



FACULDADES
DOM BOSCO

Fabio Henrique Damazio Ferreira
Pedro Henrique Carvalho Magaldi

As baterias dos veículos elétricos e o esgotamento mineral: implicações ambientais e de sustentabilidade

Resende - RJ
2025

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE**

**Fabio Henrique Damazio Ferreira
Pedro Henrique Carvalho Magaldi**

As baterias dos veículos elétricos e o esgotamento mineral: implicações ambientais e de sustentabilidade

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Cursos de Engenharia Elétrica e de Produção, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica e de Produção

Resende - RJ
2025

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

F383	<p>Ferreira, Fabio Henrique Damazio As baterias dos veículos elétricos e o esgotamento mineral: implicações ambientais e de sustentabilidade / Fabio Henrique Damazio Ferreira; Pedro Henrique Carvalho Magaldi - 2025. 92 f.</p> <p>Orientador: Luiz Fernando Ribas Monteiro Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Elétrica e de Produção da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Engenharia de produção. 3. Veículo elétrico. 4. Bateria. 5. Economia circular. 6. Sustentabilidade. I. Magaldi, Pedro Henrique Carvalho. II. Monteiro, Luiz Fernando Ribas. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 629.331(043)</p>
------	---



**FÁBIO HENRIQUE DAMAZIO FERREIRA
PEDRO HENRIQUE CARVALHO MAGALDI**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHARIA ELÉTRICA E ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. (a).: DSc. Luiz Fernando Ribas Monteiro
Orientador

Prof. (a).: Prof. Esp. Anderson Fernandes de Barros
Membro da Banca

Prof. (a).: Prof. Esp. Bianca Salgado Azevedo
Membro da Banca

dedico este trabalho,
de modo especial, a Deus misericordioso

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça. Agradecemos por nossas vidas, nossa inteligência, nossa família e nossos amigos; ao nosso orientador, Prof. Dr. Luiz Fernando Ribas que jamais deixou de nos incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível; aos nossos pais Flavio e Luciana e Pedro e Iara, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram nossos estudos; aos funcionários das Faculdades Dom Bosco pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

O avanço da demanda energética global e a necessidade de reduzir emissões impulsionam a expansão dos veículos elétricos como estratégia para a transição energética. Este trabalho objetiva analisar, por meio de revisão bibliográfica sistemática, os impactos ambientais e o esgotamento mineral associados às baterias desses veículos, considerando aspectos tecnológicos, cadeias de suprimentos e práticas de reciclagem. A metodologia consistiu na seleção e análise comparativa de estudos científicos e institucionais que tratam de mobilidade elétrica, qualidade ambiental, recursos minerais críticos e economia circular.

Os resultados indicam que, embora os veículos elétricos reduzam significativamente as emissões durante o uso, a produção e o ciclo de vida das baterias dependem de minerais críticos, como lítio, cobalto e níquel, cuja extração apresenta riscos socioambientais e geopolíticos. Também foram identificadas limitações nos processos atuais de reciclagem, desafios de disponibilidade material e necessidade de maior integração de práticas de economia circular.

Conclui-se que a sustentabilidade das baterias de veículos elétricos depende não apenas da mitigação de emissões, mas também do avanço tecnológico, do aprimoramento da gestão dos recursos minerais e da ampliação das cadeias de reciclagem, a fim de garantir segurança energética, qualidade ambiental e disponibilidade material no longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: veículos elétricos; baterias; esgotamento mineral; qualidade ambiental; reciclagem; economia circular; sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing global energy demand and the need to reduce pollutant emissions have driven the expansion of electric vehicles as a key strategy for the energy transition. This study aims to analyze, through a systematic literature review, the environmental impacts and mineral depletion associated with electric vehicle batteries, considering technological factors, supply chains, recycling processes, and the principles of circular economy. The methodology involved selecting and comparatively analyzing scientific and institutional sources addressing electric mobility, environmental quality, critical mineral resources, and sustainability practices.

The results indicate that, although electric vehicles significantly reduce emissions during use, the production and life cycle of their batteries rely on critical minerals, such as lithium, cobalt, and nickel, whose extraction is linked to socio-environmental and geopolitical risks. The analysis also identified limitations in current recycling processes, material availability challenges, and the need for broader implementation of circular economy strategies.

It is concluded that the sustainability of electric vehicle batteries depends not only on emission mitigation, but also on technological advancements, improved management of mineral resources, and the expansion of recycling chains, in order to ensure long-term energy security, environmental quality, and material availability.

KEYWORDS: electric vehicles; batteries; mineral depletion; environmental quality; recycling; circular economy; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma bateria automotiva.....	19
Figura 2 – Ciclo de vida das baterias dos veículos elétricos.....	21
Figura 3 – Esquema ilustrativo do fluxo bidirecional de energia num sistema típico V ₂ G.....	25
Figura 4 – Comparativo esquemático entre tipos de veículos elétricos	42
Figura 5 – Fluxo Metodológico	49
Figura 6 – Fluxo simplificado do ciclo de vida das baterias de íon-lítio.....	60
Figura 7 – Etapas do ciclo de vida das baterias segundo o modelo GREET.....	60
Figura 8 – Ciclo de economia circular das baterias de íon-lítio.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Projeção do crescimento da frota de veículos elétricos.....	29
Gráfico 2 – Vendas e participação de mercado de VEs por região (2024)	32
Gráfico 3 – Demanda de baterias para VEs (GWh)	35
Gráfico 4 – Capacidade Global de Reciclagem (GWh/ano)	36
Gráfico 5 – Taxa de reciclagem de baterias (2022–2024)	37
Gráfico 6 – Distribuição dos impactos ambientais das baterias ao longo do ciclo de vida	64
Gráfico 7 – Participação dos principais países produtores de minerais críticos (2024)	69
Gráfico 8 – Distribuição das emissões de CO ₂ ao longo do ciclo de vida das baterias	74
Gráfico 9 – Projeção do PEM para minerais críticos de VEs até 2040	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção Mundial de Minerais Seleccionados por País	22
Tabela 2 – Produção Mundial Estimada de Elementos de Terras Raras (ETR) por Principais Países Produtores (em toneladas métricas de Óxidos de Terras Raras Equivalentes - OTR)	24
Tabela 3 – Injeção de Energia por VE em Cenários de Penetração da Frota.....	26
Tabela 4 – Custo-Benefício Anual do V2G para Usuário	26
Tabela 5 – Crescimento médio anual da frota de veículos elétricos por cenário.....	28
Tabela 6 – Frota, Redução de CO ₂ e Demanda Adicional de Energia de Veículos Elétricos por Cenário	29
Tabela 7 – Vendas e Participação de Mercado por Região.....	31
Tabela 8 – Conteúdo médio de minerais por 1 kWh de bateria	33
Tabela 9 – Preço médio das baterias de íon-lítio (2022–2024)	38
Tabela 10 – Comparativo da demanda global anual de insumos para baterias (2019 x 2030)	39
Tabela 11 – Comparativo entre veículos à bateria e veículos à combustão.....	41
Tabela 12 – Comparativo quantitativo entre VEB, VEH, VECC e veículos à combustão	41
Tabela 13 – Produção e projeção de minerais	44
Tabela 14 – Fontes de informação e bases de dados utilizadas na pesquisa	51
Tabela 15 – Palavras-chave e combinações booleanas utilizadas na pesquisa	52
Tabela 16 – Comparação dos tipos de baterias quanto ao impacto ambiental e desempenho	65
Tabela 17 – Tecnologias de reciclagem de baterias de íon-lítio e suas características	67
Tabela 18 – Projeção de demanda por minerais críticos para baterias de VEs	69
Tabela 19 – Distribuição média dos impactos ambientais no ciclo de vida de um VE	71
Tabela 20 – Emissões de CO ₂ -equivalente estimadas para baterias de 60 kWh	73
Tabela 21 – Estimativa do PEM para minerais críticos em VEs (2025–2040)	75
Tabela 22 – Impacto da reciclagem e segunda vida na redução de PEM e CO ₂	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPS	Cenário de Políticas Atuais
IEA	Agência Internacional de Energia
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
SDS	Cenário de Desenvolvimento Sustentável
STEPS	Cenário de Políticas Declaradas
USGS	United States Geological Survey
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VECC	Veículo Elétrico à Célula de Combustível
VMCI	Veículo de Motor de Combustão Interna

