

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CICLO DE VIDA DAS BATERIAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Betim

2026

RYAN DE MOURA CARIAS

CICLO DE VIDA DAS BATERIAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

C277c Carias, Ryan de Moura

Ciclo de vida das baterias dos veículos elétricos / Ryan de Moura Carias. – 2026.

66 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

1. Veículos elétricos. 2. Sustentabilidade. 3. Baterias de lítio. 4. Avaliação ambiental. 5. Engenharia Mecânica. I. Carias, Ryan de Moura. II. Título.

CDU: 629.33



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 22 dias do mês de janeiro do ano de 2026, às dezoito horas, nas dependências do IFMG - *Campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gustavo Lobato Campos e demais membros, Flávio Magno de Carvalho Fonseca e Gabriel Mendes de Almeida Carvalho. Nesta ocasião o discente **Ryan de Moura Carias** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0063573 do IFMG - *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Ciclo de vida das baterias dos veículos elétricos” e foi **APROVADO**, com 80,0 (oitenta) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 10 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e quinze minutos. Para constar, eu, Gustavo Lobato Campos, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 22 de janeiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Lobato Campos, Professor**, em 22/01/2026, às 19:41, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Magno de Carvalho Fonseca, Professor**, em 22/01/2026, às 20:06, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Professor**, em 23/01/2026, às 09:48, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2593612** e o código CRC **2243C156**.

23792.000400/2024-27

2593073v1

RESUMO

Este trabalho é uma pesquisa bibliográfica que tem como objetivo analisar o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos (BEVs), com foco nos impactos ambientais, energéticos e regulatórios associados à sua produção, uso e destinação final. A pesquisa se fundamenta na aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normativas NBR ISO 14040 e 14044, integrando dados técnicos e estudos de caso nacionais e internacionais. A extração de insumos críticos como lítio, cobalto e alumínio foi examinada sob os aspectos hidrológicos, sociais e climáticos, evidenciando os desafios ambientais associados às cadeias extrativas e à geopolítica mineral. Em seguida, o trabalho avaliou o desempenho energético comparado entre veículos elétricos e convencionais, demonstrando superioridade dos BEVs em contextos com matriz elétrica renovável, como o brasileiro. A viabilidade de estratégias de reutilização e reciclagem também foi abordada, com ênfase na segunda vida das baterias e nos obstáculos tecnológicos e normativos ainda existentes. Os resultados obtidos indicam que a sustentabilidade da eletromobilidade depende de um conjunto articulado de políticas públicas, inovação industrial e responsabilidade compartilhada ao longo da cadeia de valor. A integração da ACV como instrumento técnico e estratégico permite orientar decisões mais eficientes e ambientalmente responsáveis para o futuro da mobilidade elétrica.

Palavras-chave: veículos elétricos; ciclo de vida; sustentabilidade; baterias de lítio; avaliação ambiental.

ABSTRACT

This study aims to analyze the life cycle of electric vehicle batteries (BEVs), focusing on the environmental, energy, and regulatory impacts related to their production, use, and end-of-life management. The research is based on the application of Life Cycle Assessment (LCA), in accordance with ISO 14040 and 14044 standards, integrating technical data and national and international case studies. The extraction of critical raw materials such as lithium, cobalt, and aluminum was examined in terms of hydrological, social, and climate-related impacts, highlighting environmental challenges within mineral supply chains and global resource geopolitics. The energy performance of electric versus conventional vehicles was assessed, revealing the superior efficiency of BEVs in countries with cleaner power grids, such as Brazil. Furthermore, the feasibility of reuse and recycling strategies was explored, especially the second life of batteries and the existing technological and regulatory barriers. Findings show that the sustainability of electromobility relies on coordinated public policies, industrial innovation, and shared responsibility throughout the value chain. LCA emerges as a key tool to support more efficient and environmentally sound decisions for the future of electric mobility.

Keywords: electric vehicles; life cycle; sustainability; lithium batteries; environmental assessment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa	7
1.2 Colocação do Problema.....	8
1.3 Objetivos	9
1.4 Organização do Trabalho.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Sustentabilidade	11
2.2 Produção e Tipos de Baterias.....	15
2.3 Políticas Públicas e Contexto Brasileiro	21
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Planejamento e definição do escopo.	35
3.2 Coleta e seleção de dados	36
3.3 Categorização e análise temática	37
3.4 Síntese e interpretação dos resultados	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Análise da Produção e Extração	32
4.2 Eficiência Energética e Emissões	47
4.3 Reciclagem, Reutilização e Segunda Vida.....	53
4.4 O Projeto de Lei nº 2132/2025	55
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Nas últimas décadas, a intensificação das mudanças climáticas e a crescente pressão por práticas sustentáveis têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias menos poluentes no setor de transportes. Nesse cenário, os veículos elétricos (VEs) vêm ganhando destaque como alternativa aos veículos movidos por combustíveis fósseis, por apresentarem menor emissão de gases de efeito estufa durante sua operação (FUJIMORI; ZHANG, 2020).

No Brasil, a expansão desse mercado tem sido significativa. Apenas no primeiro trimestre de 2024, a comercialização de veículos eletrificados cresceu 145%, consolidando-se como o segundo melhor resultado da série histórica (Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2024). Segundo projeções, espera-se que mais de um milhão de veículos elétricos estejam em circulação no país até 2030 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, 2024), o que coloca novos desafios à infraestrutura energética e à gestão dos resíduos gerados por essa tecnologia.

Entre os principais componentes dos VEs, as baterias de íons de lítio representam um dos maiores pontos de atenção, não apenas pela sua função central no funcionamento dos veículos, mas também pelo impacto ambiental associado ao seu ciclo de vida completo — desde a extração de matérias-primas críticas, como o lítio e o cobalto, até o descarte e a possibilidade de reutilização ou reciclagem (CHEN ET AL., 2019).

Considerando que a sustentabilidade dos veículos elétricos não pode ser avaliada unicamente com base nas emissões durante sua utilização, mas sim pela análise do ciclo de vida das baterias que os compõem, torna-se fundamental compreender todos os estágios de produção, uso, segunda vida e descarte desses dispositivos. Estudos como o de Aoyague (2024) e Romare e Dahllof (2017) mostram que as baterias podem representar até 40% da pegada de carbono de um VE ao longo de sua vida útil, o que evidencia a necessidade de estratégias mais robustas de reuso e reciclagem.

O avanço da eletromobilidade tem representado uma resposta concreta aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, pela escassez de recursos naturais e pela necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse

contexto, os veículos elétricos surgem como alternativa tecnológica capaz de promover a transição energética no setor de transportes, tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis. A crescente adoção desses veículos ao redor do mundo, e mais recentemente no Brasil, reflete tanto a evolução da indústria automotiva quanto a exigência por soluções ambientalmente responsáveis.

Contudo, embora os veículos elétricos apresentem benefícios operacionais em termos de emissões diretas, é necessário considerar todo o ciclo de vida de seus principais componentes para avaliar seu real impacto ambiental. As baterias, especialmente as de íons de lítio, representam uma etapa crítica nesse ciclo. Essa complexidade torna indispensável a análise dos aspectos técnicos, energéticos e ambientais envolvidos em cada fase do ciclo de vida das baterias, sobretudo frente ao aumento expressivo da demanda por esses dispositivos.

Diante disso, a realização deste estudo é justificada pela importância de compreender de forma sistêmica os impactos e desafios associados ao ciclo de vida das baterias utilizadas em veículos elétricos. Tal compreensão é essencial não apenas para embasar políticas públicas e decisões industriais mais sustentáveis, mas também para fomentar inovações tecnológicas voltadas à eficiência, à circularidade e à redução de impactos socioambientais em toda a cadeia produtiva envolvida. Para o engenheiro mecânico, esse conhecimento torna-se especialmente relevante diante dos desafios futuros do mercado, que exigem profissionais capazes de integrar sustentabilidade, tecnologia e desempenho econômico no desenvolvimento de soluções e processos produtivos mais responsáveis e competitivos.

1.2 Colocação do Problema

Embora os veículos elétricos sejam amplamente promovidos como uma alternativa sustentável à mobilidade convencional, é fundamental considerar os impactos ocultos associados à sua cadeia produtiva, especialmente no que se refere ao ciclo de vida das baterias de íons de lítio. A produção, o uso e, sobretudo, o descarte dessas baterias apresentam desafios significativos, tanto do ponto de vista ambiental quanto tecnológico. Estudos demonstram que, ao final da vida útil, esses componentes podem liberar substâncias tóxicas e representar riscos expressivos à saúde humana e ao meio ambiente, caso não sejam adequadamente reaproveitados ou reciclados (CHEN ET AL., 2019).

Além dos riscos de contaminação e poluição, há limites claros quanto à sustentabilidade dos processos existentes de recuperação de materiais, que ainda são economicamente restritos e tecnologicamente ineficientes em larga escala. De acordo com Freitas e Marchesini (2022), a ausência de uma cadeia consolidada de reaproveitamento no contexto brasileiro agrava esse cenário, dificultando a implementação de práticas baseadas na economia circular e comprometendo os ganhos ambientais atribuídos aos veículos elétricos. A escassez de políticas públicas integradas e de incentivos à reciclagem também reforça a vulnerabilidade do sistema como um todo.

Romare e Dahllof (2017) ressaltam ainda que, quando analisado de forma completa, o ciclo de vida das baterias de íons de lítio pode gerar emissões relevantes de gases de efeito estufa, especialmente nas fases de extração e manufatura. Esses dados contradizem parcialmente a narrativa dominante de neutralidade de carbono associada aos veículos elétricos e apontam para a necessidade de uma abordagem crítica e sistêmica para o tema. Assim, o presente trabalho parte da seguinte problemática: analisar aspectos da sustentabilidade ambiental e tecnológica do ciclo de vida das baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos, especialmente no estágio pós-uso.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o ciclo de vida das baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos, com foco na identificação dos impactos ambientais e tecnológicos nas etapas de produção, uso, segunda vida e descarte, de modo a concentrar um estudo sobre o tema de forma a apresentar algo que favoreça uma discussão dessas práticas mais sustentáveis.

Objetivos específicos:

- Levantar os principais conceitos teóricos sobre ciclo de vida, sustentabilidade industrial e economia circular aplicados ao setor automotivo;
- Identificar os materiais críticos envolvidos na fabricação de baterias de íons de lítio e os impactos ambientais associados à sua extração;
- Avaliar os modelos atuais de uso, reutilização e reciclagem de baterias elétricas, com ênfase nas limitações tecnológicas e operacionais;

- Investigar os desafios enfrentados no Brasil em relação à destinação final das baterias de veículos elétricos;
- Avaliar o descarte das baterias após seu fim vida útil.

1.4 Organização do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, além dos elementos pré e pós-textuais, visando uma apresentação lógica e progressiva do tema proposto.

No Capítulo 1, realiza-se a introdução ao tema, apresentando a justificativa, a delimitação do problema, os objetivos da pesquisa e a organização do trabalho. O Capítulo 2 é dedicado à fundamentação teórica, abordando os conceitos essenciais sobre ciclo de vida de produtos, sustentabilidade, economia circular, materiais críticos e os aspectos ambientais e tecnológicos relacionados às baterias de íons de lítio. Nesse capítulo também são apresentados o cronograma e os recursos previstos para a realização da pesquisa.

O Capítulo 3 contempla a metodologia adotada na elaboração do trabalho, especificando o tipo de pesquisa, as fontes utilizadas e os procedimentos de análise. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da revisão técnica e científica, discutindo criticamente os dados, limitações e potencialidades das soluções existentes. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa, sintetizando os principais achados e sugerindo caminhos para estudos futuros e melhorias na gestão sustentável das baterias utilizadas em veículos elétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Sustentabilidade

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta analítica reconhecida internacionalmente que visa quantificar os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até a disposição final (ABNT, 2009). Ao fornecer uma abordagem sistêmica, a ACV permite identificar pontos críticos de impacto ambiental, orientando tomadas de decisão sustentáveis (UNEP, 2020). Essa metodologia vem sendo cada vez mais incorporada à política industrial e ambiental em diversas nações como instrumento de gestão integrada.

A normatização internacional dessa abordagem foi consolidada por meio da série ISO 14040, adotada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. A NBR ISO 14040 estabelece os princípios e a estrutura da ACV, delineando as quatro fases fundamentais do processo: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a). Essa padronização contribui para garantir consistência técnica, comparabilidade entre estudos e credibilidade científica.

Já a NBR ISO 14044 complementa a anterior ao detalhar os requisitos metodológicos para a condução de cada fase da avaliação, incluindo critérios para seleção de dados, análise de sensibilidade e verificação de qualidade (ABNT, 2009b). Essa norma proporciona maior robustez aos estudos de ACV, tornando-os replicáveis e auditáveis, o que é essencial para aplicações industriais e políticas públicas. Assim, ambas as normas são essenciais para garantir a legitimidade técnica das análises.

Com a adoção dessas normas, a ACV passou a ser vista não apenas como uma ferramenta ambiental, mas também como um recurso estratégico para inovação sustentável. Empresas que aplicam a metodologia conseguem, por exemplo, identificar gargalos ambientais na cadeia produtiva e propor soluções com base em dados empíricos. Isso fortalece sua posição em mercados que exigem responsabilidade socioambiental como diferencial competitivo (THE LIFE CYCLE INITIATIVE, 2022).

No Brasil, a aplicação da ACV vem se consolidando lentamente, com destaque para setores como energia, construção civil, mineração e indústria automotiva. Um

estudo de Willers et al. (2013) identificou que, apesar do crescimento das publicações nacionais sobre ACV, ainda há escassez de bancos de dados nacionais específicos e dificuldades técnicas na obtenção de informações representativas do contexto brasileiro. Isso limita o real potencial da ferramenta. Ainda segundo os autores, o desenvolvimento de infraestrutura científica e institucional é indispensável para garantir a eficácia da ACV no país. Mesmo que muitas pesquisas utilizem dados estrangeiros adaptados, essa prática compromete a fidelidade das análises, gerando incertezas e margens de erro significativas. Portanto, a construção de inventários nacionais confiáveis deve ser uma prioridade para a consolidação da ACV no Brasil (WILLERS et al., 2013).

A aplicação da ACV em cadeias produtivas também tem sido abordada sob a ótica da logística e do suprimento industrial. Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009) argumentam que a ACV contribui para uma visão mais abrangente da cadeia de suprimentos, promovendo uma gestão integrada e ambientalmente consciente dos processos logísticos. Essa integração permite identificar os elos mais impactantes da cadeia e propor intervenções corretivas eficazes.

A análise sistêmica promovida pela ACV também facilita a implementação de práticas como logística reversa e reaproveitamento de materiais, contribuindo para a redução do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do produto. Conforme destacam Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009), a ACV é um instrumento que fortalece os princípios da sustentabilidade industrial ao promover decisões embasadas em dados técnicos e ambientais.

A perspectiva do pensamento de ciclo de vida, ou *life cycle thinking*, propõe que produtos, processos e serviços sejam concebidos desde o início considerando seus impactos ambientais e sociais. Essa abordagem, promovida por organizações como o *United Nations Environment Program*, visa internalizar externalidades ambientais nos processos decisórios, fortalecendo o compromisso com o desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM, 2007).

Como destaca a *Life Cycle Initiative*, iniciativa global apoiada pela ONU:

O pensamento de ciclo de vida ajuda empresas, governos e consumidores a tomar decisões mais informadas, conscientes dos impactos ambientais ao longo do tempo e do espaço. Isso significa olhar além do uso imediato e considerar os efeitos ambientais da produção, uso e descarte. Somente com essa perspectiva abrangente é possível minimizar impactos reais e evitar a

simples transferência de danos ambientais de uma fase do ciclo de vida para outra (THE LIFE CYCLE INITIATIVE, 2022, p.21).

A adoção do pensamento de ciclo de vida permite substituir abordagens fragmentadas por uma análise sistêmica das consequências ambientais de processos produtivos. Esse modelo amplia a compreensão dos impactos ao longo do tempo, do espaço e das interações entre as etapas da cadeia. A *The Life Cycle Initiative* (2022) destaca que decisões tomadas isoladamente em uma fase podem deslocar os impactos para outra, o que reforça a importância de considerar o ciclo de vida completo para decisões sustentáveis.

