energy and climate impacts of conventional lithium-ion and all-solid-state batteries. **EES Batteries, Royal Society of Chemistry**, v.2, p.835–848, 2026. <https://doi.org/10.1039/D6EB00058D>

WOLFFENBÜTTEL, Rodrigo Foresta. **Produção social da inovação: o automóvel elétrico e as redes de inovação no Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Sociologia,.2019.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela oportunidade concedida e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida a Galba Maria de Campos Takaki (Processo nº 312241/2022-4), apoios fundamentais para a ampliação das fronteiras científicas e para o fortalecimento das atividades acadêmicas do PPGDPA-UNICAP.