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
1.2 Justificativas	15
1.3 Discussão sobre o capítulo.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Os cenários do desenvolvimento sustentável e os veículos elétricos	27
2.2 O mercado dos veículos elétricos	30
2.3 A demanda e os desafios associados à produção e reciclagem das baterias	32
2.3.1 Demanda global de baterias e crescimento produtivo	34
2.3.2 Capacidade de reciclagem e recuperação de materiais.....	35
2.3.3 Custos, composição e desafios minerais	37
2.4 Configurações de veículos elétricos	39
2.5 Argumentos contrários à implementação dos VEs em virtude da escassez de minerais como matéria-prima	42
2.6 Discussão sobre o capítulo	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Delineamento metodológico.....	47
3.2 Fontes e bases de dados	50
3.3 Critérios de seleção e organização do material	52
3.4 Procedimentos de análise e interpretação	53
3.5 Síntese metodológica e reprodutibilidade	54
3.6 Discussão sobre o capítulo.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Panorama global da cadeia de suprimentos de baterias e seus impactos	56
4.2 Impactos ambientais e energéticos das baterias de veículos elétricos: análise com base no modelo GREET	58
4.3 Impactos ambientais e energéticos ao longo do ciclo de vida das baterias	62
4.4 Comparação de impactos ambientais entre tecnologias de baterias.....	63
4.5 Reciclagem e economia circular das baterias	66
4.6 Avaliação do potencial de esgotamento mineral (PEM)	68
4.7 Síntese dos impactos ambientais e estratégias mitigadoras	70

4.8	Análise quantitativa própria.....	73
4.8.1	Estimativa de emissões de CO ₂ por tipo de bateria	73
4.8.2	Potencial de esgotamento mineral (PEM) projetado	75
4.8.3	Cenário de mitigação por reciclagem e segunda vida	76
4.8.4	Interpretação dos resultados	77
4.9	Discussão sobre o capítulo.....	77
5.	CONCLUSÕES	79
5.1	Limitações do estudo	80
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado dos veículos elétricos (VEs) nas últimas duas décadas tem redefinido o setor automotivo e exercido forte influência sobre a demanda global por minerais críticos. A expansão dessa tecnologia, impulsionada por metas de descarbonização e políticas de transição energética, elevou substancialmente o consumo de lítio, cobalto, níquel e manganês, elementos essenciais às baterias de íon-lítio, que atualmente apresentam densidade energética entre 180 e 280 Wh/kg (IBARRA-GUTIÉRREZ et al., 2021). Essa intensificação gera preocupações sobre esgotamento mineral, impactos socioambientais e vulnerabilidades da cadeia produtiva.

O mercado global de VEs registrou avanços significativos, com aumento do *market share* de 2,6% para 4% entre 2019 e 2020, mesmo em cenário de pandemia (WHEELER, 2020; GORNER; PAOLI, 2020). A Agência Internacional de Energia estima que a frota mundial possa atingir 140 milhões de unidades até 2030, evitando cerca de 1 gigatonelada de CO₂ por ano (IEA, 2018). Esse desempenho está associado à maior eficiência energética dos sistemas de tração elétrica, que convertem 85% a 90% da energia em movimento, enquanto motores à combustão apresentam rendimento médio entre 30% e 35% (IEA, 2021; ICCT, 2020).

Apesar dos benefícios ambientais na fase de uso, o ciclo produtivo das baterias desloca impactos relevantes para as etapas iniciais de extração e processamento. A produção de uma bateria NMC (níquel-manganês-cobalto) demanda aproximadamente 0,7 kg de lítio, 0,11 kg de cobalto, 0,35 kg de níquel e 0,06 kg de manganês por kWh fabricado (IEA, 2022). Assim, uma bateria de 60 kWh concentra mais de 50 kg de minerais críticos, o que reforça a dependência por matérias-primas estratégicas. Além disso, essa cadeia é altamente concentrada geograficamente: cerca de 70% do cobalto mundial é extraído na República Democrática do Congo (USGS, 2023), e mais de 60% do refino global de lítio ocorre na China (IEA, 2022).

Outro ponto relevante refere-se ao impacto ambiental da extração e do processamento. A mineração de lítio em salmouras pode consumir 1,9 a 2,2 milhões de litros de água por tonelada de carbonato de lítio equivalente, afetando regiões áridas como o Salar de Atacama (IEA, 2021; ICMM, 2020). O refino do cobalto também apresenta elevada intensidade de emissões, podendo gerar até 12 t CO₂e por tonelada refinada (IEA, 2022). Esses dados evidenciam que a sustentabilidade dos VEs deve considerar todo o ciclo de vida, e não apenas a fase de uso.

Nesse contexto, estratégias de reuso, segunda vida e reciclagem surgem como alternativas para reduzir a pressão sobre recursos minerais. Processos hidrometalúrgicos modernos

permitem recuperar 90% a 95% do cobalto, 90% do níquel e até 80% do lítio (IEA, 2022), contribuindo para reduzir impactos socioambientais e riscos de desabastecimento.

Diante desses desafios, este estudo configura-se como uma *revisão bibliográfica narrativa*, de caráter analítico-comparativo, baseada exclusivamente em dados secundários recentes (IEA, USGS, DOE, entre outros).

Desse modo, busca-se compreender de forma integrada como a cadeia produtiva das baterias influencia o esgotamento mineral e os impactos ambientais associados. O objetivo é analisar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados à produção, uso e destinação das baterias de VEs, apresentando uma síntese comparativa das evidências disponíveis e discutindo estratégias que contribuam para uma transição energética mais sustentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar os impactos ambientais e o esgotamento de recursos minerais associados à cadeia produtiva das baterias de veículos elétricos, além de avaliar o papel da reciclagem, das políticas públicas e dos avanços tecnológicos na mitigação desses efeitos. A análise considera todo o ciclo de vida das baterias, desde a extração de insumos até o descarte ou reaproveitamento, com ênfase em minerais estratégicos como lítio, cobalto, níquel, manganês e terras raras. Busca-se, ainda, compreender como fatores técnicos, produtivos e regulatórios influenciam a sustentabilidade desse segmento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a composição, a origem e a disponibilidade dos elementos minerais cruciais na fabricação de baterias para veículos elétricos.
- Analisar as consequências ambientais, financeiras e geopolíticas inerentes à mineração e ao ciclo completo das baterias.
- Avaliar as diretrizes governamentais e os marcos regulatórios brasileiros concernentes à manufatura, manejo, reutilização e reciclagem de baterias, observando seus reflexos na sustentabilidade e na governança.

- Explorar as recentes tecnologias de armazenamento energético e o papel da reciclagem no progresso tecnológico e na diminuição do impacto ambiental.
- Sugerir recomendações que integrem o avanço tecnológico, as políticas públicas e a sustentabilidade visando otimizar métodos produtivos, eficiência e práticas regulatórias.

1.2 Justificativas

No século XXI, uma das fundamentais mudanças industriais e tecnológicas é representada pela crescente expansão mercadológica dos veículos elétricos. A necessidade pela mitigação dos danos ambientais gerados em consequência da combustão de combustíveis fósseis impulsiona essa mudança. Nesse contexto, as baterias automotivas configuram-se como elementos centrais do desempenho, da eficiência energética e da autonomia dos veículos elétricos, tornando sua compreensão essencial para a engenharia elétrica.

As tecnologias recentes — como baterias de estado sólido e sistemas sódio-íon — exigem estudos aprofundados sobre densidade energética, ciclos de recarga e durabilidade, reforçando a motivação técnica deste estudo. Essa perspectiva envolve também o papel dos sistemas de tração, da gestão térmica e das arquiteturas de carregamento, que impactam diretamente o rendimento e a vida útil das baterias. Além disso, a forte integração entre engenharia elétrica e novas arquiteturas de armazenamento, como *vehicle-to-grid* e *grid-to-vehicle*, reforça a necessidade de compreender a sustentabilidade energética associada a esses sistemas.