A ferramenta da ACV tem sido aplicada de forma crescente na comparação entre tecnologias e alternativas materiais em diversos setores produtivos. No caso das baterias de íons de lítio, o uso da ACV tem permitido compreender que os ganhos ambientais durante o uso veicular podem ser compensados por impactos negativos na extração de recursos ou na disposição final. Essa abordagem exige uma avaliação técnica rigorosa com base em dados padronizados e critérios transparentes (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

A aplicação da ACV envolve a análise de múltiplas categorias de impacto, como potencial de aquecimento global, toxicidade humana, eutrofização e acidificação, entre outras. A consideração desses fatores amplia o alcance da ferramenta e evita que decisões sejam pautadas apenas por indicadores isolados como emissões diretas de CO₂. A *United Nations Environment Program* (2007) observa que essa visão ampliada é fundamental para a internalização dos custos ambientais nas decisões produtivas.

A utilização da ACV no contexto brasileiro tem enfrentado desafios metodológicos, mas apresenta avanços significativos em termos de disseminação acadêmica e técnica. Willers et al. (2013) identificaram um crescimento expressivo do número de publicações e estudos técnicos aplicando ACV no Brasil, embora apontem limitações na disponibilidade de inventários nacionais e na capacitação técnica de profissionais da área. Essa limitação metodológica compromete a precisão de muitos resultados.

As cadeias de suprimentos de alta complexidade demandam ferramentas que permitam o mapeamento preciso dos fluxos de entrada e saída de recursos e resíduos. A ACV contribui com esse diagnóstico ao revelar os pontos críticos de

impactos em cada elo da cadeia produtiva. Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009) argumentam que, ao permitir a rastreabilidade ambiental dos processos, a ACV favorece estratégias de mitigação orientadas à eficiência, inovação e redução de perdas.

A articulação entre gestão da cadeia de suprimentos e análise do ciclo de vida fortalece o posicionamento estratégico das empresas diante das exigências regulatórias e de mercado. A possibilidade de rastrear e mensurar impactos ambientais fornece um diferencial competitivo às organizações que adotam modelos de produção sustentáveis. Essa prática também atende às exigências crescentes de transparência por parte de consumidores e investidores (BARBIERI; CAJAZEIRA; BRANCHINI, 2009).

A incorporação da ACV em processos de licenciamento ambiental e certificação ecológica amplia a robustez técnica desses mecanismos. A metodologia, ao considerar o ciclo completo, evita análises simplistas baseadas apenas na fase de uso dos produtos. Conforme destaca Willers et al. (2013), a adoção da ACV em políticas públicas brasileiras tende a fortalecer a regulação ambiental, fornecendo instrumentos de controle baseados em evidências técnico-científicas confiáveis.

A abordagem de ciclo de vida também impõe a reconfiguração da lógica linear predominante no modelo industrial convencional. A responsabilidade ambiental, nesse contexto, é compartilhada entre todos os agentes da cadeia, desde a extração da matéria-prima até o destino final dos resíduos. A *United Nations Environment Program* (2007) defende que esse reposicionamento de responsabilidades estimula práticas de ecodesign, logística reversa e economia circular.

A consolidação da ACV como instrumento de planejamento ambiental depende do fortalecimento de bases de dados regionais e da capacitação técnica contínua de pesquisadores e gestores. O estudo de Willers et al. (2013) ressalta que a carência de inventários adaptados ao contexto brasileiro limita a validade dos resultados obtidos com metodologias genéricas. Esse desafio requer esforços coordenados entre academia, setor produtivo e instituições normativas nacionais.

A ACV deve ser vista como parte de um sistema mais amplo de ferramentas para a gestão ambiental integrada. Sua efetividade está condicionada à adoção de critérios técnicos consistentes, à integração entre atores e ao uso estratégico das informações geradas. A *The Life Cycle Initiative* (2022) ressalta que essa abordagem

oferece subsídios robustos para decisões conscientes, orientadas pela minimização de impactos cumulativos e pela melhoria contínua das práticas produtivas.

Na ACV, um dos indicadores mais utilizados nas avaliações ambientais é a pegada de carbono, que quantifica a totalidade das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas, direta ou indiretamente, a um produto, processo ou sistema, expressas em equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e). Tal métrica é essencial para identificar os principais pontos de emissão ao longo do ciclo de vida das baterias e orientar estratégias de mitigação, como o uso de fontes renováveis, a melhoria da eficiência energética e a redução de impactos nas etapas de extração e manufatura (WIEDMANN; MINX, 2008; IPCC, 2021).

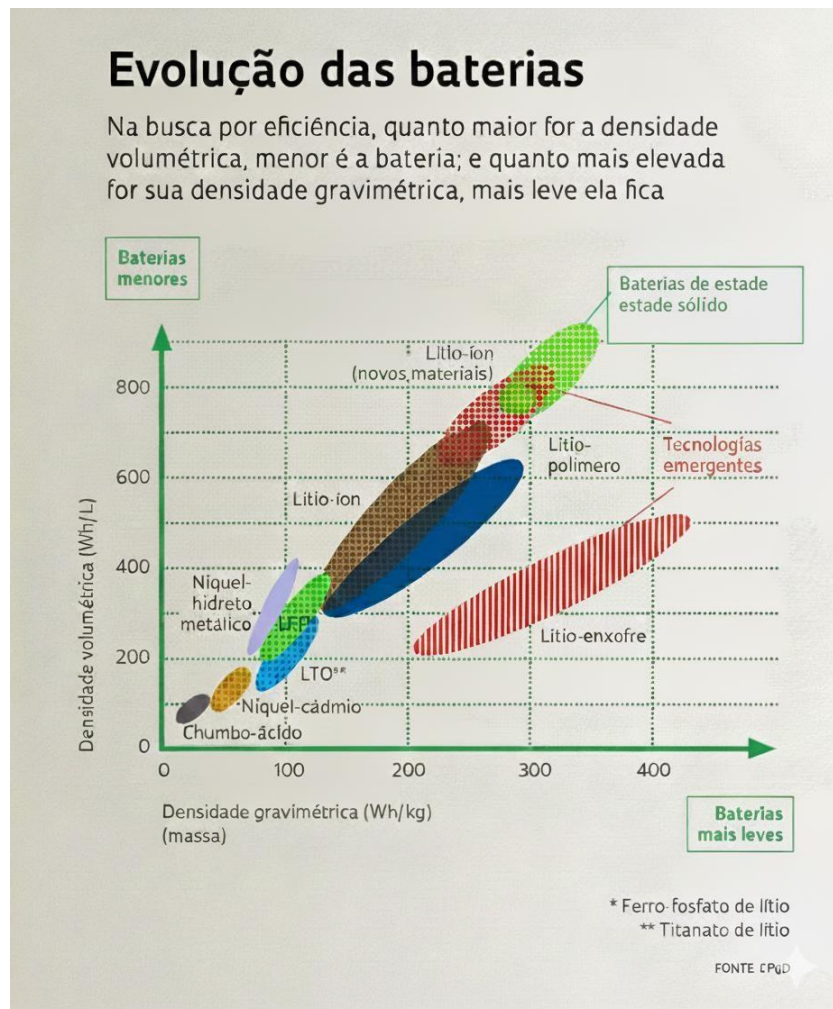
2.2 Produção e Tipos de Baterias

A transição global rumo à eletromobilidade tem como elemento central o desenvolvimento e aprimoramento das baterias recarregáveis, que representam o coração tecnológico dos veículos elétricos. Entre os diversos tipos existentes, as baterias de íons de lítio consolidaram-se como padrão dominante no setor automotivo devido à sua alta densidade energética, longa vida útil e desempenho consistente em diferentes condições operacionais (Zubi et al., 2018).

A evolução dessa tecnologia ao longo das últimas décadas foi impulsionada tanto por pressões ambientais quanto pela necessidade de soluções energéticas mais eficientes. Inicialmente restritas a dispositivos eletrônicos, as baterias de íons de lítio passaram por avanços significativos em termos de segurança, estabilidade térmica e capacidade de carga, possibilitando sua aplicação em escala veicular (Ehsani et al., 2004).

De acordo com a *Korea Battery Industry Association* (2017), a densidade energética é definida como a quantidade de energia que pode ser armazenada em um único sistema por unidade de volume ou por unidade de peso. Atualmente, o mercado automotivo é dominado por três principais composições químicas: Níquel-Mangânese-Cobalto (NMC), Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA) e Ferro-Fosfato de Lítio (LFP). Cada uma apresenta vantagens e desvantagens específicas em termos de autonomia, durabilidade e custo, sendo a LFP a mais segura e estável termicamente, embora com menor densidade energética (Zubi et al., 2018). A Figura 1 a seguir, realiza uma comparação entre densidade energética e os tipos de materiais das baterias.

Figura 1 – Comparativo dos materiais e densidade energética



Fonte: SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). Baterias de carros elétricos: evolução. 2017. Disponível em:

<https://seniautomobilistica113.blogspot.com/2017/12/baterias-de-carros-eletricos-evoluem.html>.

Acesso em: 20 nov. 2025

A escolha do tipo de bateria está fortemente associada ao segmento do veículo, clima de operação e estratégia de mercado adotada pelos fabricantes. Além disso, inovações emergentes, como baterias de estado sólido (Solid-State Batteries – SSB), vêm sendo testadas para superar limitações estruturais dos modelos convencionais, visando maior densidade energética e menores riscos de combustão (ZUBI ET AL., 2018). As baterias de estado sólido representam uma evolução tecnológica em relação às baterias de íons de lítio convencionais, pois substituem o eletrólito líquido por um eletrólito sólido, que pode ser cerâmico, vítreo ou polimérico. Essa modificação estrutural melhora significativamente a segurança, uma vez que eletrólitos sólidos são não inflamáveis, reduzindo o risco de fuga térmica e incêndios comuns em sistemas

tradicionais (GOODENOUGH; KIM, 2010). Além disso, a maior estabilidade eletroquímica dos eletrólitos sólidos possibilita a utilização de ânodos metálicos de lítio, o que eleva a densidade energética das SSB para valores que podem ultrapassar 400–500 Wh/kg, superando limites das baterias atuais de íons de lítio (NAKAMURA et al., 2021). Outro diferencial importante é o seu potencial de maior ciclo de vida e menor degradação, decorrentes da estabilidade química dos materiais sólidos, favorecendo aplicações automotivas e estacionárias (TARASCON; ARENZ, 2022).

Tais inovações também envolvem melhorias no gerenciamento eletrônico das baterias. Os sistemas de *Battery Management System* (BMS) são responsáveis por monitorar e equilibrar as células, controlar a temperatura, prevenir sobrecargas e maximizar a vida útil do conjunto, sendo uma peça-chave na confiabilidade e desempenho do *powertrain* elétrico automotivo (EHSANI et al., 2004).

O desempenho das baterias está intimamente ligado à sua integração com a arquitetura dos veículos elétricos. A disposição das células no módulo, o gerenciamento térmico e a compatibilidade com os sistemas de carregamento influenciam diretamente a eficiência energética e a autonomia dos automóveis. Essa interação exige um balanceamento técnico complexo entre peso, volume e capacidade de armazenamento (EHSANI et al., 2004).

Do ponto de vista eletroquímico, o princípio de funcionamento das baterias de íons de lítio baseia-se na reversibilidade da migração de íons entre o ânodo (geralmente grafite) e o cátodo (geralmente óxidos de metais de transição), através de um eletrólito orgânico. Esse processo garante elevado número de ciclos de carga e descarga com perdas mínimas de capacidade, tornando-as ideais para aplicações veiculares (ZUBI et al., 2018).

No entanto, o desempenho das baterias depende não apenas do projeto eletroquímico, mas também da qualidade e da origem das matérias-primas utilizadas. Elementos como lítio, cobalto, níquel e manganês são considerados críticos por seu papel funcional nas reações e por sua escassez relativa no contexto geopolítico e econômico global (COBALT INSTITUTE, 2020).

A demanda crescente por tais matérias-primas tem acentuado a pressão sobre cadeias de suprimento minerais, em especial no chamado “triângulo do lítio” (Chile, Argentina e Bolívia), bem como na República Democrática do Congo, principal fornecedor mundial de cobalto. Essas regiões concentram reservas estratégicas, mas

enfrentam desafios estruturais, sociais e ambientais severos (COBALT INSTITUTE, 2020).

O mapeamento dessas cadeias evidencia a complexidade envolvida no fornecimento de materiais essenciais para a mobilidade elétrica. Do ponto de vista logístico, questões como transporte seguro, rastreabilidade da origem, e conformidade ambiental são fatores cada vez mais relevantes para a legitimidade e sustentabilidade da produção de baterias (Cobalt Institute, 2020).

O lítio, componente essencial das baterias de alto desempenho, é extraído predominantemente de salmouras em regiões áridas da América do Sul, exigindo grande volume de água doce em processos de evaporação solar. Esse uso intensivo de recursos hídricos em ecossistemas frágeis levanta preocupações quanto à sustentabilidade ambiental da cadeia de produção (Flexer et al., 2018).

Além do impacto hídrico, a extração de lítio em salmouras altera o balanço hidrogeoquímico das regiões de mineração. A salinização de aquíferos, a perda de biodiversidade e a degradação de áreas tradicionais de cultivo e pasto afetam diretamente comunidades indígenas e modos de vida locais, comprometendo a justiça ambiental associada à mobilidade limpa (Flexer et al., 2018).

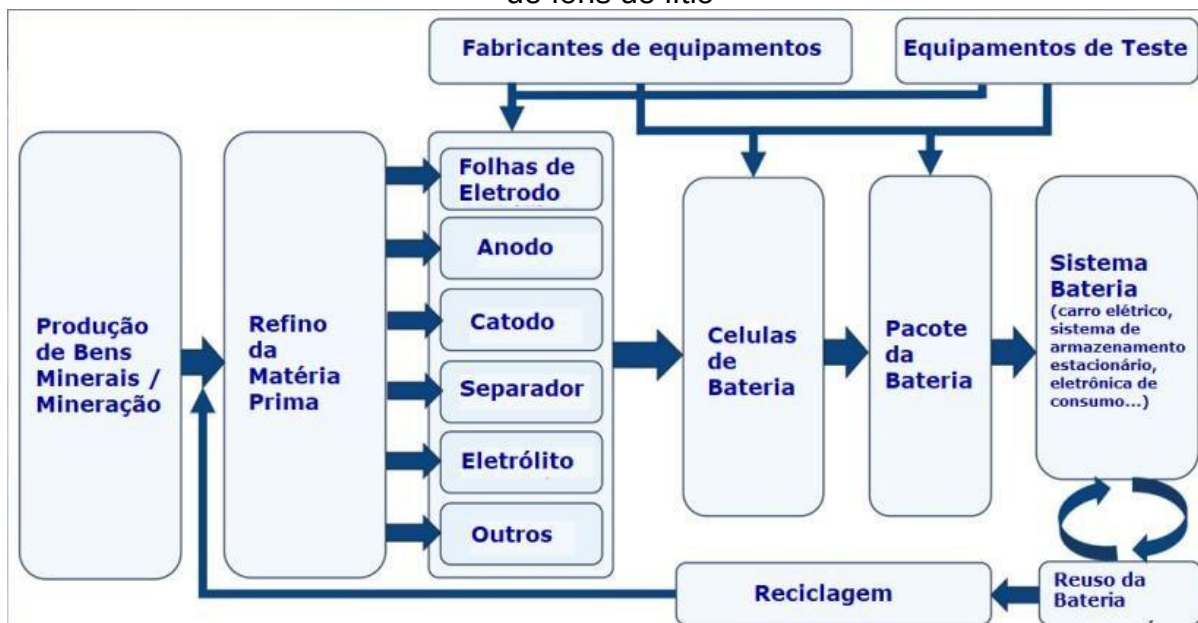
No caso do cobalto, as implicações socioambientais são ainda mais críticas. A mineração artesanal e em pequena escala na África Central, muitas vezes conduzida em condições precárias e com trabalho infantil, suscita debates éticos profundos sobre o real custo humano da transição energética baseada em baterias de íons de lítio (Cobalt Institute, 2020).

Em novembro de 2025, ao menos 32 garimpeiros morreram após o colapso de uma ponte na mina de cobalto de Kalandu, na província de Lualaba, na República Democrática do Congo. A tragédia ocorreu em meio a condições inseguras de mineração artesanal e tensão com militares no local.” (ISN Online, 2025)

Em termos ambientais, a extração e o processamento dessas matérias-primas geram emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia intensivo e resíduos sólidos perigosos. Embora os veículos elétricos emitam menos durante sua operação, a pegada de carbono associada à sua produção — sobretudo das baterias — pode ser significativa caso não haja controle rigoroso sobre as fontes e práticas de mineração (Flexer et al., 2018).

A Figura 2, a seguir, apresenta uma visão esquemática do ciclo produtivo das baterias de íons de lítio, destacando as principais etapas desde a mineração dos insumos até o uso final nos veículos elétricos:

Figura 2 – Cadeia global de suprimentos de matérias-primas críticas para baterias de íons de lítio



Fonte: Adaptado de Cobalt Institute (2020).

A geopolítica das matérias-primas essenciais às baterias de íons de lítio influencia diretamente a segurança energética dos países que investem na eletrificação da frota. A concentração da produção em poucos territórios politicamente instáveis acarreta riscos de fornecimento e expõe os fabricantes a flutuações de preços e interrupções logísticas severas (Cobalt Institute, 2020).

Esse cenário tem impulsionado iniciativas de diversificação da origem dos materiais e de desenvolvimento de tecnologias de reciclagem. Investimentos em mineração urbana e em reaproveitamento de baterias descartadas emergem como estratégias para mitigar dependências geográficas e reduzir os impactos ambientais da extração primária (Zubi et al., 2018).

Do ponto de vista técnico, a substituição de componentes críticos como o cobalto por alternativas mais abundantes tem sido objeto de intenso desenvolvimento. Cátodos com menor teor de cobalto ou baseados em ferro e fosfato (como o LFP – lítio-ferro-fosfato) buscam balancear desempenho, custo e sustentabilidade, embora ainda apresentem desafios de densidade energética (Ehsani et al., 2004).

O avanço dessas tecnologias alternativas depende da superação de barreiras relacionadas à estabilidade térmica, ao número de ciclos e à eficiência de carga. Ao mesmo tempo, é necessário garantir a escalabilidade da produção e a compatibilidade com a infraestrutura já consolidada para baterias baseadas em íons de lítio tradicionais (Zubi et al., 2018).

Essas inovações evidenciam que o aprimoramento da tecnologia de baterias deve ocorrer em paralelo à transformação das cadeias produtivas, com foco em eficiência energética, responsabilidade ambiental e justiça social. A mobilidade elétrica só será verdadeiramente sustentável se contemplar toda a trajetória material e energética de seus componentes, desde a extração até o descarte final (Flexer et al., 2018).

A articulação entre inovação tecnológica e políticas públicas é determinante para mitigar os impactos negativos da produção de baterias. Nesse contexto, os critérios Ambiental, Social e de Governança (ESG), que avaliam impactos ambientais, respeito aos direitos humanos e práticas éticas de gestão vêm sendo incorporados em regulações internacionais como forma de pressionar fabricantes e mineradoras a adotarem cadeias produtivas mais responsáveis. Esses critérios são particularmente relevantes para o setor de baterias, dada a elevada pegada ambiental da mineração de lítio e cobalto e as recorrentes denúncias de violações sociais em países produtores, como a República Democrática do Congo (Cobalt Institute, 2020).

Nesse contexto, surgem também iniciativas transnacionais que buscam padronizar a sustentabilidade da mineração e promover o uso ético de recursos minerais. Certificações como o *Cobalt Industry Responsible Assessment Framework* (CIRAF) têm como objetivo assegurar que a cadeia produtiva esteja alinhada com princípios de direitos humanos, conservação ambiental e transparência (Cobalt Institute, 2020).

Enquanto isso, o avanço das pesquisas em baterias de próxima geração — como as baterias de estado sólido ou de lítio-enxofre — representa uma alternativa promissora para reduzir os impactos do modelo atual. Essas novas tecnologias têm potencial para oferecer maior densidade energética, menor risco de combustão e menor dependência de materiais escassos ou tóxicos (Zubi et al., 2018).

No entanto, essas soluções ainda enfrentam obstáculos técnicos e econômicos que impedem sua adoção em larga escala. Desafios como degradação acelerada, custos elevados de produção e a necessidade de adaptação das linhas industriais

existentes exigem um período de maturação tecnológica que ainda pode levar anos (Ehsani et al., 2004).

Assim, compreende-se que o futuro da mobilidade elétrica não depende apenas da difusão dos veículos em si, mas da construção de uma cadeia produtiva que seja ambientalmente resiliente, socialmente justa e tecnicamente segura. A sustentabilidade das baterias de íons de lítio será tanto maior quanto mais integradas forem as estratégias de inovação, regulação e reaproveitamento dos seus componentes fundamentais (Flexer et al., 2018; Zubi et al., 2018).

O descarte e a reciclagem de baterias de veículos elétricos constituem uma etapa crítica para a sustentabilidade da mobilidade elétrica, pois essas baterias exigem processos específicos de manejo devido à presença de metais valiosos e substâncias potencialmente perigosas. Estudos apontam que, após o fim da vida útil no veículo, as baterias podem ser direcionadas para aplicações de “segunda vida”, como armazenamento estacionário de energia, antes de seguirem para reciclagem (Gaines, 2018). Os métodos mais empregados atualmente são a pirometalurgia e a hidrometalurgia, capazes de recuperar materiais como lítio, níquel e cobalto, embora a reciclagem direta (“direct recycling”) venha ganhando destaque por preservar estruturas do cátodo e reduzir custos energéticos (Harper et al., 2019). Além disso, agências como a *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA, 2023) ressaltam a necessidade de sistemas eficientes de logística reversa para garantir segurança no transporte, na triagem e no desmonte das baterias. No contexto brasileiro, a literatura destaca a importância de desenvolver infraestrutura nacional de reciclagem e regulamentações específicas de responsabilidade compartilhada, alinhando-se às diretrizes de economia circular e mitigação de impactos ambientais (Santanna et al., 2021).

2.3 Políticas Públicas e Contexto Brasileiro

A transição para a eletromobilidade é, por definição, um processo dependente da atuação estratégica do Estado. O desenvolvimento de tecnologias limpas, a expansão da infraestrutura de recarga e o estímulo à produção de veículos elétricos só ocorrem de forma sustentável quando amparados por políticas públicas consistentes e contínuas. Nesse cenário, o Brasil ainda trilha os primeiros passos,

enfrentando desafios estruturais e regulatórios que comprometem o ritmo dessa transformação (SANTOS et al., 2021).

As políticas públicas voltadas à eletromobilidade devem ser entendidas como instrumentos que alinham objetivos ambientais, tecnológicos e industriais em uma agenda integrada de desenvolvimento sustentável. Sua importância vai além do incentivo à compra de veículos: envolvem regulamentações técnicas, investimentos em pesquisa e inovação, e incentivos fiscais à cadeia produtiva. A ausência ou fragilidade dessas diretrizes pode atrasar a competitividade nacional frente ao cenário global (IRENA, 2017).

Desde 2010, diversos países passaram a implementar marcos regulatórios ambiciosos voltados à descarbonização dos transportes. Na Europa, o banimento progressivo de veículos movidos a combustíveis fósseis e o fomento à infraestrutura de recarga têm impulsionado o mercado de veículos elétricos. A China, por sua vez, adotou políticas industriais agressivas de apoio à produção de baterias, tornando-se referência mundial no setor (IRENA, 2017).

O Brasil, embora tenha sido historicamente caracterizado por políticas fragmentadas voltadas à eletromobilidade, nos últimos anos houve avanços institucionais significativos. A criação da Secretaria Nacional de Eletromobilidade, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, em 2025, representa um marco na tentativa de integrar o planejamento energético e a transição para veículos elétricos (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2025). Da mesma forma, a regulamentação do Programa Mobilidade Verde e Inovação (MOVER) consolidou diretrizes técnicas e ambientais para a indústria automotiva, incluindo parâmetros de eficiência energética, desempenho ambiental e reciclabilidade (GOVERNO FEDERAL, 2025a). Somado a isso, a atuação da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME) tem contribuído para a formulação de metas estratégicas e disseminação de estudos de referência no setor (PNME, 2025). O Plano de Transformação Ecológica, lançado em âmbito federal, reforça essa agenda ao estruturar políticas de descarbonização e inovação industrial (GOVERNO FEDERAL, 2025b). Apesar desses avanços, ainda não existe uma lei federal única que consolide todas as diretrizes da mobilidade elétrica, permanecendo em tramitação diferentes iniciativas estaduais e municipais relacionadas a infraestrutura de recarga e incentivos fiscais (LATAM MOBILITY, 2025). Assim, observa-se um movimento de transição: da desarticulação para uma estrutura de governança mais coordenada.

Segundo Irena (2017) a elaboração de um arcabouço regulatório coordenado é fundamental para viabilizar a eletromobilidade como política de Estado e não apenas como uma iniciativa pontual. Isso implica integrar políticas de transporte, energia, meio ambiente e desenvolvimento industrial, criando sinergias capazes de acelerar a transição energética nacional.

A principal política regulatória brasileira voltada à eficiência energética veicular é o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), coordenado pelo INMETRO. Essa iniciativa permite ao consumidor comparar o desempenho energético dos veículos comercializados no país, inclusive os elétricos, promovendo maior conscientização e incentivando fabricantes a melhorar a eficiência de seus modelos (INMETRO, 2024). No entanto, sua abrangência ainda é limitada e carece de integração com estratégias de incentivo direto à eletromobilidade.

Além disso, alguns estados brasileiros têm adotado incentivos fiscais pontuais, como isenção do IPVA e prioridade em estacionamentos públicos, para fomentar a aquisição de veículos elétricos. Embora essas medidas sinalizem uma abertura institucional ao tema, sua aplicação descoordenada entre as unidades federativas prejudica a eficácia nacional. Falta uma política unificada que crie segurança jurídica e previsibilidade para consumidores e fabricantes (SANTOS et al., 2021).

Outro gargalo relevante está na ausência de padronização técnica dos carregadores e das redes de recarga. Sem regulamentação federal clara, o crescimento da infraestrutura ocorre de forma desordenada, com padrões distintos entre fabricantes e operadores. Essa lacuna regulatória dificulta a interoperabilidade e limita a confiança do consumidor no sistema de abastecimento elétrico, comprometendo a adesão ao modal (ABVE, 2022).

Paralelamente, o país ainda não desenvolveu mecanismos robustos de fomento à cadeia produtiva nacional de baterias e componentes eletrônicos. A ausência de incentivos à pesquisa, à industrialização local e à formação técnica impede a consolidação de um ecossistema competitivo e sustentável. Isso nos torna dependentes de importações, afetando a balança comercial e a soberania tecnológica brasileira (IRENA, 2017).

Sem um plano estratégico que articule todos os elos da eletromobilidade — desde a mineração até a destinação final dos componentes —, o Brasil corre o risco de se tornar apenas um mercado consumidor passivo, incapaz de gerar valor interno a partir da revolução elétrica global. A implantação de políticas públicas integradas é

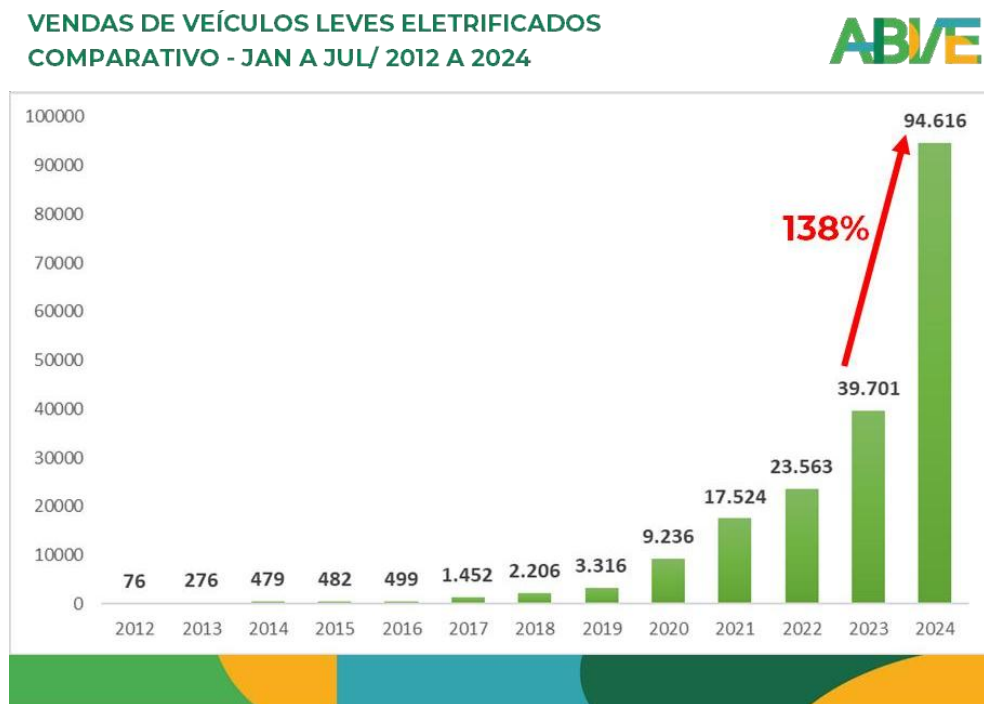
urgente para que o país se posicione com protagonismo nessa nova matriz de mobilidade (SANTOS et al., 2021).

Para além dos aspectos regulatórios e fiscais, a eletromobilidade demanda investimento direto em infraestrutura energética. Isso inclui a ampliação da capacidade de geração limpa, a modernização das redes de distribuição e a garantia de estabilidade no fornecimento. Sem esse suporte técnico, a massificação dos veículos elétricos pode gerar sobrecarga no sistema e comprometer metas climáticas (SANTOS et al., 2021).

A atuação do INMETRO no âmbito do PBEV é um ponto de partida importante, mas ainda tímido frente às necessidades estruturais do setor. O programa oferece dados técnicos sobre eficiência energética, autonomia e emissões indiretas, elementos fundamentais para a construção de políticas mais completas. Contudo, a ausência de metas regulatórias obrigatórias enfraquece seu potencial transformador (INMETRO, 2024).

Nesse contexto, o papel da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) tem sido crucial no monitoramento do mercado e na articulação com o setor público. Em seus relatórios, a entidade destaca o crescimento exponencial das vendas de BEVs no Brasil, mas alerta para a necessidade urgente de planejamento estatal. A falta de previsibilidade nas ações governamentais representa um risco à consolidação do setor (ABVE, 2022). A Figura 3 apresenta a evolução anual dos veículos eletrificados no mercado brasileiro, evidenciando o aumento progressivo da demanda, mas também a oscilação causada por incentivos esporádicos e descontinuidade de políticas públicas.

Figura 3 – Evolução da comercialização de veículos eletrificados no Brasil (2012–2024)



É importante considerar também a carência de políticas voltadas à capacitação técnica da mão de obra. A eletrificação da frota demanda novos perfis profissionais, desde engenheiros de sistemas de potência até técnicos especializados em manutenção de baterias. Sem investimento na formação profissional, o Brasil enfrentará gargalos operacionais que podem limitar a expansão do setor (IRENA, 2017).

Adicionalmente, o desenvolvimento de normas técnicas específicas para veículos elétricos, baterias e infraestrutura de recarga é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade dos sistemas envolvidos. A ausência dessas normativas compromete a padronização do mercado, gerando incertezas regulatórias que inibem investimentos de longo prazo por parte da indústria automotiva e de energia (INMETRO, 2024).