A urgência em compreender os impactos do uso de baterias veiculares sobre o esgotamento de minerais estratégicos — como lítio, cobalto, manganês e terras raras — decorre de preocupações ambientais, socioeconômicas e geopolíticas. Esses minerais apresentam extração intensiva, desafios de disponibilidade futura e efeitos significativos sobre ecossistemas e comunidades locais.

Adicionalmente, a engenharia de produção e a gestão ambiental exigem uma abordagem que integre sustentabilidade, logística reversa, economia circular e certificações como a ISO 14001, fundamentais para minimizar impactos e promover qualidade produtiva. O papel das políticas públicas reforça essa motivação: programas e marcos normativos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), o Programa Rota 2030 e o Plano Nacional de Eletromobilidade (PNME) são essenciais para orientar a indústria nacional rumo a práticas sustentáveis, inovações tecnológicas e cadeias de reciclagem viáveis.

Em suma, a necessidade de integrar desempenho técnico, impactos ambientais, esgotamento mineral e viabilidade econômica justifica a execução desta pesquisa. A proposta central é fornecer fundamentação científica, técnica e regulatória que permita desenvolver estratégias capazes de equilibrar eficiência energética, sustentabilidade e competitividade industrial, contribuindo para o desenvolvimento da engenharia aplicada à transição energética.

1.3 Discussão sobre o capítulo

A análise integrada apresentada no capítulo evidencia que a mobilidade elétrica, embora frequentemente associada à redução das emissões veiculares, envolve uma série de implicações técnicas e ambientais que vão muito além da fase de uso. Os dados sobre a expansão do mercado e a eficiência energética dos veículos elétricos mostram que essa tecnologia avança de forma consistente e tende a ocupar papel central na transição energética global. No entanto, a dependência de minerais estratégicos — especialmente lítio, cobalto, níquel e manganês — revela uma nova camada de desafios que não pode ser ignorada na engenharia contemporânea.

A introdução demonstra que a sequência de impactos se desloca para o início da cadeia produtiva, concentrando pressões na mineração e no refino desses materiais. Esse deslocamento altera o enfoque tradicional da sustentabilidade no setor automobilístico: antes centrada na redução de consumo e emissões, agora abrangendo também a segurança de suprimento mineral, os riscos geopolíticos e a intensidade energética dos processos industriais. A concentração da extração e do refino em poucos países reforça vulnerabilidades estruturais e evidencia que a transição energética depende tanto de avanços tecnológicos quanto de estabilidade econômica e política.

As justificativas apresentadas reforçam a dimensão multidisciplinar do tema. Ao contemplar engenharia elétrica, engenharia de produção, logística, gestão ambiental e políticas públicas, o capítulo mostra que nenhuma dessas áreas, isoladamente, é suficiente para compreender o fenômeno. Além disso, ao mencionar tecnologias emergentes e estratégias de circularidade, o texto evidencia que o futuro das baterias — e, conseqüentemente, da mobilidade elétrica — está intimamente ligado à capacidade de desenvolver rotas produtivas mais eficientes, materiais alternativos e sistemas robustos de reuso e reciclagem.

Assim, a discussão aponta que o problema central desta pesquisa envolve equilibrar desempenho técnico, disponibilidade mineral, viabilidade econômica e responsabilidade socioambiental. O capítulo, portanto, estabelece de maneira sólida o ponto de partida do estudo:

entender a cadeia produtiva das baterias em toda a sua extensão, reconhecendo que a sustentabilidade dos veículos elétricos depende de uma visão integrada do ciclo de vida. Essa perspectiva amplia o campo de análise e fundamenta a relevância do trabalho no contexto da engenharia aplicada à transição energética.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As baterias elétricas armazenam energia por meio de reações eletroquímicas e liberam essa energia de maneira controlada conforme a necessidade (CHAPMAN, 2011). Nos veículos elétricos, assumem função central ao fornecer energia ao motor de tração e aos sistemas auxiliares. Também podem atuar como elemento de integração com a rede elétrica em sistemas bidirecionais, tema aprofundado mais adiante.

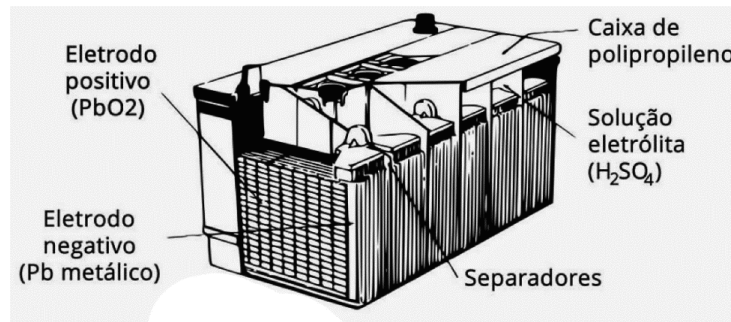
A principal diferença entre o armazenamento eletroquímico e a utilização de combustíveis fósseis é que as baterias permitem que a energia seja previamente carregada para uso posterior. Os combustíveis fósseis, por outro lado, liberam energia por meio da combustão contínua. Essa distinção favorece uma eficiência energética superior a 90% nas baterias modernas. Motores a combustão interna, em comparação, dificilmente ultrapassam 35% de eficiência (TARASCON, 2001; NITTA et al., 2015; US DOE, 2024). Esse contraste evidencia o potencial dos veículos elétricos como alternativa mais eficiente e ambientalmente vantajosa.

Os veículos elétricos também apresentam alta compatibilidade com fontes renováveis intermitentes, como a geração solar e eólica. Isso ocorre porque podem atuar como unidades flexíveis de armazenamento distribuído, contribuindo para a estabilidade da rede elétrica. As baterias desses veículos são estruturadas em células, módulos e pacotes, cada um com funções específicas relacionadas ao controle térmico, à segurança e à entrega de potência.

Cada célula é formada por quatro componentes essenciais: ânodo, cátodo, eletrólito e separador (TARASCON, 2001). O desempenho dessas células é comumente avaliado pela densidade energética gravimétrica (Wh/kg), densidade volumétrica (Wh/L), potência específica (W/kg), durabilidade até que a capacidade atinja 80% do valor inicial e eficiência coulômbica. Tecnologias de ponta já superam 99,5% de eficiência coulômbica (NITTA et al., 2015).

Para auxiliar a compreensão da estrutura mencionada, apresenta-se a Figura 1, que ilustra a organização dos principais elementos de uma bateria automotiva.

Figura 1 - Desenho esquemático de uma bateria automotiva



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O cátodo funciona como polo positivo da célula e é normalmente composto por óxidos metálicos, como LiCoO₂, LiNiMnCoO₂ ou LiFePO₄. Esses materiais servem como depósito de íons lítio durante os ciclos de carga e descarga (NITTA et al., 2015). A composição do cátodo influencia diretamente a densidade energética e o custo final da bateria. Tecnologias baseadas em NMC apresentam faixa típica entre 180 e 280 Wh/kg, enquanto composições LFP variam entre 140 e 160 Wh/kg. Apesar da densidade menor, o LFP apresenta maior estabilidade térmica e menor propensão a eventos de fuga térmica (IEA, 2022; US DOE, 2024). Essas diferenças tornam importante distinguir eficiência energética de segurança operacional ao avaliar as químicas disponíveis.

O ânodo é responsável por armazenar os íons durante o processo de carga e liberá-los na descarga. Costuma ser produzido com grafite natural ou sintético, o que garante estabilidade e boa ciclabilidade (SZCZECH; JIN, 2011). Ânodos convencionais apresentam capacidade teórica em torno de 350 a 370 mAh/g, enquanto alternativas baseadas em silício podem superar 1000 mAh/g. A expansão volumétrica e a degradação acelerada ainda limitam a aplicação ampla dos ânodos avançados, embora representem potencial de aumento significativo da densidade energética (DUNN et al., 2011).

O eletrólito é o meio responsável pela condução dos íons entre os eletrodos, sem permitir a passagem de elétrons. Pode estar presente nos estados líquido, sólido ou em forma de gel. Eletrólitos líquidos utilizam frequentemente o sal LiPF₆ dissolvido em solventes orgânicos. Já os eletrólitos sólidos, empregados em tecnologias de bateria de estado sólido, oferecem potencial para alcançar densidade energética próxima de 400 Wh/kg, embora os principais desafios ainda envolvam custos elevados e condutividade iônica reduzida (IEA, 2023). Essa evolução indica uma rota tecnológica promissora para baterias de maior segurança e densidade.

O separador é uma membrana porosa que impede o contato direto entre ânodo e cátodo, evitando curtos-circuitos e contribuindo para a segurança da célula. Separadores modernos

suportam temperaturas superiores a 200 °C antes de colapsar, o que é essencial em ambientes de alta densidade energética, como nas químicas NCA e NMC (ICCT, 2022). A capacidade de resistência térmica do separador torna-se especialmente relevante devido à maior sensibilidade dessas químicas ao aquecimento.

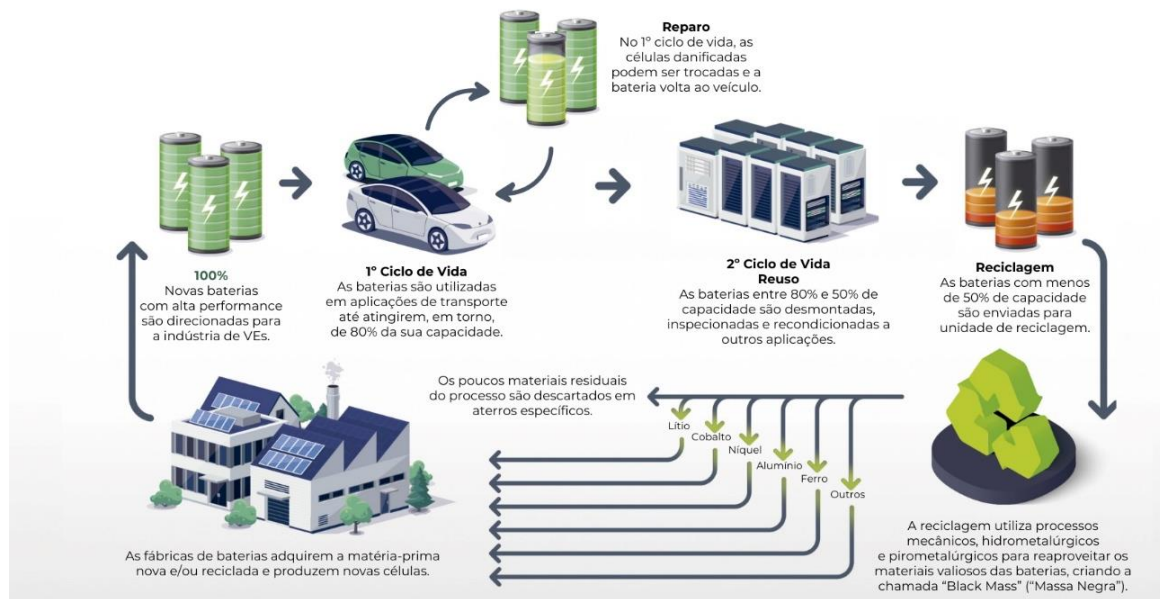
As baterias automotivas fornecem energia ao motor de tração e aos sistemas auxiliares, além de possibilitarem a integração com a rede elétrica em modos unidirecionais (G2V) ou bidirecionais (V2G). Estudos recentes indicam que sistemas V2G podem fornecer até 10 kW por veículo conectado, o que contribui para o equilíbrio da demanda energética em horários de pico (ENERGY ADVANCES, 2022). Essa integração marca o ponto de transição entre o funcionamento puramente veicular e a atuação do veículo como recurso energético distribuído, assunto desenvolvido mais adiante neste capítulo.

A densidade energética é um dos fatores que mais influenciam a autonomia, o desempenho e a eficiência geral do veículo elétrico. Outros fatores relevantes incluem durabilidade das células, capacidade de recarga rápida e eficiência de conversão (SZCZECH; JIN, 2011; NYKVIST; NILSSON, 2015). Tecnologias NMC suportam entre 1500 e 2000 ciclos antes de atingir 80% da capacidade, enquanto tecnologias LFP frequentemente superam 3000 ciclos, característica que explica sua utilização crescente em frotas de uso intensivo, como táxis e veículos de transporte urbano (IEA, 2024). Esse contraste evidencia o equilíbrio necessário entre densidade energética, vida útil e custo.

A escolha dos materiais do ânodo e do cátodo influencia de forma decisiva a vida útil da bateria e os riscos de degradação acelerada ou superaquecimento (DUNN et al., 2011). No ciclo de vida das baterias, que envolve produção, uso, reuso e reciclagem, minerais como lítio, manganês, cobalto e terras raras são essenciais. Após o uso automotivo, baterias podem ser destinadas a sistemas estacionários de armazenamento, prolongando sua utilidade por 5 a 10 anos e reduzindo a demanda por mineração primária (GAINES, 2014; HARPER et al., 2019). Esse reaproveitamento, chamado de segunda vida, contribui para a economia circular e para a redução dos impactos associados à extração mineral.

Para representar de forma estruturada essas etapas, apresenta-se a Figura 2, que sintetiza o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos.

Figura 2 – Ciclo de vida das baterias dos veículos elétricos



Fonte: ABVE (2024).

Os elementos terras raras, como cério, lantânio, neodímio e praseodímio, exercem função importante na densidade de potência de motores elétricos e em componentes avançados de baterias. Esses elementos são considerados estratégicos pela relevância tecnológica e pelo papel geopolítico associado à sua produção (BINNEMANS et al., 2013; LEITE; ARAÚJO, 2016). Em aplicações automotivas, ímãs permanentes formados a partir de neodímio e praseodímio podem alcançar densidades magnéticas superiores a 1,3 T, o que aumenta a eficiência dos motores síncronos.

A China domina aproximadamente 80% da produção global de terras raras e controla quase 90% da capacidade de refino mundial, o que configura uma elevada concentração de capacidade produtiva e influência geoeconômica (HUMPHRIES, 2013; ALONSO et al., 2012). Essa predominância cria uma conexão direta entre a tecnologia utilizada nos veículos elétricos e a geopolítica dos minerais críticos.

Outros países, incluindo Brasil, Groenlândia e Ucrânia, possuem reservas relevantes, embora ainda apresentem baixa exploração comercial (MARTINS, 2024). No caso brasileiro, estimam-se aproximadamente 22 milhões de toneladas de reservas de terras raras (USGS, 2023), porém menos de 1% apresenta atividade minerária efetiva. A ampliação dessa exploração requer investimentos em pesquisa, infraestrutura de beneficiamento mineral e políticas industriais de longo prazo.

A extração de minerais estratégicos utilizados em baterias afeta diretamente dimensões ambientais, sociais e econômicas. A Agência Internacional de Energia projeta que a demanda por minerais críticos pode aumentar entre 6 e 40 vezes até 2040, a depender do cenário de transição energética considerado. Essa estimativa reforça a conexão entre o avanço tecnológico das baterias e os impactos ambientais da mineração.

No caso do lítio, as duas principais rotas produtivas apresentam impactos distintos. A extração em salmouras, predominante no Chile, Argentina e Bolívia, demanda entre 1,9 e 2,2 milhões de litros de água para produzir uma tonelada de carbonato de lítio equivalente (LCE). O lítio derivado de rochas australianas apresenta menor impacto hídrico, porém consome entre 3,5 e 5,5 MWh por tonelada processada. Essa comparação evidencia como diferentes contextos geológicos influenciam o impacto ambiental total.