Segundo a ABVE (2022), o avanço dos veículos elétricos no país é freado também pela falta de incentivos robustos à produção nacional. Atualmente, o Brasil importa praticamente todos os componentes críticos — como baterias,

semicondutores e sistemas eletrônicos — o que eleva os custos, dificulta a escalabilidade da produção e compromete a autonomia tecnológica do país nesse segmento estratégico.

Um plano nacional estruturado exigiria políticas públicas articuladas com metas claras, incentivos fiscais amplos e linhas de financiamento específicas para pesquisa, desenvolvimento e inovação. Além disso, seria necessário integrar os setores de energia, transportes, meio ambiente e indústria, criando um ecossistema funcional para a eletromobilidade. Sem essa articulação intersetorial, as ações permanecem fragmentadas e ineficazes (SANTOS et al., 2021).

De acordo com IRENA (2017), experiências internacionais bem-sucedidas, como as da Noruega, Holanda e China, demonstram que políticas públicas consistentes, com incentivos fiscais, metas obrigatórias e investimento em infraestrutura, são determinantes para acelerar a adoção de veículos elétricos. Esses países atuaram de forma coordenada e estratégica, garantindo uma transição energética eficiente, sustentável e socialmente justa. Nas palavras de Santos et al. (2021, p. 242):

A eletromobilidade no Brasil ainda carece de um plano integrado que considere as especificidades regionais, o perfil da matriz energética nacional e as demandas da indústria automotiva. Políticas pontuais, sem continuidade e sem integração setorial, limitam o potencial transformador da tecnologia elétrica.

O fortalecimento da indústria nacional de veículos elétricos depende também da reestruturação da política industrial brasileira. Atualmente, não há um marco legal específico que trate da eletromobilidade de forma abrangente. A criação de uma política nacional para veículos elétricos poderia orientar investimentos, estabelecer prioridades tecnológicas e definir metas de longo prazo, alinhadas aos compromissos climáticos internacionais (IRENA, 2017).

Santos et al., (2021) destaca que, outro fator estratégico é a regionalização das políticas públicas. A realidade de infraestrutura energética, transporte urbano e consumo automotivo varia significativamente entre as regiões brasileiras. Portanto, políticas uniformes tendem a ser ineficazes. A adaptação regional das estratégias de incentivo e infraestrutura pode aumentar a eficiência das ações públicas e facilitar a integração das tecnologias elétricas ao cotidiano das cidades.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), ainda que limitado, representa uma base importante para a coleta de dados e o desenvolvimento de *benchmarks* regulatórios. Sua expansão para incluir parâmetros de ciclo de vida completo, emissões associadas à produção de baterias e indicadores de circularidade representaria um avanço relevante na formulação de políticas ambientais integradas (INMETRO, 2024).

No contexto das políticas de mercado, a ausência de incentivos à instalação de pontos de recarga pública e a falta de padronização técnica dificultam o crescimento da infraestrutura de apoio. Essa lacuna reforça a dependência de soluções privadas, o que pode comprometer o acesso universal à mobilidade elétrica e criar barreiras sociais ao seu uso em larga escala (ABVE, 2022).

Logo, é possível afirmar que o cenário brasileiro ainda se encontra em estágio incipiente em relação à formulação de políticas públicas robustas para veículos elétricos. O país possui vantagens comparativas, como uma matriz elétrica relativamente limpa e capacidade industrial instalada, mas carece de um planejamento estratégico de longo prazo. Sem um esforço coordenado entre governo, indústria e sociedade, a eletromobilidade corre o risco de avançar de forma desordenada e concentrada em nichos, em vez de constituir uma solução de massa e estrutural para a mobilidade urbana e ambiental no Brasil (IRENA, 2017; SANTOS et al., 2021).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma metodologia de revisão bibliográfica sistematizada, com abordagem qualitativa, de natureza descritiva e analítica. O objetivo central foi sistematizar o conhecimento científico e técnico existente sobre o ciclo de vida das baterias utilizadas em veículos elétricos, abarcando as etapas de extração, produção, uso, reutilização e descarte.

A revisão sistematizada permite identificar lacunas, convergências e tendências no estado da arte de um tema, constituindo-se como um método de destaque para síntese teórica. A seguir, são descritas em detalhe as fases que compuseram o desenvolvimento metodológico.

3.1 Planejamento e definição do escopo

Essa fase teve como propósito delimitar o foco da pesquisa e estruturar o protocolo metodológico. Inicialmente, definiu-se o problema de pesquisa, as questões norteadoras e os objetivos específicos.

Em seguida, foram estabelecidos os descritores de busca, a abrangência temporal e as bases de dados a serem consultadas. Foram selecionadas bases acadêmicas de ampla cobertura (SciELO, Web of Science, ScienceDirect e Google Escolar) e institucionais (IRENA, IEA, Banco Mundial e relatórios da Agência Internacional de Energia).

Os descritores foram combinados em português e inglês para ampliar e refinar as buscas. A Tabela 1 apresenta o retorno das pesquisas pelas palavras chaves, trata-se de uma síntese de revisão bibliométrica atualizada no mês de dezembro de 2025.

Tabela 1– Revisão Bibliométrica

RETORNOS DE PALAVRAS CHAVES			
PALAVRAS CHAVES	GOOGLE SCHOLAR	SCIENCE DIRECT	SCIELO
"baterias de íon-lítio"	1.340	4	10
"baterias de íon-lítio" Veículos	782	0	1
"lithium-ion batteries" Vehicles	603.000	55.645	6
"avaliação do ciclo de vida"	12.000	6	225
"life cycle assessment"	1.020.000	70.197	284
"avaliação do ciclo de vida" Veículos	260	0	0
"life cycle assessment" Vehicles	135.000	18.816	3
"mobilidade elétrica"	3.300	5	18
"electric mobility"	50.200	6.011	77
"mobilidade elétrica" Veículos	2.370	0	0
"electric mobility" Vehicles	43.900	4.382	3
"reciclagem de baterias"	1.060	2	24
"battery recycling"	32.500	5.315	11
"reciclagem de baterias" Veículos	509	0	10
"battery recycling" Vehicles	19.700	3.670	2
"sustentabilidade"	1.590.000	984	1.894
"sustainability"	5.250.000	1.000.000	541
"sustentabilidade" Veículos	19.300	13	307
"sustainability" Vehicles	2.540.000	392.353	79

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Além disso, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão:

- Inclusão: publicações com foco em baterias automotivas, com abordagem ambiental, energética ou regulatória, publicadas entre 2008 e 2024, com texto completo disponível.
- Exclusão: estudos puramente laboratoriais, sem conexão com sustentabilidade sistêmica, e documentos sem revisão por pares ou desatualizados.

Essa fase resultou em um protocolo de pesquisa estruturado, garantindo rastreabilidade e transparência metodológica.

3.2 Coleta e seleção de dados

A coleta foi realizada entre março e abril de 2025. Em seguida, iniciou-se a etapa de triagem em duas fases:

1. Leitura exploratória dos títulos e resumos, para eliminar publicações fora do escopo.
2. Leitura integral dos textos selecionados, a fim de avaliar consistência teórica e aderência aos objetivos do estudo.

Dos cerca de 45 documentos inicialmente identificados, apenas 35 foram selecionados para análise final, conforme os critérios definidos. Essa filtragem visou assegurar qualidade e representatividade do corpus de pesquisa, equilibrando fontes científicas e relatórios técnicos. A Figura 4 mostra a planilha utilizada na seleção dos trabalhos. Para garantir melhor legibilidade e qualidade da imagem apresentada, optou-se por ocultar algumas colunas, tais como: objetivo do estudo, base/fonte, categoria temática e relevância do estudo.

Figura 4 – Seleção dos trabalhos a serem revisados

Autor(es)	Ano	Título do Estudo	Palavras-chave	Incluir? (Sim/Não)
AOYAGUE, Henry Yuzo Sasaki.	2024.	Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente.	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries";	Sim
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.	2009.	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida	"sustentabilidade" / "sustainability".	Sim
BARBIERI, José Carlos	2016.	Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos.	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
BARBIERI, José Carlos	2009.	Cadeia de suprimento e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação	"mobilidade elétrica" / "electric mobility";	Sim
CHEN, M.	2019	Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
ELLINGSEN, L. A. W	2013	Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY	2018	Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives	"mobilidade elétrica" / "electric mobility";	Sim
FLEXER, V.; BASPINEIRO, C. F.; GALLI, C. I	2018	Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries";	Sim
FREITAS, Felipe Tomaz; MARCHESINI, Márcia Maria	2022	Avaliação do ciclo de vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
FUJIMORI, S.; ZHANG, R	2020	The role of transport electrification in global climate change mitigation scenario	"mobilidade elétrica" / "electric mobility";	Sim
GAO, S	2021	Integrating corporate website information into qualitative assessment for benchmarking green supply chain management practices for the chemical	"sustentabilidade" / "sustainability".	Sim
GEORGI-MASCHLER, T	2012	Development of a recycling process for Li-ion batteries	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
HARPER, G	2019	Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
HOHMANN, Matheus	2022	Análise de viabilidade técnica da utilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
HUANG, Z	2019	Modeling and multi-objective optimization of a stand-alone PV-hydrogen-retired EV battery hybrid energy system	"mobilidade elétrica" / "electric mobility";	Sim
Jiang, S	2020	Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
ROMARE, Mia; DAHLLOF, Linda	2017	The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A study with focus on Current Technology and	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
RODRIGUEZ, T. B.; CONSONI, F. L	2020	Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
SANCHES, L. D. S	2021	Contexto energético da mobilidade individual urbana no Brasil: análise do ciclo de vida e avaliação do impacto ambiental de carros elétricos	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
SILVA, N. F. S	2019	A importância da reciclagem na sustentabilidade de carros elétricos	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
ZUBI, G. et	2018	The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
WILLERS, C.D.; RODRIGUES, L.B.; SILVA ,	2013	Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
SANTOS, G. R	2021	O impacto da eletromobilidade: veículos elétricos, meio ambiente e a infraestrutura energética do Brasil	"sustentabilidade" / "sustainability".	Sim
WIEDMANN, T.; MINX, J. A	2008	A Definition of "Carbon Footprint"	"sustentabilidade" / "sustainability".	Sim
BAUMANN-PAULY, Dorothée; CREMER IYI, HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.;	2020	Making Mining Safe and Fair: Artisanal Cobalt Extraction in the Democratic Republic of the Congo	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
	2018	Life Cycle Assessment: Theory and Practice .	"avaliação do ciclo de vida" / "life cycle"	Sim
Gaines, L.	2018	Lithium-ion Battery Recycling Processes: Research Towards a Sustainable Course	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
Santanna, G	2021	Desafios e Oportunidades na Reciclagem de Baterias de Íon-Lítio no Brasil	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
GOODENOUGH, J. B.; KIM, Y	2010	Challenges for rechargeable Li batteries. <i>Chemistry of Materials</i>	"reciclagem de baterias" / "battery recycling"	Sim
NAKAMURA, T	2021	Solid-State Batteries: Materials, Systems and Applications. <i>Nature Energy</i>	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
TARASCON, J.-M.; ARENZ, M	2022	Building Better Batteries. <i>Nature Materials</i>	"sustentabilidade" / "sustainability".	Sim
GARCIA, R.; LOPEZ, M.; MARTINS, F	2022	Strategies for extending battery lifetime in electric mobility: modularity, standardization and circular design	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
HULBERT, B	2022	Lithium Extraction: Technical Review and Environmental Assessment .	"baterias de íon-lítio" / "lithium-ion batteries"	Sim
LATAM MOBILITY	2025	Electromobility Law in Brazil: Federal, State and Municipal Progress	"mobilidade elétrica" / "electric mobility";	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.3 Categorização e análise temática

Com o conjunto de trabalhos validados, procedeu-se à categorização do conteúdo. Essa etapa consistiu em organizar os estudos em três eixos temáticos principais, definidos a partir de recorrências identificadas na literatura:

1. Extração e produção de matérias-primas críticas: examina impactos ambientais, consumo hídrico, energia embutida e condições socioeconômicas na mineração de lítio, cobalto, níquel e alumínio. Inclui análises sobre governança, licenciamento ambiental e pegada de carbono dos processos produtivos.
2. Desempenho operacional e eficiência energética: aborda comparativos entre veículos elétricos e convencionais, considerando matriz elétrica, consumo energético por quilômetro, emissões de gases de efeito estufa e indicadores de eficiência do ciclo de vida.
3. Gestão pós-consumo e economia circular: trata de estratégias de segunda vida, reciclagem, reuso e políticas públicas para destinação final. Avalia tecnologias emergentes (como hidrometalurgia e reciclagem direta) e desafios regulatórios no contexto latino-americano.

Durante essa etapa, aplicou-se a técnica de análise de conteúdo temática, com codificação manual e identificação de padrões, convergências e lacunas. A categorização foi validada por triangulação entre autores e comparação com estudos de referência internacional.

3.4 Síntese e interpretação dos resultados

Na fase final, os resultados de cada eixo foram integrados e comparados para construir uma visão sistêmica do ciclo de vida das baterias automotivas.

Essa síntese permitiu formular um panorama crítico e estruturado, fundamentando as discussões apresentadas nos capítulos seguintes. O uso de tabelas e mapas conceituais apoiou a visualização das relações entre variáveis e categorias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da Produção e Extração

A transição energética global, orientada pela urgência de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, tem provocado uma reestruturação das cadeias produtivas em setores estratégicos, especialmente na indústria automotiva. A eletrificação da frota de veículos impulsiona a demanda por minerais considerados críticos, como lítio, cobalto e alumínio, essenciais na fabricação de baterias de íons de lítio – tecnologia predominante nos veículos elétricos (ZUBI et al., 2018). Embora os BEVs (*Battery Electric Vehicles*) reduzam as emissões diretas de CO₂ no uso veicular, seus impactos ambientais se concentram de forma significativa nas etapas iniciais do ciclo de vida, especialmente nas fases de extração e refino desses insumos (ROMARE; DAHLÖF, 2017).

Estudos indicam que o crescimento da demanda por minerais estratégicos é proporcional à aceleração da adoção global dos veículos elétricos. A Agência Internacional de Energia (IEA) projeta que, até 2040, a demanda por lítio será 42 vezes maior que os níveis de 2020, enquanto a de cobalto poderá aumentar em até 21 vezes, pressionando áreas de extração ambientalmente sensíveis (IRENA, 2017; FLEXER et al., 2018). Essa intensificação traz consigo uma série de desafios ambientais, como o aumento do uso de água e energia, e de dilemas sociais, incluindo deslocamento de comunidades tradicionais e riscos à saúde pública nas zonas extrativas (DOSHI, 2020).

As cadeias extrativas de lítio, cobalto e alumínio estão concentradas em poucos territórios, cujos marcos regulatórios ambientais e trabalhistas nem sempre acompanham os padrões internacionais de sustentabilidade. No caso do cobalto, por exemplo, cerca de 70% da produção mundial ocorre na República Democrática do Congo, onde práticas como trabalho infantil e mineração artesanal sem controle ambiental são amplamente documentadas (COBALT INSTITUTE, 2020; DOSHI, 2020). Já o lítio é predominantemente extraído de salmouras no Chile, Argentina e Bolívia, países que enfrentam crescentes tensões hídricas e socioambientais em regiões como o Salar de Atacama (FLEXER et al., 2018).

Diante desse contexto, esta seção tem como objetivo realizar uma análise da produção e extração dos principais insumos utilizados em baterias veiculares, com

foco na avaliação dos impactos ambientais, sociais e operacionais associados. Para isso, utiliza-se como base metodológica a Avaliação do Ciclo de Vida , conforme orientações das normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; 2009b), tópico apresentado no Capítulo 2, articulada com estudos empíricos recentes sobre as cadeias extrativas e tendências tecnológicas no setor (GAO et al., 2021; SANCHES, 2021; HARPER et al., 2019). A abordagem será dividida por material — lítio, cobalto e alumínio — com posterior integração sistêmica dos dados por meio de tabelas comparativas, imagens e reflexão.