A cadeia produtiva do cobalto apresenta desafios ainda mais significativos. Aproximadamente 72% da produção mundial ocorre na República Democrática do Congo, em condições frequentemente marcadas por insegurança, informalidade e ocorrência documentada de trabalho infantil (AMNESTY INTERNATIONAL, 2016; BINNEMANS et al., 2013). Cerca de 20% desse volume provém de mineração artesanal, modalidade que apresenta maior risco socioambiental. As emissões associadas ao processo de refino podem atingir 12 t CO₂e por tonelada, dependendo da rota industrial utilizada.

Minerais como níquel e manganês também exercem papel importante na produção de baterias, sobretudo nas químicas NMC. O níquel classe 1 apresenta emissões médias entre 8 e 18 t CO₂e por tonelada, enquanto o manganês varia entre 1,5 e 3 t CO₂e por tonelada.

Para sintetizar a concentração global desses recursos, apresenta-se na Tabela 1 a Produção Mundial de Minerais Selecionados.

Tabela 1 – Produção Mundial de Minerais Selecionados por País

Mineral	País Líder (2023)	Produção (kt)
Lítio (Li Contido)	Austrália	86
Cobalto	República Democrática do Congo (RDC)	170
Níquel	Indonésia	1.800,00
Manganês	África do Sul	7.300,00

Fonte: USGS (2024, 2025)

É uma questão de poder político e estratégico o controle dos metais de terras raras, haja vista que os investimentos tecnológicos mundiais podem ser direcionados, além dos preços

terem a possibilidade de serem influenciados pelos países dominantes (HUMPHRIES, 2013; BINNEMANS et al., 2013).

Atualmente, cerca de 90% da capacidade global de refino e separação de terras raras está concentrada na China (USGS, 2024), o que lhe permite influenciar preços internacionais e controlar fluxos logísticos, afetando diretamente setores como eletrônica, defesa e eletromobilidade. Em 2010, por exemplo, a China reduziu suas exportações em aproximadamente 40%, provocando aumento global de preços superior a 300% em alguns óxidos específicos (HUMPHRIES, 2013).

Os maiores detentores dessas reservas minerais de cunho estratégico têm a possibilidade de auferir receitas econômicas altamente significativas, porém é necessário que ponderem sua exploração conciliada ao desenvolvimento social, governança e sustentabilidade. No Brasil, para que os recursos estratégicos sejam transmutados em vantagem competitiva de mercado de modo sustentável, o investimento em políticas públicas, reciclagem e inovação tecnológica é crucial (LEITE; ARAÚJO, 2016; MARTINS, 2024).

O Brasil possui aproximadamente 22 milhões de toneladas de reservas estimadas de terras raras (USGS, 2024), representando cerca de 20% das reservas mundiais. O mercado global de terras raras movimentou US\$ 9,1 bilhões em 2022, com previsão de alcançar US\$ 16 bilhões até 2030 (ALLIED MARKET RESEARCH, 2023).

O cenário atual de disputa mundial pelos metais de terras raras possui reflexo direto no preço, na segurança de suprimento logístico e na competitividade industrial dos veículos eletrificados. Também estimula o desenvolvimento de inovações tecnológicas, como baterias de sódio, lítio reciclado, cátodos avançados e baterias de estado sólido, bem como políticas de diversificação de fornecedores e expansão das cadeias de reciclagem (GAINES, 2014; ZHANG et al., 2025).

Estimativas apontam que a demanda por neodímio e praseodímio pode aumentar entre 100% e 150% até 2035, impulsionada pela expansão dos motores síncronos de ímã permanente para veículos elétricos (IEA, 2022). Entre 2020 e 2022, o preço médio do óxido de NdPr subiu aproximadamente 70% (DENG et al., 2023), refletindo a volatilidade resultante da concentração geográfica da produção.

Para evidenciar a concentração global desses elementos estratégicos e seu impacto direto sobre competitividade industrial, segurança de suprimento e formação de preços, apresenta-se a Tabela 2, que sintetiza a produção estimada de elementos de terras raras entre os principais países produtores, expressa em toneladas métricas de óxidos equivalentes (t OTR)

Tabela 2 – Produção Mundial Estimada de Elementos de Terras Raras (ETR) por Principais Países Produtores (em toneladas métricas de Óxidos de Terras Raras Equivalentes - OTR)

País (Principal Explorador)	Produção Estimada em 2024 (kt OTR)	Produção Estimada em 2021 (kt OTR)	Produção Estimada em 2019 (kt OTR)
China	270	168	132
Estados Unidos	45	43	26
Burma (Mianmar)	31	26	30
Austrália	13	22	21
Nigéria	13	-	-
Tailândia	13	7	8
Índia	2,9	3	3
Rússia	2,5	2,7	2,7
Outros Países	~0	~5	~15
Total Mundial	390	276,6	237

Fonte: Elaborado pelo autor com base em USGS (2020; 2022; 2024).

A evolução das baterias de veículos elétricos (VEs) possibilitou o desenvolvimento dos modelos *Grid-to-Vehicle* (G₂V) e *Vehicle-to-Grid* (V₂G), nos quais o veículo atua como consumidor ou fornecedor temporário de energia, respectivamente. No modo G₂V, o VE recebe eletricidade da rede para recarga de baterias, permitindo aproveitamento de horários de menor demanda ou maior disponibilidade de fontes renováveis. Já no modo V₂G, o veículo devolve energia à rede, contribuindo para estabilização de frequência e tensão, resposta a picos de demanda e integração de geração intermitente (KEMPTON & TOMIĆ, 2005; LOPES et al., 2009; SUN, 2025).

A implementação desses modos requer carregadores bidirecionais, sistemas de gerenciamento e monitoramento do estado de carga e algoritmos de controle integrados à rede elétrica e ao veículo. Estudos indicam que, mesmo com participação moderada da frota, o V₂G pode reduzir a necessidade de armazenamento estacionário em até 22% (ENERGY ADVANCES, 2022).

Diversos estudos de caso demonstram o potencial dessas tecnologias. Na University of Rome Tor Vergata, VEs forneceram energia à rede universitária em horários de pico, equilibrando disponibilidade de veículos e demanda (*Vehicle to Grid Services in University Campuses: A Case Study at the University of Rome Tor Vergata*, 2025). Em Berlim, simulações indicaram que, dependendo da penetração da frota (>30%) e do tipo de veículo, a injeção de energia por VE durante eventos críticos pode variar entre 0,5 kWh e 1,2 kWh por veículo

(*Sector Coupling through Vehicle to Grid: A Case Study for Electric Vehicles and Households in Berlin, Germany, 2023*).

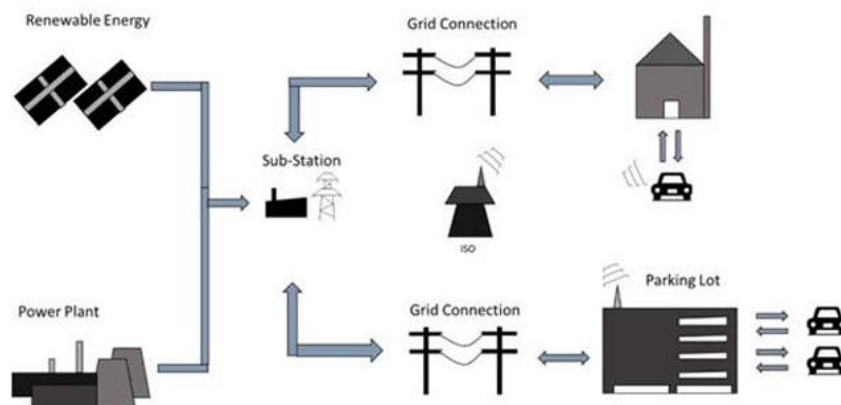
No aspecto econômico, análises em programas de resposta à demanda mostram que usuários podem obter ganhos anuais médios entre US\$ 120 e US\$ 280, considerando diferentes perfis de recarga e tarifas locais. A implementação de infraestrutura G₂V inteligente, como demonstrado na Monash University, possibilitou maior acomodação de VEs sem violar restrições da rede elétrica (*The Optimal Infrastructure Design for Grid to Vehicle (G₂V) Service: A Case Study Based On the Monash Microgrid, 2024*).

Apesar das oportunidades, desafios permanecem: degradação acelerada das baterias, necessidade de aceitação do usuário para garantir disponibilidade do veículo e barreiras tarifárias e regulatórias que afetam a viabilidade econômica (*Techno-economic Analysis of G₂V and V₂G Charging Systems: A Case Study Based on the Monash Microgrid, 2025*).

Estudos recentes indicam que o uso do V₂G pode reduzir entre 15% e 22% a necessidade de expansão da capacidade de geração de pico em sistemas urbanos (ENERGY ADVANCES, 2022). Essa estimativa foi consolidada em um único trecho para evitar repetição. Além disso, o V₂G contribui para reduzir a necessidade de armazenamento estacionário e apresenta benefícios econômicos para o usuário, com ganhos anuais médios entre US\$ 120 e US\$ 280, dependendo do perfil de recarga e das tarifas locais.

Para melhor visualizar essa integração energética, apresenta-se a Figura 3, que representa esquematicamente o fluxo bidirecional de energia nos sistemas G₂V e V₂G, destacando os principais componentes, como carregador bidirecional, sistema de gerenciamento da bateria, comunicação com a rede elétrica e a atuação do veículo tanto como consumidor quanto como fornecedor temporário de energia.

Figura 3 – Esquema ilustrativo do fluxo bidirecional de energia num sistema típico V₂G



Fonte: VAZ (2019).

Além da figura, os impactos do V₂G podem ser quantificados em tabelas e gráficos, como apresentado a seguir na Tabela 3:

Tabela 3 – Injeção de Energia por VE em Cenários de Penetração da Frota

Cenário de Penetração da Frota	Energia Injetada por VE (kWh)	Redução de Pico da Rede (%)
10%	0,3	5
20%	0,7	12
30%	1	18
40%	1,2	22

Fonte: adaptado de KEMPTON & TOMIĆ, 2005; LOPES et al., 2009; SUN, 2025.

A análise de cenários indica que a energia injetada por veículo varia entre 0,3 kWh e 1,2 kWh, dependendo da penetração da frota, enquanto os ganhos econômicos anuais para o usuário podem variar de US\$ 120 a US\$ 280, considerando diferentes perfis de recarga e tarifas locais (Tabela 4).

Tabela 4 – Custo-Benefício Anual do V₂G para Usuário

Perfil de Recarga	Tarifa Local (USD/kWh)	Ganho Anual Médio (USD)
Perfil Residencial	0,15	120
Perfil Residencial	0,2	180
Perfil Comercial	0,18	200
Perfil Comercial	0,25	280

Fonte: adaptado de ENERGY ADVANCES, 2022.

O crescimento da demanda mundial por veículos elétricos traz consequências ambientais e socioeconômicas significativas. A extração de minerais estratégicos para a produção de baterias pode causar aumento do consumo hídrico, impactos sociais e econômicos e poluição ambiental, enquanto avanços em eficiência energética, desenvolvimento de novas químicas de armazenamento e expansão das práticas de reciclagem representam oportunidades decorrentes dessa mesma demanda (GAINES, 2014; HARPER et al., 2019).

O Brasil possui reservas de terras raras e outros minerais críticos estratégicos, posicionando-se como potencial ator relevante na produção de baterias automotivas e na cadeia global. O país pode consolidar-se como fornecedor sustentável e estratégico mediante a combinação de práticas de reciclagem, inovação tecnológica e políticas públicas adequadas (LEITE & ARAÚJO, 2016; MARTINS, 2024).

Dessa forma, para atingir os objetivos deste estudo, é necessário subsídios técnicos e científicos que permitam desenvolver estratégias de inovação tecnológica e sustentabilidade na cadeia dos veículos elétricos, por meio da análise detalhada da composição química, dos insumos e da origem dos minerais, bem como dos seus impactos ambientais e socioeconômicos, das tecnologias emergentes e dos modos de operação G₂V/V₂G.

2.1 Os cenários do desenvolvimento sustentável e os veículos elétricos

A adoção dos veículos elétricos (VEs) ocupa um papel central nas estratégias globais para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). A Agenda 2030 define 17 objetivos e 169 metas que orientam soluções voltadas à inovação, eficiência energética e redução dos impactos ambientais.

Nesse contexto, os VEs contribuem diretamente para metas como:

- a) ODS 8 – Trabalho decente e crescimento econômico, promovendo inovação e eficiência na cadeia produtiva;
- b) ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura, estimulando desenvolvimento tecnológico;
- c) ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis, ao reduzir emissões e melhorar a qualidade do ar;
- d) ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, reforçando práticas de reciclagem e reuso;
- e) ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, ao diminuir emissões no setor de transportes.

Além disso, estudos indicam correlação com o ODS 3 – Saúde e bem-estar, já que a redução da poluição atmosférica contribui para diminuir doenças respiratórias (PINEDA; CONSONE, 2020).

Para operacionalizar esses objetivos no setor energético, destaca-se o papel da International Energy Agency (IEA), Agência Internacional de Energia. Criada em 1974, a IEA começou monitorando o setor petrolífero, mas hoje atua sobre todas as fontes de energia, promovendo segurança energética, acessibilidade econômica e sustentabilidade ambiental (IEA, 2020; 2021).

Anualmente, a IEA publica o relatório *World Energy Outlook* (WEO), que projeta a oferta e demanda de energia e analisa seus impactos econômicos, ambientais e geopolíticos.

Entre os cenários analisados destacam-se:

- a) *Current Policies Scenario* (CPS – Cenário de Políticas Atuais): projeta a evolução do sistema energético caso não haja novas políticas;
- b) *Stated Policies Scenario* (STEPS – Cenário de Políticas Declaradas): considera políticas já anunciadas;
- c) *Sustainable Development Scenario* (SDS – Cenário de Desenvolvimento Sustentável): define o caminho necessário para cumprir metas globais de sustentabilidade, incluindo limitar o aumento médio da temperatura global a 1,5°C, conforme o Acordo de Paris.

O SDS prevê uma transformação estrutural no sistema energético, com forte crescimento da eletrificação e da mobilidade elétrica. A IEA estima que, para atingir essas metas, será necessário um crescimento médio anual de 36% na frota global de VEs até 2030, passando de 10 milhões para cerca de 245 milhões de unidades.

A partir dessas projeções, é possível realizar análises quantitativas de forma mais detalhada. Observa-se que o crescimento médio anual da frota de veículos elétricos varia de acordo com o cenário considerado. No CPS, a frota alcançaria cerca de 50 milhões de unidades até 2030, refletindo um crescimento médio anual de aproximadamente 22%. No STEPS, considerando as políticas já anunciadas, a frota atingiria 120 milhões de veículos, com crescimento médio anual de 29%. Já no SDS, cenário de desenvolvimento sustentável, a frota alcançaria cerca de 245 milhões de unidades, correspondendo a um crescimento médio anual de 36% (IEA, 2020).

Para melhor visualização, esses dados estão resumidos na Tabela 5, que apresenta o crescimento médio anual da frota de VEs por cenário:

Tabela 5 – Crescimento médio anual da frota de veículos elétricos por cenário

Cenário	Frota em 2030 (milhões)	Crescimento médio anual (%)
CPS	50	22
STEPS	120	29
SDS	245	36

Fonte: adaptado de IEA, 2020; 2021.

Essa expansão tem impactos diretos sobre as emissões de gases de efeito estufa. Considerando que veículos convencionais emitem, em média, 120 g de CO₂ por km e percorrem 15.000 km por ano, a adoção de 245 milhões de VEs poderia reduzir aproximadamente 442 milhões de t CO₂ anualmente.

Além disso, a eletrificação da mobilidade gera demanda adicional de energia elétrica para recarga. Com um consumo médio de 20 kWh por 100 km e considerando 15.000 km percorridos por veículo ao ano, cada VE consumiria cerca de 3.000 kWh anuais. Multiplicando pelo total de 245 milhões de veículos, a demanda global adicional alcançaria aproximadamente 735 TWh por ano, equivalente a cerca de 3% do consumo elétrico mundial atual.