4.1.1 Lítio

O lítio pode ser obtido a partir de três principais tipos de depósitos geológicos: salmouras (salares), pegmatitos e argilas. Os salares, presentes sobretudo na América do Sul, representam atualmente a principal fonte de extração global, com destaque para as reservas nos desertos do Chile, Bolívia e Argentina, conhecidas como o “Triângulo do Lítio” (FLEXER et al., 2018). Já os pegmatitos, rochas ígneas presentes em países como Austrália e Canadá, vêm ganhando relevância por permitirem extração mineral sólida, com maior controle ambiental. As argilas, em estágio experimental, concentram-se principalmente nos Estados Unidos e China (ZUBI et al., 2018). A Figura 5 apresenta um mapa mundial das reservas de lítio.

Figura 5 – Mapa mundial das reservas de lítio



Fonte: EXAR (s.d.). Disponível em: <https://www.exar.com.ar/litio-el-proceso/>. Acesso em: 12 nov. 2025

A comparação entre a extração em salmouras e a mineração sólida demonstra contrastes relevantes em termos operacionais e ambientais. A extração de salmouras exige a evaporação solar de grandes volumes de água salina em poços abertos, um processo que pode levar de 12 a 18 meses para concentrar o lítio na forma de carbonato ou hidróxido (FLEXER et al., 2018). Apesar de seu menor consumo energético em comparação à mineração em pegmatitos, essa técnica demanda enormes volumes de água em regiões áridas, comprometendo a disponibilidade hídrica para comunidades locais e ecossistemas frágeis (JIANG et al., 2020).

As consequências hidrológicas desse modelo são objeto de crescente preocupação científica e social. Segundo Jiang et al. (2020), a produção de uma tonelada de carbonato de lítio pode consumir entre 2 e 2,5 milhões de litros de água, elevando os riscos de salinização de aquíferos e degradação de zonas úmidas andinas. De acordo com a IRENA (2022), a demanda estimada de lítio metálico para baterias de veículos elétricos é da ordem de aproximadamente 160 g Li por kWh, o que significa que um veículo com bateria de 50 kWh requer aproximadamente 8 kg de lítio. O uso intensivo de água em regiões já vulneráveis leva à redução do nível freático

e à perda de vegetação nativa, afetando tanto a fauna quanto as práticas de subsistência dos povos originários da região (FLEXER et al., 2018).

Adicionalmente, a etapa de processamento do lítio envolve reações químicas com reagentes altamente alcalinos, como cal virgem, que geram resíduos sólidos e efluentes ricos em sais, elevando os riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas (ZUBI et al., 2018). A transformação de salmouras em hidróxido ou carbonato de lítio, substâncias utilizadas na fabricação de cátodos de baterias, também implica emissões significativas de gases de efeito estufa, especialmente quando realizada em instalações que utilizam matriz energética fóssil (ROMARE; DAHLÖF, 2017).

No que tange às externalidades ambientais, os estudos de ACV identificam que o lítio extraído de salmouras apresenta menor pegada de carbono do que o proveniente de rochas duras, mas possui impactos mais severos sobre o ciclo hidrológico e a biodiversidade local (SANCHES, 2021). Essa constatação reforça a importância de adotar uma abordagem integrada na avaliação da sustentabilidade do insumo, incorporando múltiplos indicadores ambientais além das emissões de CO₂. Entre esses indicadores destacam-se: a acidificação, que representa o aumento da acidez em solos e corpos d'água devido à emissão de gases como dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), os quais se transformam em ácidos na atmosfera e prejudicam ecossistemas terrestres e aquáticos; a toxicidade humana, que avalia o potencial de substâncias químicas liberadas ao longo do ciclo produtivo afetarem a saúde humana por meio da inalação, ingestão ou contato dérmico; e a ecotoxicidade aquática, que mensura os efeitos adversos de contaminantes sobre organismos aquáticos, podendo comprometer a biodiversidade e o equilíbrio ecológico (GAO et al., 2021; HAUSCHILD et al., 2013; ISO, 2006).

A região do “Triângulo do Lítio” constitui um caso emblemático das tensões entre exploração mineral e justiça ambiental. Apesar de sua riqueza em recursos, os países envolvidos enfrentam desafios de governança, ausência de consulta prévia a comunidades indígenas e baixa distribuição dos benefícios econômicos da mineração (DOSHI, 2020). A extração em áreas indígenas sem mecanismos robustos de licenciamento socioambiental tem gerado protestos e ações judiciais, especialmente na região do Atacama chileno (HARPER et al., 2019).

Um dos principais gargalos para mitigar esses impactos é a ausência de rastreabilidade na cadeia produtiva. Segundo Harper et al. (2019), poucos projetos de

mineração de lítio adotam sistemas de monitoramento em tempo real ou divulgação transparente dos dados de consumo hídrico e emissões. Essa opacidade dificulta a aplicação de critérios de compra sustentável por montadoras automotivas e compromete os objetivos de sustentabilidade proclamados por empresas do setor (GAO et al., 2021).

Frente a esse cenário, surgem inovações tecnológicas voltadas à extração direta de lítio (*Direct Lithium Extraction* – DLE), que prometem reduzir em até 90% o uso de água e encurtar o tempo de produção de meses para dias (ZUBI et al., 2018). Essas técnicas, baseadas em adsorventes seletivos e membranas, ainda enfrentam desafios de escalabilidade e custos, mas já são testadas em projetos-piloto no Chile, China e EUA. Se bem-sucedidas, podem representar um divisor de águas para a sustentabilidade da cadeia do lítio.

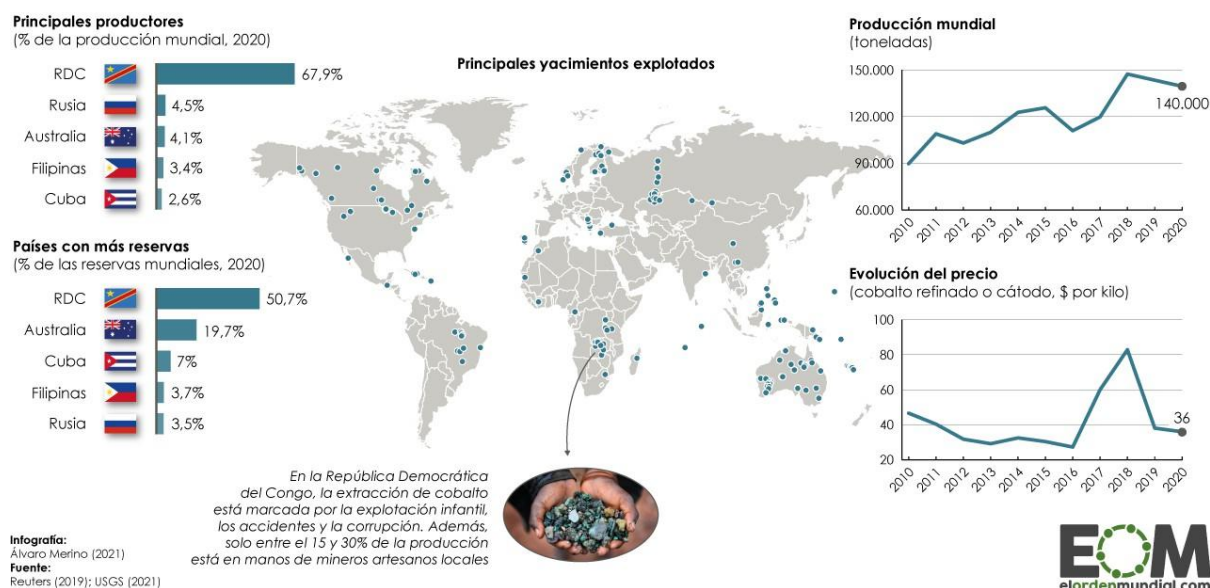
4.1.2 Cobalto

O cobalto é um dos insumos mais críticos na produção de baterias de alta densidade energética, especialmente nas tecnologias NMC (níquel-mangânese-cobalto), utilizadas por diversos fabricantes globais. Sua função principal é conferir estabilidade térmica e durabilidade às células eletroquímicas, fatores essenciais para o desempenho de veículos elétricos (ZUBI et al., 2018). No entanto, cerca de 70% do cobalto extraído mundialmente provém da República Democrática do Congo, um país marcado por instabilidade política, conflitos armados e baixíssimos indicadores de desenvolvimento humano (COBALT INSTITUTE, 2020). A Figura 6 apresenta um mapa mundial das reservas e produção de cobalto.

Figura 6 – Mapa mundial de reserva e produção de cobalto

La República Democrática del Congo, un mar azul cobalto

Explotación y yacimientos



Fonte: El orden mundial. Disponível em : <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-produccion-cobalto-mundo/>. Acesso em: 20 de nov. 2025

A concentração geográfica da oferta global de cobalto configura um risco geopolítico expressivo para a cadeia produtiva da eletromobilidade. Segundo Ehsani et al. (2004), o crescimento acelerado da demanda por veículos elétricos pode gerar gargalos de fornecimento, com volatilidade de preços e dependência de regimes instáveis. Essa vulnerabilidade é agravada pela falta de diversificação de fornecedores e pela baixa transparência sobre a origem do mineral utilizado pelas indústrias de tecnologia e transporte.

A produção de cobalto na República Democrática do Congo envolve, em larga escala, operações de mineração artesanal e de pequena escala (*ASM – Artisanal and Small-scale Mining*), onde milhares de trabalhadores, incluindo crianças, operam em condições insalubres e sem qualquer proteção legal (DOSHI, 2020). Diversos relatórios de organizações internacionais apontam para a presença sistemática de trabalho infantil, acidentes fatais e exploração laboral, configurando graves violações aos direitos humanos (BAUMANN-PAULY et al., 2020). Essa realidade tem colocado em xeque o discurso de sustentabilidade da indústria de veículos elétricos, cuja base produtiva carrega um passivo ético considerável.

Diante desse cenário, diversas iniciativas internacionais vêm sendo desenvolvidas para mitigar os riscos associados ao cobalto. Uma das estratégias mais promissoras é a adoção de cadeias de suprimento auditáveis, com uso de tecnologias como *blockchain* para rastrear a origem do mineral desde a extração até a célula da bateria (GAO et al., 2021). Além disso, instituições como a *Cobalt Refinery Supply Chain Due Diligence Standard* têm criado selos de conformidade que certificam operações livres de práticas abusivas, exigindo auditorias externas e a adoção de critérios sociais e ambientais rigorosos (HARPER et al., 2019).

No plano tecnológico, uma das respostas mais eficazes ao problema de extração do cobalto tem sido a busca por alternativas químicas que reduzam ou eliminem sua presença nas baterias. As baterias NMC 811, por exemplo, possuem proporções significativamente menores de cobalto em relação às versões anteriores, sem comprometer o desempenho (ZUBI et al., 2018). Já as baterias LFP (lítio-ferro-fosfato), embora apresentem menor densidade energética, vêm sendo adotadas em larga escala na China devido à sua maior estabilidade térmica, custo reduzido e ausência total de cobalto.

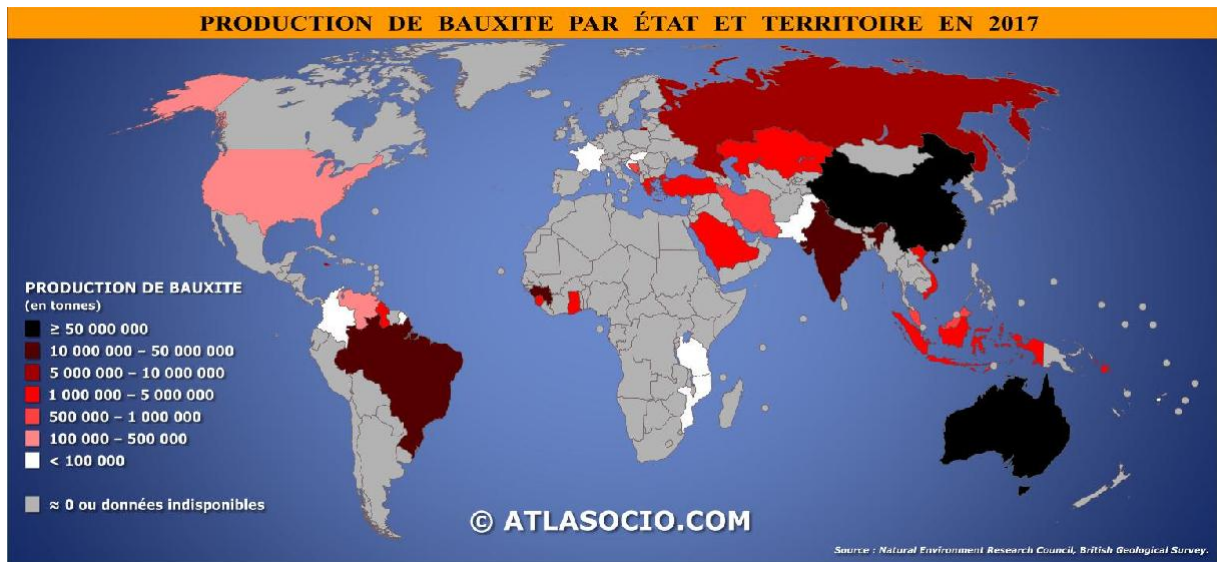
Vale destacar que a transição para um modelo energético mais limpo não deve ocorrer às custas da perpetuação de injustiças socioambientais. Como apontado por Doshi (2020), a eletromobilidade precisa ser analisada de forma sistêmica, considerando não apenas suas emissões locais, mas também os impactos sociais e ecológicos da cadeia global de fornecimento. A justiça ambiental, nesse sentido, exige a internalização de externalidades éticas nas decisões de design e abastecimento dos sistemas de energia limpa.

4.1.3 Alumínio

O alumínio desempenha papel essencial na construção de veículos elétricos, sendo utilizado tanto na estrutura do chassi quanto nas embalagens das células de bateria. Sua leveza contribui diretamente para a eficiência energética dos BEVs, uma vez que a redução de peso implica menor consumo de energia por quilômetro rodado (ZUBI et al., 2018). Além disso, a elevada condutividade térmica e resistência à corrosão do alumínio fazem dele um material amplamente utilizado na engenharia automotiva moderna. Entretanto, o processo de obtenção de alumínio primário é um dos mais intensivos em energia entre todos os metais industriais (SANCHES, 2021).

A produção de alumínio inicia-se com a extração da bauxita, majoritariamente realizada a céu aberto em regiões tropicais, como o Brasil, Austrália e Guiné. A Figura 7 apresenta um mapa da produção mundial de bauxita.

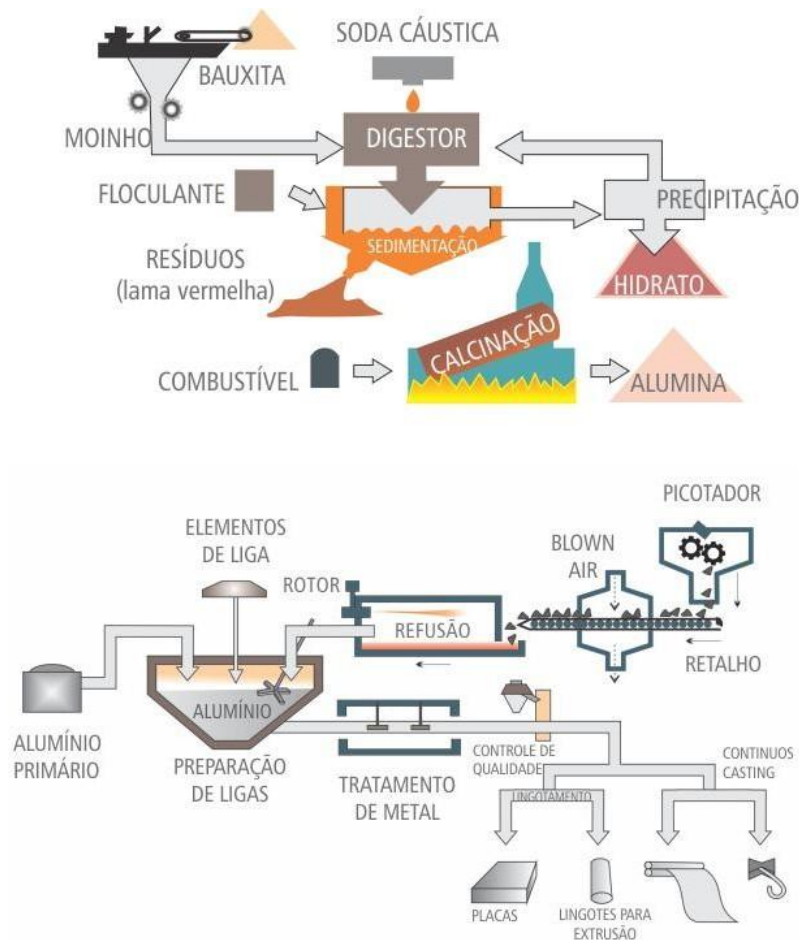
Figura 7 – Mapa mundial de produção de bauxita



Fonte: Vamos arema. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/dfwovsmijipdde/total-bauxite-production-in-the-world.html>. Acesso em : 20 de nov. 2025.