Os impactos da expansão da frota de veículos elétricos em termos de redução de emissões de CO₂ e demanda adicional de energia elétrica podem ser observados de forma comparativa nos diferentes cenários considerados. A Tabela 6 apresenta esses valores, permitindo visualizar como cada cenário influencia diretamente o efeito ambiental e energético da eletrificação da mobilidade.

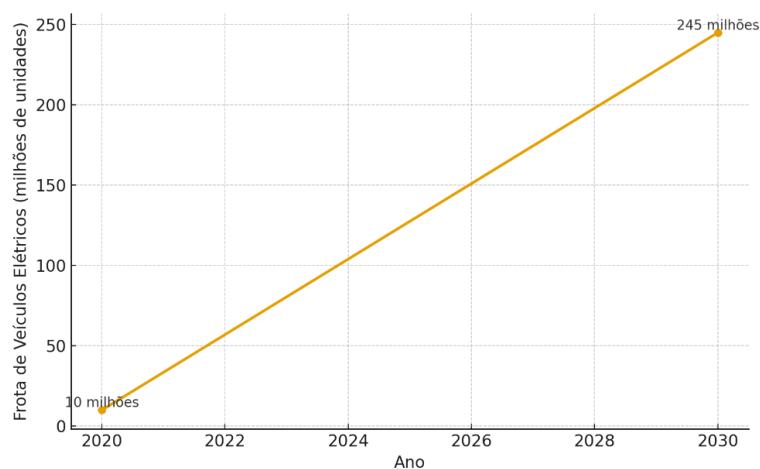
Tabela 6 – Frota, Redução de CO₂ e Demanda Adicional de Energia de Veículos Elétricos por Cenário

Cenário	Frota em 2030 (milhões)	Redução estimada de CO ₂ (milhões de t/ano)	Demanda adicional de energia (TWh/ano)
CPS	50	90	150
STEPS	120	216	360
SDS	245	442	735

Fonte: adaptado de IEA, 2020; 2021.

Para ilustrar de forma gráfica a evolução da frota de VEs nos diferentes cenários, apresenta-se o Gráfico 1:

Gráfico 1 – Projeção do crescimento da frota de veículos elétricos



Fonte: IEA (2020; 2021)

Esses dados evidenciam que o crescimento dos VEs não é apenas inovação tecnológica, mas representa um desafio sistêmico, exigindo políticas públicas eficientes, planejamento industrial de baixo impacto ambiental e uso responsável de minerais críticos. A transição para a mobilidade elétrica demanda atenção aos impactos ambientais e ao esgotamento mineral, considerando o ciclo de vida das baterias, aspectos que serão aprofundados nas subseções seguintes desta pesquisa.

Com base nas projeções de crescimento da frota de veículos elétricos, torna-se evidente que a expansão da mobilidade elétrica terá impactos diretos sobre o mercado global, influenciando vendas, participação regional e a maturação das cadeias de suprimentos, tema abordado a seguir.

2.2 O mercado dos veículos elétricos

A expansão acelerada do mercado dos veículos elétricos (VEs) está diretamente ligada ao avanço das políticas de sustentabilidade energética e às metas globais de desenvolvimento. Embora o segmento tenha passado por uma fase inicial de adoção modesta nos anos 2010, a partir de 2020 seu crescimento tornou-se acentuado, impulsionado por incentivos governamentais, inovação tecnológica e maturação das cadeias de suprimentos (IEA, 2024).

Em escala global, as vendas de VEs alcançaram aproximadamente 14 milhões de unidades em 2023, representando cerca de 18% das vendas totais de veículos novos, e ultrapassaram 17 milhões de unidades em 2024, com vendas de mais de 11 milhões apenas na China. Este volume equivale ao total vendido dois anos antes, consolidando o país asiático como protagonista na transição para a mobilidade elétrica (IEA, 2024).

O crescimento também foi observado em mercados em desenvolvimento. Excluindo a China, as vendas na América Latina e no Sudeste Asiático aumentaram cerca de 60% ao ano em 2024, com projeção de 20 milhões de unidades vendidas mundialmente em 2025, representando mais de um quarto das vendas totais de veículos novos (IEA, 2025).

Segundo a IEA, a frota mundial de VEs (excluindo veículos de duas e três rodas) deve atingir aproximadamente 250 milhões de unidades até 2030 no Cenário de Políticas Declaradas (STEPS), com crescimento médio anual em torno de 25%. No Cenário de Desenvolvimento Sustentável (SDS), mais ambicioso, a fatia de mercado de veículos elétricos novos poderia ultrapassar 40% em 2030 (IEA, 2024).

A evolução do mercado também se reflete em casos nacionais. Na Noruega, 89% de todos os veículos novos vendidos em 2024 eram totalmente elétricos, um crescimento em relação aos

82,4% de 2023 (ELECTRIVE, 2024). O país projeta atingir a meta de comercializar exclusivamente veículos elétricos até 2025, demonstrando que políticas fiscais, regulatórias e de infraestrutura podem efetivamente acelerar a transição energética e tecnológica.

Na América Latina, o mercado de VEs avançou expressivamente em 2024. No Brasil, as vendas alcançaram 125 mil unidades, representando 6,5% das vendas de veículos novos, um crescimento de 100% em relação ao ano anterior. No México, a frota superou 151 mil unidades, com predominância de veículos híbridos e elétricos plug-in (OBELA, 2024).

No Sudeste Asiático, a Índia apresentou crescimento significativo no segmento de três rodas elétricos (3W), fundamentais para a mobilidade urbana. As vendas aumentaram 20% em 2024, atingindo 700 mil veículos, com 57% da frota total de 3W composta por elétricos, superando inclusive países tradicionais no setor (IEA, 2024).

Antes de apresentar dados regionais detalhados, é feita a chamada para o elemento visual. A seguir, apresenta-se a Tabela 7, que sintetiza as vendas e a participação de mercado por região:

Tabela 7 - Vendas e Participação de Mercado por Região

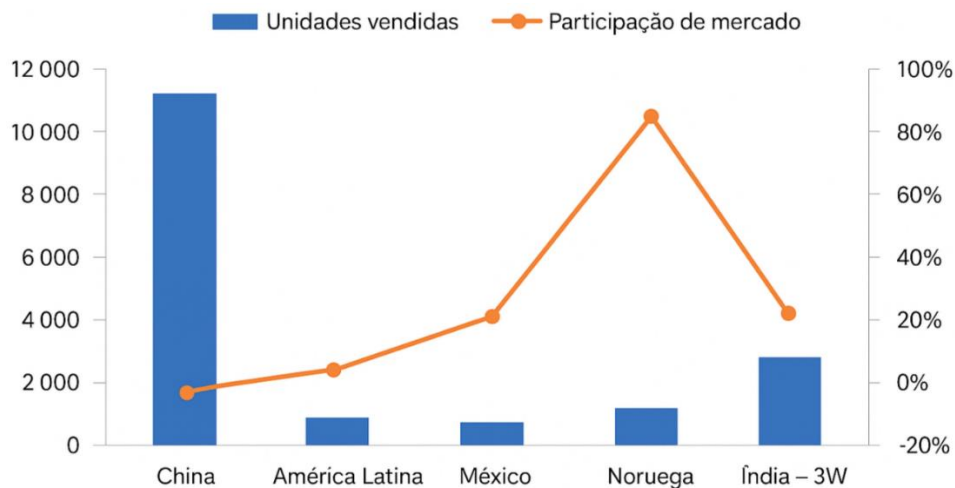
Região	Vendas em 2024 (unidades)	% sobre vendas novas	Observações principais
China	~11 milhões	~50%	2/3 das vendas globais (IEA, 2024)
Brasil	~125 mil	~6,5%	Crescimento ~100% vs 2023 (Obela, 2024)
Índia (3 rodas)	~700 mil	—	Segmento 3-W, salto de ~20% (IEA, 2024)
EUA	~1,6 milhões	~10%	Adoção mais lenta (IEA, 2024)

Fonte: Fonte: IEA (2024); OBELA (2024)

Mesmo com barreiras de mercado, comportamento e políticas, os VEs e híbridos plug-in nos Estados Unidos representaram 10% do mercado automotivo em 2024, mostrando que a transição tecnológica não se limita a países líderes, mas envolve toda a cadeia produtiva global, desde a extração de minerais até a logística e políticas regulatórias (IEA, 2024; AXIOS, 2024).