Após a mineração, a bauxita passa por um processo químico chamado “Bayer”, que gera o óxido de alumínio (alumina), posteriormente submetido à eletrólise no processo Hall-Héroult para obtenção do alumínio metálico (GAO et al., 2021). Essa etapa consome em média 14 a 16 MWh por tonelada de alumínio produzido, o que implica significativa emissão de gases de efeito estufa caso a matriz energética envolvida seja baseada em fontes fósseis (ROMARE; DAHLÖF, 2017). A Figura 8 apresenta o processo de transformação da bauxita até o alumínio.

Figura 8 – Fluxograma do processo de produção de alumínio



Fonte: GR3 Distribuidora (2025).

Além da intensidade energética, a mineração de bauxita está associada a importantes impactos ambientais. Entre os principais, destaca-se a geração de lama vermelha (*red mud*), um resíduo alcalino altamente tóxico produzido em grande volume durante o processo Bayer. Esse resíduo apresenta desafios significativos de disposição e pode contaminar cursos d'água e solos adjacentes caso não haja contenção adequada (HARPER et al., 2019). Estudos realizados no Brasil apontam para a baixa taxa de reaproveitamento da lama vermelha, o que agrava seu passivo ambiental (SANCHES, 2021).

A reciclagem de alumínio surge como uma estratégia chave para mitigar tais impactos. O processo de reaproveitamento consome apenas cerca de 5% da energia necessária à produção primária, e emite quantidades consideravelmente menores de gases de efeito estufa (GAO et al., 2021). No entanto, a logística reversa e a triagem eficiente de componentes de alumínio ainda são obstáculos relevantes, especialmente

no setor automotivo, onde o desmonte veicular nem sempre é realizado com foco na recuperação de materiais de alto valor agregado (HARPER et al., 2019).

Comparações entre o ciclo de vida do alumínio primário e reciclado, realizadas por meio de metodologias de ACV, evidenciam que o uso de alumínio reciclado pode reduzir a pegada de carbono da carroceria veicular em até 95% (ROMARE; DAHLÖF, 2017). Contudo, a efetivação dessa economia circular depende de políticas públicas de incentivo à reciclagem, padronização de componentes, e integração entre os setores de design de produto, desmontagem e reaproveitamento industrial (GAO et al., 2021). Sem essas medidas, as oportunidades de economia de energia permanecem subutilizadas.

Nesse contexto, observa-se um movimento crescente no design automotivo voltado à integração entre modularidade estrutural e eficiência na desmontagem, visando facilitar a recuperação de alumínio e outros materiais de interesse (ZUBI et al., 2018). Essa abordagem, conhecida como “*design for disassembly*”, é estratégica não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para a competitividade industrial frente a um mercado que valoriza produtos com menor impacto ecológico ao longo de seu ciclo de vida. No Brasil, no entanto, a aplicação prática dessa abordagem ainda é incipiente e carece de incentivos normativos claros (SANCHES, 2021).

4.1.4 Integração sistêmica dos materiais

Conforme definição da ACV apresentada no Capítulo 2, está trata-se de uma metodologia reconhecida internacionalmente que permite mensurar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas de sua existência — da extração de matérias-primas ao descarte final. De acordo com a ABNT (2009a; 2009b), por meio das normas ISO 14040 e 14044, a ACV se estrutura em quatro fases principais: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. No caso das baterias de veículos elétricos, a ACV é essencial para compreender os “*hotspots ambientais*” — pontos críticos de impacto — que ocorrem sobretudo na produção de insumos como o lítio, o cobalto e o alumínio (SANCHES, 2021).

A definição do limite de sistema em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) exerce influência decisiva sobre os resultados obtidos e, consequentemente,

sobre as conclusões ambientais. Entre as abordagens mais comuns estão *cradle-to-gate* e *cradle-to-grave*. O escopo *cradle-to-gate* (do berço ao portão) considera apenas as etapas desde a extração das matérias-primas até a saída do produto da fábrica, excluindo fases posteriores como uso, manutenção e descarte. Trata-se de uma abordagem útil quando se deseja avaliar impactos associados exclusivamente aos processos produtivos, porém tende a subestimar o impacto total do produto ao longo de sua vida útil. Já o escopo *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo) engloba todas as etapas do ciclo, incluindo uso, reutilização, reciclagem e destinação final, fornecendo uma visão mais abrangente e realista dos impactos ambientais acumulados. No caso das baterias, SANCHES (2021) e Romare e Dahlöf (2017) demonstram que avaliações restritas ao *cradle-to-gate* frequentemente omitem impactos significativos associados ao fim da vida útil, como emissões decorrentes da manipulação de resíduos, perdas de materiais críticos e limitações na infraestrutura de reciclagem. Assim, a escolha do escopo deve ser cuidadosamente justificada, visto que determina a profundidade da análise e influencia diretamente a formulação de políticas e decisões industriais. Outro aspecto crucial para assegurar a robustez das análises de Avaliação do Ciclo de Vida é a representatividade dos dados utilizados. Embora países como Chile, Argentina, Bolívia e República Democrática do Congo sejam líderes globais na produção de lítio e cobalto, muitos dos dados disponíveis sobre suas operações extrativas não possuem o nível de detalhamento, padronização e transparência exigido para compor inventários de ACV de alta confiabilidade. Dessa forma, bancos de dados internacionais como Ecoinvent ou GaBi frequentemente recorrem a médias globais, estimativas modeladas ou inventários de regiões distintas, o que reduz a aderência regional e tecnológica das avaliações. Essa limitação é recorrente na literatura e afeta especialmente países do Sul Global, onde a disponibilidade de dados primários é mais restrita e heterogênea (WILLERS et al., 2013; GAO et al., 2021).

A integração de critérios sociais e éticos à ACV, embora ainda incipiente, tem ganhado força sob o conceito de Avaliação de Ciclo de Vida Social (ACVS). Essa abordagem busca considerar, além dos impactos ambientais, fatores como condições de trabalho, direitos humanos e distribuição equitativa de benefícios na cadeia produtiva (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM, 2007). No caso do cobalto, por exemplo, incorporar tais critérios pode alterar drasticamente a percepção

de sustentabilidade de tecnologias que, ambientalmente, apresentem bons indicadores, mas que sejam socialmente questionáveis (DOSHI, 2020).

O desenvolvimento de bases de dados globais mais integradas tem sido apontado como um dos caminhos para superar limitações metodológicas nas ACVs de baterias. Iniciativas como a *The Life Cycle Initiative*, promovida pelo UNEP, trabalham pela harmonização dos dados e pela integração com ferramentas computacionais de simulação, como OpenLCA e SimaPro (THE LIFE CYCLE INITIATIVE, 2022). Essa padronização é fundamental para a comparabilidade entre estudos e para a formulação de políticas públicas baseadas em evidências robustas, especialmente em setores estratégicos como a eletromobilidade.

A aplicação de ACV na análise da cadeia produtiva de baterias contribui não apenas para identificar os impactos, mas também para orientar decisões de projeto, seleção de materiais e desenvolvimento de tecnologias mais limpas. No caso do lítio, por exemplo, estudos que aplicam ACV têm demonstrado que rotas de extração direta (DLE) apresentam menor impacto hidrológico, ao passo que o uso de alumínio reciclado pode reduzir a pegada de carbono da bateria em até 90% (ROMARE; DAHLÖF, 2017; SANCHES, 2021). Tais evidências reforçam o papel estratégico da ACV como ferramenta de apoio à sustentabilidade sistêmica da cadeia automotiva elétrica.

A comparação entre os impactos ambientais e sociais dos principais insumos utilizados na fabricação de baterias veiculares é fundamental para subsidiar decisões mais conscientes ao longo da cadeia produtiva. A Tabela 2 sintetiza os principais parâmetros avaliados — consumo hídrico, emissões de gases de efeito estufa, riscos éticos e potencial de reciclagem — com base na literatura técnico-científica mais atualizada.

Tabela 2 – Comparação dos Impactos Ambientais por Tipo de Insumo

Matéria-prima	Consumo Hídrico	Emissões de GEE	Riscos Éticos	Potencial de Reciclagem
Lítio	Alto	Moderado	Baixo	Moderado
Cobalto	Moderado	Alto	Muito Alto	Alto
Alumínio	Alto (primário)	Muito Alto	Moderado	Muito Alto

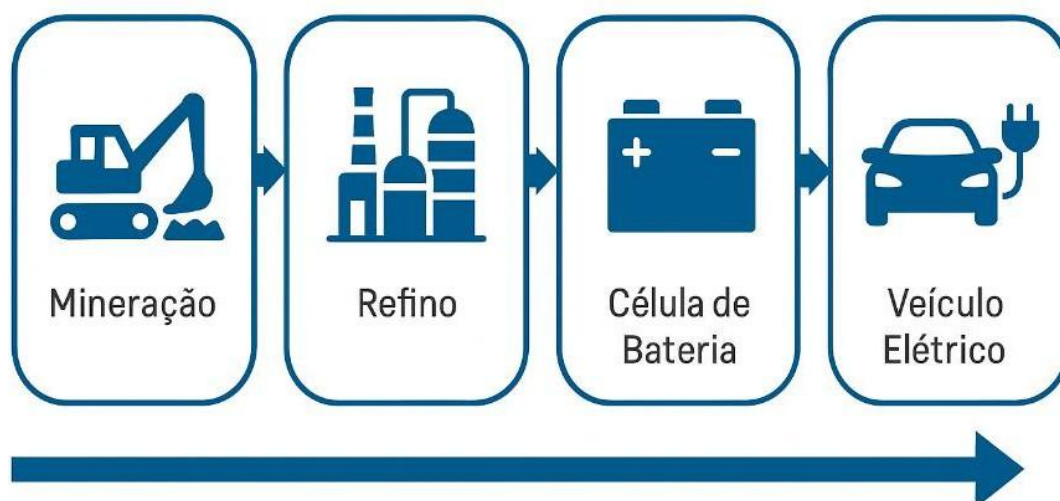
Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2020), Doshi (2020) e Harper et al. (2019).

Como se observa, o lítio apresenta alto consumo hídrico, sobretudo quando extraído de salmouras, mas impactos relativamente moderados em emissões e riscos

éticos. O cobalto, por sua vez, está associado a elevados riscos sociais e emissões significativas, embora seu potencial de reciclagem seja alto. Já o alumínio, quando na forma primária, se destaca negativamente pelo altíssimo consumo energético e emissões, mas oferece vantagens circulares quando reciclado. Esses dados demonstram a necessidade de integrar estratégias combinadas — como inovação em *design*, rastreabilidade e economia circular — para minimizar os impactos ao longo de toda a cadeia.

A Figura 9 apresenta um esquema simplificado da cadeia de valor do lítio, desde a extração mineral até sua aplicação em baterias automotivas.

Figura 9 – Cadeia de Valor do Lítio para Baterias Automotivas



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Jiang et al., (2020).

A busca por maior sustentabilidade na cadeia de extração de matérias-primas para baterias veiculares tem impulsionado o desenvolvimento e adoção de estratégias inovadoras em diversas etapas produtivas. A Tabela 3 apresenta um panorama das principais ações sustentáveis identificadas, associando cada estratégia à fase da cadeia produtiva e a exemplos práticos de implementação em diferentes contextos geográficos.

Tabela 3 – Estratégias Sustentáveis na Cadeia de Extração de Insumos Críticos

Etapa da Cadeia	Estratégia Sustentável	Exemplos Atuais
Mineração	Extração direta e controle de efluentes	Salar de Atacama – Chile
Refino	Tecnologias de baixo carbono	Hidróxido de lítio via EDL
Transporte	Logística reversa e eletrificação de frota	Noruega e Alemanha
Design de Produto	Redução de cobalto e modularidade	Baterias NMC-811

Fonte: Adaptado de Gao et al. (2021), Sanches (2021) e Harper et al. (2019).

Nota-se que soluções sustentáveis para a cadeia de baterias não dependem exclusivamente de avanços tecnológicos, mas também de mecanismos de governança, articulação institucional e vontade política. A Extração Direta de Lítio (Direct Lithium Extraction – DLE) tem sido apontada como uma alternativa capaz de reduzir significativamente o consumo hídrico e a pegada ambiental nos salares andinos, em comparação aos tradicionais métodos de evaporação solar (HULBERT et al., 2022; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). No campo industrial, países como China e Austrália vêm implementando tecnologias de refino de baixo carbono e processos mais eficientes de concentração mineral, com o objetivo de diminuir emissões e aumentar a sustentabilidade da cadeia de suprimentos (IEA, 2022; AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2023). Já no transporte e no design de produtos, estratégias como eletrificação de frotas, padronização de módulos e arquiteturas de baterias mais reparáveis têm se mostrado fundamentais para prolongar a vida útil dos sistemas e reduzir a demanda por matérias-primas críticas (EUROPEAN COMMISSION, 2020; GARCIA et al., 2022).

A análise integrada das cadeias extrativas de lítio, cobalto e alumínio revela uma tensão estrutural entre o avanço tecnológico da mobilidade elétrica e os limites ecológicos e sociais das regiões produtoras. Embora os veículos elétricos sejam frequentemente promovidos como solução para a descarbonização dos transportes,

a sustentabilidade de sua cadeia produtiva depende de fatores extraveiculares, como a origem dos insumos, os processos de transformação e o destino dos resíduos (ROMARE; DAHLÖF, 2017). Essa constatação exige uma reavaliação do paradigma de “tecnologia limpa”, à luz de uma abordagem sistêmica baseada na Avaliação do Ciclo de Vida.

Conciliar crescimento da eletromobilidade com responsabilidade socioambiental implica reconhecer os impactos ocultos da mineração e do refino, frequentemente externalizados para comunidades vulneráveis do Sul Global. A lógica extrativista, se não for transformada, reproduz modelos insustentáveis de apropriação de recursos e acirra desigualdades globais. Estudos como os de Doshi (2020) e Harper et al. (2019) reforçam a importância de políticas internacionais de rastreabilidade ética, padronização ambiental e incentivo à diversificação geográfica da oferta de insumos críticos.

As possibilidades de integração entre ciência, política pública e indústria são fundamentais para romper a fragmentação atual das cadeias produtivas. A promoção de inovação tecnológica em extração de baixo impacto, a exigência de ACVs completas nos projetos industriais e a regulação do conteúdo reciclado mínimo nos produtos são exemplos de medidas viáveis e já discutidas em fóruns como a *The Life Cycle Initiative* e a Aliança Global para Minerais Responsáveis (THE LIFE CYCLE INITIATIVE, 2022). Tais estratégias também permitem que países em desenvolvimento, como o Brasil, assumam protagonismo em nichos tecnológicos e regulatórios emergentes.

A eletromobilidade deve ser vista não apenas como uma substituição de tecnologias de propulsão, mas como oportunidade de redefinir padrões de produção e consumo. Nesse processo, a sustentabilidade das baterias não pode ser tratada como atributo fixo, mas como construção dinâmica, baseada em escolhas de *design*, fontes de energia, estratégias logísticas e, principalmente, em justiça ambiental. A abordagem por ciclo de vida não apenas revela impactos antes invisibilizados, como orienta caminhos para minimizar danos e maximizar benefícios sociais e ecológicos em escala sistêmica.

4.2 Eficiência Energética e Emissões

A eficiência energética constitui um dos pilares fundamentais da sustentabilidade no setor de transportes, especialmente no atual contexto de transição para tecnologias de baixa emissão. No caso dos veículos automotores, esse conceito se refere à proporção de energia útil convertida em movimento, em relação à energia total consumida, considerando as perdas por calor, resistência ao rolamento, e consumo de sistemas auxiliares (ONOHARA, 2022). No âmbito da mobilidade elétrica, a maximização dessa eficiência é vista como uma estratégia importante não apenas para reduzir custos operacionais, mas também para minimizar a pegada de carbono do setor automotivo.

A comparação entre veículos a combustão interna (ICEVs – *Internal Combustion Engine Vehicles*) e veículos elétricos a bateria (BEVs – *Battery Electric Vehicles*) revela diferenças estruturais relevantes. Enquanto os ICEVs operam com rendimentos térmicos médios entre 18% e 30%, devido às limitações da conversão da energia química dos combustíveis fósseis em energia mecânica, os BEVs alcançam rendimentos entre 70% e 90%, graças à menor quantidade de conversões energéticas envolvidas (GAO et al., 2021; ONOHARA, 2022). Essa diferença já justifica, do ponto de vista técnico, o maior interesse pelos BEVs como solução para o transporte sustentável.

Entretanto, é necessário ampliar o escopo da análise e considerar variáveis contextuais que influenciam o desempenho energético de cada modal. Fatores como o perfil de condução, o relevo, a massa do veículo, a densidade urbana e a temperatura ambiente alteram substancialmente os índices de consumo por quilômetro rodado (SANCHES, 2021). Além disso, a energia elétrica e os combustíveis fósseis possuem origens, formas de distribuição e intensidades de emissões distintas, exigindo ferramentas que avaliem esses sistemas de maneira holística e comparável.

Conforme definição a ACV apresentada no Cap.2, item 2.1 apresenta-se como a metodologia mais adequada para realizar tal comparação, pois permite mensurar a eficiência energética de forma sistêmica. Ao considerar desde a extração da fonte primária de energia até seu uso final no deslocamento (“*well-to-wheel*”), a ACV fornece subsídios técnicos para avaliar a real sustentabilidade de cada tipo de veículo,

especialmente em diferentes contextos energéticos regionais (HOHMANN et al., 2022; SANCHES, 2021). Isso é essencial para evitar distorções comuns em análises que consideram apenas o uso direto do veículo, sem levar em conta os impactos da geração ou refino da energia utilizada.

A definição dos sistemas de propulsão analisados é essencial para uma comparação precisa. Os veículos elétricos a bateria (BEVs) utilizam motores elétricos alimentados exclusivamente por energia elétrica armazenada em baterias, geralmente de íons de lítio. Já os veículos com motor de combustão interna (ICEVs) operam por meio da queima de combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, e apresentam perdas consideráveis de energia em forma de calor, atrito e escapamento (ONOHARA, 2022). Essa distinção tecnológica afeta diretamente o rendimento energético de cada tipo de veículo.

A eficiência energética dos ICEVs é limitada pela segunda lei da termodinâmica. Grande parte da energia química do combustível se dissipa em forma de calor no motor, com rendimentos globais raramente superiores a 25% nas condições reais de uso urbano (GAO et al., 2021). Mesmo em motores a diesel, com tecnologia mais eficiente, o rendimento raramente ultrapassa 30%, evidenciando a baixa taxa de aproveitamento energético da combustão interna. Além disso, fatores como o peso do veículo, as trocas de marcha e a inércia do sistema aumentam o consumo energético médio por quilômetro rodado.

Em contrapartida, os BEVs apresentam eficiência significativamente superior. Como o motor elétrico converte diretamente a energia elétrica em energia mecânica, as perdas são reduzidas, especialmente quando se considera a frenagem regenerativa, que reaproveita parte da energia cinética para recarregar a bateria (SANCHES, 2021). Em ciclos urbanos, essa característica é particularmente vantajosa, elevando a eficiência global dos BEVs para patamares entre 70% e 90%, de acordo com testes padronizados e estudos de ACV.

Outro aspecto relevante na comparação é o consumo específico de energia. Enquanto um ICEV consome, em média, entre 0,45 e 0,65 kWh/km, um BEV consome entre 0,15 e 0,25 kWh/km, dependendo do peso, do tipo de motor e do estilo de condução (ONOHARA, 2022). Isso significa que, para a mesma distância percorrida, o BEV consome até três vezes menos energia que seu equivalente a combustão, representando uma vantagem direta em termos de eficiência energética.

É importante observar, contudo, que esses dados representam médias e não eliminam a necessidade de análises específicas por categoria veicular e perfil de uso. Veículos pesados, por exemplo, apresentam desafios distintos em termos de eficiência, tanto para sistemas elétricos quanto para motores a combustão (RICHARDSON, 2013). Além disso, o desempenho energético varia conforme as condições topográficas, climáticas e a densidade do tráfego, reforçando a necessidade de estudos empíricos baseados em cenários reais.

O rendimento energético do veículo deve ser analisado em conjunto com a origem da energia utilizada. A eficiência superior do BEV pode ser comprometida em contextos onde a matriz elétrica é intensiva em fontes fósseis, como carvão ou gás natural (ONS, 2024). Por isso, a análise da eficiência deve estar acompanhada de uma avaliação da matriz energética nacional ou regional, como será explorado nas tabelas apresentadas a seguir.

Para consolidar os dados apresentados até o momento, a Tabela 4 apresenta as médias de eficiência energética, consumo por quilômetro e origem da energia de diferentes tecnologias veiculares. O comparativo considera as perdas intrínsecas a cada tipo de propulsão e fornece um panorama robusto para avaliar o desempenho energético dos modais em uso.

Tabela 4 – Eficiência Energética Média de Diferentes Tecnologias Veiculares

Tipo de Veículo	Eficiência Global (PoW–Wh/km)	Rendimento (%)	Fonte Primária de Energia
ICEV Gasolina	0,45–0,65 Wh/km	18–25%	Derivados de petróleo
ICEV Diesel	0,35–0,55 Wh/km	25–30%	Diesel fóssil
Híbrido (HEV)	0,30–0,45 Wh/km	30–35%	Combustão + regeneração
BEV	0,15–0,25 Wh/km	70–90%	Eletricidade (matriz variável)

Fonte: Adaptado de Onohara (2022), Sanches (2021), Gao et al. (2021).

A expressiva diferença entre o rendimento dos motores de combustão e os elétricos é um dos fatores que justificam a adoção crescente dos veículos elétricos, especialmente em áreas urbanas densas e com infraestrutura de recarga consolidada (ONOHARA, 2022; GAO et al., 2021). A inclusão dos híbridos, com recuperação parcial de energia por frenagem regenerativa, evidencia uma solução intermediária entre os dois extremos da propulsão veicular.

As emissões diretas geradas pelos veículos com motor a combustão interna (ICEVs) são resultado da queima de combustíveis fósseis, principalmente gasolina e diesel. Esses processos produzem dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado, que impactam diretamente a qualidade do ar e contribuem significativamente para o aquecimento global. Segundo Richardson (2013), as emissões específicas de CO_2 de um ICEV convencional oscilam entre 0,20 e 0,25 $\text{kgCO}_2\text{e/km}$ em cenários urbanos, variando conforme o rendimento do motor e o tipo de combustível utilizado.

As emissões associadas aos ICEVs não se restringem à etapa de uso final. Antes do consumo veicular, o ciclo de produção e distribuição de combustíveis fósseis envolve processos com elevado consumo energético e emissão de poluentes. O refino de petróleo, o transporte em modais rodoviários ou marítimos e o armazenamento em terminais geram emissões indiretas significativas, elevando substancialmente o impacto climático total de um ICEV. Conforme demonstrado por Sanches (2021), entre 15% e 20% das emissões totais de CO_2 de um ICEV derivam do ciclo de *upstream* da cadeia de combustíveis.

A ausência de emissões locais nos veículos elétricos a bateria (BEVs) constitui uma de suas principais vantagens ambientais, especialmente em áreas metropolitanas densamente povoadas. Entretanto, quando se avalia o ciclo completo, é necessário considerar a origem da energia elétrica utilizada para a recarga. Caso a eletricidade provenha de fontes fósseis, como carvão ou gás natural, as emissões indiretas podem comprometer parte das vantagens ambientais dos BEVs. A matriz elétrica brasileira, por sua vez, composta majoritariamente por fontes renováveis, como hidrelétricas, permite que os BEVs operem com uma pegada de carbono notavelmente inferior (ONS, 2024).

A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida é essencial para mensurar comparativamente as emissões totais dos diferentes modais, integrando emissões diretas e indiretas. A abordagem “*well-to-wheel*” (do poço à roda) é a mais apropriada para refletir com precisão o impacto ambiental de cada tipo de veículo. Segundo Hohmann et al. (2022), essa abordagem evita distorções comuns nas comparações entre tecnologias ao incorporar os impactos associados à geração, conversão e distribuição da energia.

A distribuição espacial e temporal das emissões também influencia as estratégias de mitigação. As emissões de ICEVs ocorrem localmente e em tempo real,

concentrando poluentes nos centros urbanos, o que agrava problemas de saúde pública e qualidade do ar. Nos BEVs, as emissões associadas à geração elétrica ocorrem de forma descentralizada, muitas vezes distante dos centros urbanos, e sua intensidade depende do perfil tecnológico da usina geradora. Essa diferença espacial de impacto justifica a prioridade dada à eletrificação em regiões metropolitanas com altos índices de poluição atmosférica (Gao et al., 2021).

A matriz elétrica de um país é um fator determinante na avaliação do desempenho ambiental dos veículos elétricos. No Brasil, a geração de eletricidade é predominantemente baseada em fontes renováveis, com destaque para a energia hidrelétrica, que responde por mais de 55,3% da produção nacional. Complementam-se fontes como eólica, solar e biomassa, o que confere à eletricidade brasileira um dos menores fatores de emissão de carbono do mundo (ONS, 2024). Esse cenário confere aos BEVs um desempenho ambiental significativamente mais favorável quando comparado a países cuja matriz depende de carvão ou gás natural.

A baixa intensidade carbônica da matriz nacional implica que as emissões indiretas dos BEVs no Brasil são, em média, até 70% inferiores às de ICEVs equivalentes, mesmo considerando todo o ciclo de vida da energia elétrica. Esse diferencial torna o país especialmente apto à eletrificação do transporte como estratégia de mitigação climática. Sanches (2021) destaca que, em simulações de ACV aplicadas ao contexto brasileiro, veículos elétricos apresentam emissões entre 30 e 50 gCO₂e/km, contra 180 a 250 gCO₂e/km dos ICEVs, considerando um ciclo completo “*well-to-wheel*”.

Esse desempenho ambiental, no entanto, depende da estabilidade e expansão contínua da infraestrutura elétrica. A crescente demanda por energia devido à eletrificação veicular exige o fortalecimento da rede de transmissão, a modernização das subestações e o aumento da capacidade de geração renovável. Segundo Gao et al. (2021), sem investimentos adequados na infraestrutura energética, o crescimento da frota elétrica pode gerar gargalos e comprometer os ganhos ambientais esperados, sobretudo em horários de pico de consumo.

A regionalização da matriz também interfere na análise. Regiões com alta disponibilidade de fontes limpas, como o Nordeste com sua capacidade eólica e solar, tendem a proporcionar ainda melhores resultados de ACV para BEVs. Já áreas com suprimento mais limitado e maior dependência de termelétricas a gás ou óleo apresentam fatores de emissão superiores. Por isso, a análise da sustentabilidade da

mobilidade elétrica deve considerar não apenas a média nacional, mas também as características regionais de geração elétrica, como destacado por ONS (2024) em seus relatórios técnicos.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de emissões totais por tipo de veículo, com base em estudos de ACV.

Tabela 5 – Emissões Totais por Tipo de Veículo (Ciclo “Well-to-Wheel”)

Tipo de Veículo	Emissões Diretas (gCO ₂ e/km)	Emissões Indiretas (gCO ₂ e/km)	Total Estimado (gCO ₂ e/km)
ICEV (gasolina)	190–230	20–40	210–270
ICEV (diesel)	150–190	15–30	165–220
Híbrido (HEV)	100–140	15–30	115–170
BEV (matriz limpa)	0	30–50	30–50
BEV (matriz fóssil)	0	120–180	120–180

Fonte: Adaptado de Richardson (2013), Sanches (2021), ONS (2024), Gao et al. (2021)

Os resultados apontam para clara superioridade dos BEVs em termos de emissões totais, sobretudo em países com matriz elétrica limpa. Mesmo em cenários intermediários, os BEVs continuam a apresentar menores impactos climáticos do que os ICEVs mais eficientes.

A eficiência dos BEVs pode ser ampliada pela integração com fontes renováveis. A recarga de baterias com energia solar fotovoltaica elimina quase totalmente as emissões indiretas, além de reduzir a demanda por energia da rede centralizada (ONOHARA, 2022). Essa combinação de veículos elétricos e geração distribuída favorece a descentralização energética e a segurança no abastecimento. Além disso, modelos como *Vehicle-to-Grid* (V2G) possibilitam o uso bidirecional da bateria, servindo como suporte à estabilidade da rede (GAO et al., 2021).

A mobilidade elétrica, portanto, não é apenas uma solução veicular, mas parte de um sistema energético inteligente. Seu sucesso depende da integração entre tecnologia, política pública e planejamento energético sustentável. A análise técnica conduzida nesta seção permite afirmar que os veículos elétricos apresentam vantagens robustas sob a ótica da eficiência e das emissões. Essas vantagens, no entanto, devem ser contextualizadas e continuamente atualizadas com base em dados locais e reais de operação (SANCHES, 2021).

4.3 Reciclagem, Reutilização e Segunda Vida

A expansão da eletromobidade impõe desafios urgentes relacionados à destinação das baterias após o fim de sua vida útil nos veículos. Estima-se que, em um horizonte de 10 a 15 anos, o volume de baterias descartadas anualmente possa atingir centenas de milhares de toneladas, exigindo soluções tecnológicas e logísticas para evitar impactos ambientais e perdas de materiais críticos (GEORGI-MASCHLER et al., 2012).

As baterias de íons de lítio, utilizadas majoritariamente em veículos elétricos, possuem uma composição complexa que dificulta a reciclagem eficiente. Contêm metais valiosos como lítio, cobalto, níquel e manganês, mas em arranjos e formas químicas que requerem processos sofisticados de separação. A ausência de padronização entre fabricantes é um obstáculo adicional à industrialização da reciclagem (SILVA et al., 2019).

Entre as principais rotas tecnológicas de reciclagem, destacam-se os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. A pirometalurgia envolve a fusão de materiais em altas temperaturas, sendo eficiente para recuperação de cobalto e níquel, mas com baixa taxa de recuperação de lítio. Já a hidrometalurgia utiliza solventes químicos para extração seletiva dos metais, com maior eficiência e menor consumo energético (GEORGI-MASCHLER et al., 2012).

A implementação de plantas industriais de reciclagem no Brasil ainda é incipiente, apesar do crescimento do mercado de veículos elétricos. A maior parte das baterias descartadas tem como destino o exterior ou permanece estocada em centros técnicos, devido à ausência de política específica e infraestrutura de tratamento. A estrutura regulatória brasileira carece de diretrizes claras sobre responsabilidade estendida do fabricante e logística reversa para baterias de lítio (RODRIGUEZ & CONSONI, 2020).

A reutilização em segunda vida representa uma alternativa estratégica à reciclagem imediata. Após perderem cerca de 20% da capacidade original, muitas baterias ainda podem operar em aplicações estacionárias, como armazenamento residencial, sistemas de *backup* ou suporte à rede elétrica. Isso amplia seu valor agregado e dilui os impactos da extração mineral inicial (AOYAGUE, 2024).

O uso de baterias de segunda vida em sistemas de energia fotovoltaica, por exemplo, tem se mostrado eficaz na estabilização de microgrids e no armazenamento

de excedentes em horários de baixa demanda. Essa prática reduz a necessidade de expansão de sistemas convencionais e contribui para a descentralização energética, sendo estudada por diversas concessionárias no Brasil e no mundo (ROCCO, 2010).

No entanto, a viabilidade técnica da segunda vida exige padronização, rastreabilidade e métodos confiáveis de diagnóstico da saúde da bateria. O gerenciamento do ciclo de carga e a identificação precoce de falhas são essenciais para garantir segurança e desempenho nas aplicações estacionárias. A ausência de dados padronizados sobre ciclos de uso e desgaste dificulta a escalabilidade do modelo (AOYAGUE, 2024).

Do ponto de vista ambiental, a reutilização prolonga o retorno energético do sistema e posterga os impactos da destinação final. Embora não elimine a necessidade de reciclagem, permite um uso mais eficiente dos recursos já investidos na cadeia produtiva. Além disso, reduz a pressão sobre a mineração de metais estratégicos como o cobalto, cuja cadeia apresenta riscos éticos relevantes (GEORGI-MASCHLER et al., 2012).

Economicamente, a recuperação de materiais valiosos contidos nas baterias é uma oportunidade estratégica. Estudos indicam que, com avanço tecnológico, os processos hidrometalúrgicos poderão recuperar mais de 90% do lítio e do cobalto presentes nas células, tornando-se economicamente competitivos em larga escala. Para isso, é necessário integrar inovação tecnológica com incentivos industriais e políticas públicas (SILVA et al., 2019).

A cadeia de valor da reciclagem no Brasil pode ser estruturada a partir de parcerias entre fabricantes de veículos, operadores logísticos, universidades e empresas de tecnologia. Essa articulação intersetorial é fundamental para estabelecer um ecossistema industrial capaz de absorver e tratar os resíduos de baterias em território nacional, reduzindo a dependência de soluções estrangeiras (RODRIGUEZ & CONSONI, 2020).

A criação de bancos de dados nacionais sobre o ciclo de vida das baterias, com informações sobre origem, composição e histórico de uso, é uma medida essencial para viabilizar tanto a reciclagem quanto a segunda vida. Esses dados permitem selecionar rotas de reaproveitamento mais adequadas e garantir segurança na reutilização. Modelos baseados em *blockchain* têm sido propostos para garantir a integridade dessas informações (AOYAGUE, 2024).

O avanço da economia circular no setor veicular depende de estratégias integradas de design, regulação e mercado. O *design* das baterias deve considerar a desmontagem facilitada e o uso de materiais recicláveis. A regulação deve estabelecer metas de coleta, reutilização e reciclagem. E o mercado precisa enxergar valor nos produtos recuperados, incentivando modelos de negócio baseados em leasing ou logística reversa (SILVA et al., 2019).

A experiência internacional demonstra que políticas bem estruturadas, como as adotadas na União Europeia e na China, têm gerado avanços significativos na criação de cadeias industriais de reciclagem. O Brasil pode aproveitar esse *know-how* para acelerar sua curva de aprendizado, adaptando soluções às especificidades do território nacional e da matriz energética local (RODRIGUEZ & CONSONI, 2020).

Além da recuperação de materiais, a reciclagem e a reutilização também têm implicações positivas na redução de emissões de gases de efeito estufa. Ao evitar a produção de novas células a partir de insumos primários, reduzem-se as emissões associadas à mineração e ao processamento. A ACV é fundamental para quantificar esses ganhos e orientar políticas baseadas em evidência (SANCHES, 2021).

4.4 O Projeto de Lei nº 2132/2025

O Projeto de Lei nº 2132/2025 insere-se no contexto das políticas públicas brasileiras voltadas à promoção da eletromobilidade e da transição energética, ao estabelecer diretrizes para o desenvolvimento sustentável do setor de transportes. Embora o texto legal tenha como foco principal o estímulo à adoção de veículos elétricos, seus dispositivos dialogam diretamente com a necessidade de uma gestão adequada do ciclo de vida desses veículos, especialmente no que se refere ao descarte e à destinação final das baterias (BRASIL, 2025).

As baterias, em especial as de íon-lítio, constituem um dos principais componentes dos veículos elétricos e concentram materiais de elevado valor econômico e potencial impacto ambiental, como lítio, cobalto e níquel. O descarte inadequado desses sistemas pode resultar em riscos ambientais significativos, incluindo a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de comprometer os benefícios ambientais associados à eletromobilidade. Nesse sentido, a implementação das diretrizes propostas no PL nº 2132/2025 reforça a importância de

políticas complementares voltadas à logística reversa e à destinação ambientalmente adequada desses resíduos (BRASIL, 2025).

Além disso, o projeto está alinhado aos princípios da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, previstos na Política Nacional de Resíduos Sólidos, ao incentivar a integração entre indústria, poder público e consumidores na gestão das baterias pós-consumo. A partir dessa abordagem, o descarte deixa de ser tratado apenas como um passivo ambiental e passa a ser compreendido como uma oportunidade para o desenvolvimento de cadeias de reciclagem, reaproveitamento em aplicações de segunda vida e recuperação de materiais estratégicos.

Dessa forma, o PL nº 2132/2025 contribui para a consolidação de uma visão mais abrangente da eletromobilidade no Brasil, ao reforçar a necessidade de alinhar a expansão dos veículos elétricos com práticas sustentáveis de gestão de resíduos e economia circular, garantindo que os ganhos ambientais da transição energética sejam efetivamente alcançados ao longo de todo o ciclo de vida das baterias (BRASIL, 2025).

O PL foi aprovado em dezembro de 2025 e, por ter sido recente, foi incluído de forma resumida, destacando-se, no entanto, o seu alinhamento com os tópicos abordados neste trabalho de conclusão de curso.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos a partir de uma perspectiva técnica, ambiental e metodológica, considerando desde a extração de matérias-primas até as etapas finais de destinação. A abordagem evidenciou que a adoção dos BEVs envolve não apenas uma substituição energética, mas uma reestruturação profunda nas cadeias de suprimentos, com impactos diretos sobre os sistemas produtivos e ambientais. A análise considerou os desafios associados à extração de lítio, cobalto e alumínio, destacando os efeitos hidrológicos, emissões de GEE e riscos éticos envolvidos.

As evidências discutidas ao longo do estudo demonstraram que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a principal ferramenta para quantificar impactos ambientais ao longo da cadeia de valor das baterias. A partir de normativas como a NBR ISO 14040 e 14044, foi possível compreender como escolhas metodológicas, limites de sistema e representatividade dos dados influenciam a confiabilidade dos resultados. Os estudos aplicados ao contexto brasileiro reforçam a necessidade de adaptações regionais, especialmente em função da matriz energética e dos padrões de produção mineral localizados.

Os dados analisados sobre eficiência energética indicam que os veículos elétricos apresentam desempenho superior em comparação aos veículos a combustão, com perdas significativamente menores e maior rendimento operacional. Esse diferencial se amplifica quando alimentados por uma matriz elétrica de baixa emissão, como é o caso do Brasil, cujas fontes renováveis representam uma vantagem estrutural. No entanto, o aproveitamento desse potencial requer investimentos em infraestrutura elétrica, regulação técnica e padronização industrial.

As estratégias de segunda vida e reciclagem surgem como elementos centrais para a sustentabilidade dos sistemas de armazenamento eletroquímico. A viabilidade dessas soluções depende do desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento, da criação de uma logística reversa estruturada e da definição de responsabilidades legais para fabricantes e usuários. Modelos de reutilização em sistemas estacionários já demonstram retorno energético relevante e contribuem para a mitigação dos impactos associados à extração de metais críticos.

A aplicação de soluções baseadas em economia circular requer também o redesenho dos produtos, incorporando modularidade, facilidade de desmontagem e

rastreabilidade de origem. A literatura consultada apontou que a ausência de padronização nas baterias dificulta o reaproveitamento e encarece os processos de tratamento. Assim, o desempenho ambiental do BEV depende não apenas da etapa de uso, mas da capacidade de manter os materiais em ciclos produtivos por mais tempo e com maior valor agregado.

A sustentabilidade da eletromobilidade, portanto, não pode ser tratada de forma isolada da cadeia produtiva e dos instrumentos normativos que moldam seu desenvolvimento. A combinação entre dados técnicos robustos, critérios metodológicos claros e articulação entre atores institucionais é o que permite transformar os benefícios potenciais dos veículos elétricos em resultados tangíveis para a sociedade, para a indústria e para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AOYAGUE, Henry Yuzo Sasaki. Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS. Eletrificados crescem 145% no trimestre, 8 abril 2024. Disponível em: <https://abve.org.br/eletrificados-crescem-145-no-trimestre-e-tem-segundo-melhor-mes-da-historia/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. Critical Minerals Strategy 2023. Canberra: Department of Industry, Science and Resources, 2023. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/publications/critical-minerals-strategy-2023-2030>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BARBIERI, José Carlos. Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 312 p.

BARBIERI, José Carlos; CAJAZEIRA, J. E. R.; BRANCHINI, O. Cadeia de suprimento e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. *O Papel*, v. 70, n. 9, p. 52–72, set. 2009.

BAUMANN-PAULY, Dorothée; CREMER IYI, Serra; POSNER, Michael; BARRETT, Paul. Making Mining Safe and Fair: Artisanal Cobalt Extraction in the Democratic Republic of the Congo. White Paper. World Economic Forum (WEF), 2020.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 2.132, de 2025. Dispõe sobre diretrizes para o desenvolvimento da eletromobilidade no Brasil. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.camara.leg.br>. Acesso em: 20 dez. 2025.

BRASIL. Presidência da República. Presidente Lula assina decreto que regulamenta o Programa Mobilidade Verde e Inovação (MOVER). Brasília, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRASIL. Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República. Governo lança Painel Público com ações do Plano de Transformação Ecológica. Brasília, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CHEN, M. et al. Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. *Joule*, v. 3, p. 2622–2646, 2019.

COBALT INSTITUTE. State of the cobalt market 2020 report. Guildford: Cobalt Institute, 2021. Disponível em: https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2025/02/Cobalt-Institute-State-of-the-Cobalt-Market-Report_2020.pdf. Acesso em: 30 jan. 2026.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. Governo cria Secretaria Nacional de Eletromobilidade para integrar veículos elétricos à política energética. 2025. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

DOSHI, V. Critical minerals and the clean energy transition. *Energy Policy*, v. 138, 2020.

EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. CRC Press.

ELLINGSEN, L. A. W. et al. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, v. 18, n. 1, p. 113–126, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Eletromobilidade: Transporte rodoviário, agosto 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20(1).pdf). Acesso em: 30 jan. 2026.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. Lithium-Ion Battery Recycling. EPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/lithium-ion-battery-recycling>. Acesso em: 30 jan. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. Circular Economy Action Plan. Brussels: European Union, 2020. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en. Acesso em: 30 jan. 2026.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report. *EEA Report*, n. 13, 2018. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>. Acesso em: 30 jan. 2026.

EXAR. Litio: el proceso. [S. l.]: Exar S.A., [s. d.]. Disponível em: <https://www.exar.com.ar/litio-el-proceso/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FLEXER, V.; BASPINEIRO, C. F.; GALLI, C. I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, v. 639, p. 1188–1204, 2018.

FREITAS, Felipe Tomaz; MARCHESINI, Márcia Maria Penteado. Avaliação do ciclo de vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos. *Produto & Produção*, v. 23, n. 3, p. 1–20, 2022. Disponível em: <https://revistas.unisinos.br/index.php/producao/article/view/27076>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FUJIMORI, S.; ZHANG, R. The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios. *Environmental Research Letters*, v. 15, 2020.

GAINES, L. Lithium-ion Battery Recycling Processes: Research Towards a Sustainable Course. *Sustainable Materials and Technologies*, 2018.

GAO, S. et al. Integrating corporate website information into qualitative assessment for benchmarking green supply chain management practices for the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 311, 2021.

GARCIA, R.; LÓPEZ, M.; MARTINS, F. Strategies for extending battery lifetime in electric mobility: modularity, standardization and circular design. *Journal of Cleaner Production*, v. 356, 2022.

GEORGI-MASCHLER, T. et al. Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, v. 207, p. 173–182, 2012.

GOODENOUGH, J. B.; KIM, Y. Challenges for rechargeable Li batteries. *Chemistry of Materials*, v. 22, n. 3, p. 587–603, 2010.

GR3 DISTRIBUIDORA. Processos. Disponível em: <http://gr3distribuidora.com.br/gr3.php?action=processos>. Acesso em: 10 nov. 2025.

HARPER, G. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, v. 575, p. 75–86, 2019.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. (ed.). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Cham: Springer, 2018.

HOHMANN, Matheus et al. Análise de viabilidade técnica da utilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 9., 2022, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, 2022.

HUANG, Z. et al. Modeling and multi-objective optimization of a stand-alone PV-hydrogen-retired EV battery hybrid energy system. *Energy Conversion and Management*, v. 181, p. 80–92, 2019.

HULBERT, B. et al. Direct Lithium Extraction: Technical Review and Environmental Assessment. *Energy & Environmental Materials*, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 30 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global Critical Minerals Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>. Acesso em: 30 jan. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

IRENA. Electric Vehicles: technology brief. Abu Dhabi: IRENA, 2017. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2017/Feb/Electric-vehicles-Technology-brief>. Acesso em: 30 jan. 2026.

ISN ONLINE. Deslizamento em mina no Congo deixa mais de 30 mortos. 17 nov. 2025. Disponível em: <https://isnonline.com.br/2025/11/17/deslizamento-em-mina-no-congo-deixa-mais-de-30-mortos/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

JIANG, S. et al. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, n. 262, 2020.

KOREA BATTERY INDUSTRY ASSOCIATION. Handbook on Battery Energy Storage System. Seoul: KBIA, 2017.

LATAM MOBILITY. Electromobility Law in Brazil: Federal, State and Municipal Progress. 2025. Disponível em: <https://latamobility.com/en/electromobility-law-in-brazil-federal-state-and-municipal-progress/>. Acesso em: 30 jan. 2026

NAKAMURA, T. et al. Solid-State Batteries: Materials, Systems and Applications. *Nature Energy*, v. 6, 2021.

ONOHARA, T. Energy efficiency of electric and internal combustion vehicles. *Energy Reports*, v. 8, p. 1123–1135, 2022.

PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA (PNME). Publicações técnicas e estudos. Brasília, 2025. Disponível em: <https://pnme.org.br/tag/mobilidadeeletrica/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

RODRIGUEZ, T. B.; CONSONI, F. L. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 19, 2020.

ROMARE, M.; DAHLLOF, L. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017.

SANCHES, L. D. S. Contexto energético da mobilidade individual urbana no Brasil. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, 2021.

SANTANNA, G. et al. Desafios e Oportunidades na Reciclagem de Baterias de Íon-Lítio no Brasil. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2021.

SANTOS, G. R. et al. O impacto da eletromobilidade. *South American Development Society Journal*, v. 7, n. 21, 2021.

SILVA, N. F. S. et al. A importância da reciclagem na sustentabilidade de carros elétricos. *Conexão Ciência*, v. 14, n. 3, 2019.

TARASCON, J.-M.; ARENZ, M. Building Better Batteries. *Nature Materials*, v. 21, 2022.

THE LIFE CYCLE INITIATIVE. Strategy 2022–2027, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Life Cycle Initiative: Life Cycle Thinking and Assessment for Sustainability. Paris: UNEP, 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/topics/finance-and-economic-transformations/driving-transformation-science-and-knowledge/life-cycle>. Acesso em: 30 jan. 2026.

WIEDMANN, T.; MINX, J. A Definition of “Carbon Footprint”. New York: Nova Science Publishers, 2008.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida no Brasil. *Produção*, v. 23, n. 2, 2013.

ZUBI, G. et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 89, 2018.