Para facilitar a visualização das diferenças de vendas e participação de mercado por região, apresenta-se o Gráfico 2, que complementa a Tabela 7, evidenciando a predominância da China, o avanço na América Latina e México, o forte índice de eletrificação na Noruega e a relevância dos 3W elétricos na Índia.

Gráfico 2 – Vendas e participação de mercado de VEs por região (2024)



Fonte: IEA, 2024; OBELA, 2024

O crescimento expressivo do mercado de veículos elétricos reflete não apenas mudanças de consumo, mas também pressiona a cadeia de suprimentos de minerais estratégicos, revelando desafios ambientais, geopolíticos e de segurança mineral, os quais serão detalhados na subseção seguinte.

2.3 A demanda e os desafios associados à produção e reciclagem das baterias

A expansão acelerada do mercado global de veículos elétricos (VEs) elevou substancialmente a demanda por baterias de íons de lítio e pelos minerais estratégicos que compõem essas tecnologias. Esse crescimento não apenas pressiona o fornecimento de lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite, como também evidencia limitações estruturais nas cadeias de extração, refino e reciclagem, que ainda não acompanham o ritmo da eletrificação (IEA, 2024).

Os relatórios mais recentes da Agência Internacional de Energia indicam que a demanda por lítio poderá aumentar mais de 40 vezes até 2040, enquanto níquel e cobalto podem crescer entre 20 e 25 vezes, cenário que ilustra a dimensão dos desafios atuais (IEA, 2021; IEA, 2024).

Além do aumento no consumo agregado, a pressão sobre minerais críticos varia significativamente conforme a composição química das baterias. Para evidenciar essa diferença, apresenta-se a Tabela 8, que sintetiza os conteúdos médios de materiais por kWh nas químicas NMC (níquel-manganês-cobalto) e LFP (lítio-ferro-fosfato), permitindo comparação direta entre alternativas tecnológicas.

Tabela 8 - Conteúdo médio de minerais por 1 kWh de bateria

Mineral	NMC (kg/kWh)	LFP (kg/kWh)
Lítio	0,80–1,20	0,50–0,70
Níquel	4,5–6,0	~0
Cobalto	0,6–1,0	~0
Manganês	0,5–1,0	~0
Ferro	~0	5–6

Fonte: Adaptado de IEA (2024); Gaines (2018); USGS (2023).

Os dados demonstram de maneira quantitativa que baterias NMC exercem impactos muito maiores sobre a mineração de níquel e cobalto, enquanto as baterias LFP reduzem essa dependência em mais de 60% para determinados metais. Essa diferença é particularmente relevante ao se considerar que um veículo elétrico médio equipado com 60 kWh em células NMC pode conter aproximadamente 36 kg de níquel, entre 48 e 72 kg de lítio-carbonato-equivalente e até 60 kg de manganês e outros componentes.

Com mais de 14 milhões de VEs vendidos em 2023, esse volume corresponde, em ordem de grandeza, a cerca de 500 mil toneladas anuais de níquel consumidas apenas pela indústria automotiva, além de 100 a 150 mil toneladas de lítio e 60 a 100 mil toneladas de cobalto, valores que ultrapassam a capacidade atual de expansão da mineração primária (IEA, 2024).

Embora novas rotas tecnológicas busquem otimizar o consumo mineral, a reciclagem é um componente essencial para aliviar a pressão sobre a extração. Os processos hidrometalúrgicos modernos são capazes de recuperar mais de 90% de níquel, cobalto e lítio

presentes nas baterias usadas (GAINES, 2018), mas a taxa global de reciclagem permanece inferior a 15% (IEA, 2024).

Na prática, isso significa que mais de 100 mil toneladas anuais de lítio potencialmente recuperável deixam de retornar ao ciclo produtivo, além de centenas de milhares de toneladas de níquel e manganês, o que amplifica a dependência da mineração primária.

A análise quantitativa indica ainda que, se a taxa de reciclagem global subisse dos atuais 15% para cerca de 50%, seria possível reduzir em aproximadamente 140 mil toneladas por ano a necessidade de extração de lítio, além de evitar a mineração de mais de 300 mil toneladas de níquel, repercutindo diretamente na segurança mineral e na redução dos impactos ambientais do setor. A diminuição da extração primária, associada ao aumento da circularidade dos materiais, poderia reduzir entre 20% e 30% das emissões totais do ciclo de vida das baterias (IEA, 2024).

Outro desafio crítico reside na elevada concentração geográfica das atividades de refino e processamento, especialmente na China, que domina a produção de materiais catódicos e de grafite refinado (USGS, 2023). Essa concentração eleva o risco de interrupções de fornecimento e expõe a cadeia produtiva a riscos geopolíticos que transcendem as questões ambientais.

Diante desses fatores, torna-se evidente que a sustentabilidade da mobilidade elétrica depende de uma combinação de expansão industrial, diversificação mineral, melhoria das rotas de reciclagem e migração para químicas menos intensivas em metais críticos.

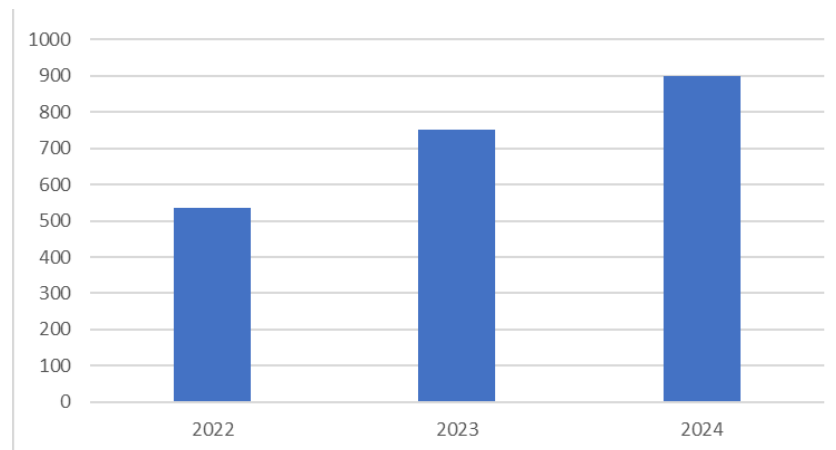
A conjugação dessas soluções é indispensável para que o crescimento da frota elétrica ocorra de forma sustentável e tecnicamente viável, reduzindo tanto a vulnerabilidade do suprimento quanto o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida das baterias.

2.3.1 Demanda global de baterias e crescimento produtivo

A demanda mundial por baterias de íon-lítio destinadas ao mercado de veículos elétricos (VEs) ultrapassou 750 GWh em 2023, conforme aponta o Global EV Outlook 2024, indicando um crescimento de cerca de 40% em relação a 2022. Essa forte correlação entre o crescimento da frota de VEs e a expansão proporcional da demanda por baterias confirma o ritmo acelerado da eletrificação global.

O Gráfico 3 ilustra esse crescimento, destacando a evolução da demanda global por baterias no período recente.

Gráfico 3 – Demanda de baterias para VEs (GWh)



Fonte: IEA (2024)

O crescimento na produção de VEs impacta diretamente a expansão da demanda por baterias e, conseqüentemente, aumenta a necessidade pelos recursos minerais utilizados em seu processo produtivo. Esse cenário reforça a importância de políticas industriais capazes de equilibrar gestão de recursos, redução dos impactos ambientais e inovação tecnológica.

Além do crescimento expressivo em termos de capacidade instalada (GWh), essa expansão implica consumo crescente de matérias-primas, uma vez que cada giga watt-hora adicional requer quantidades específicas de lítio, níquel, cobalto e grafite. Esse vínculo entre demanda energética e intensidade material é central para compreender os desafios futuros da cadeia produtiva.

Com base nas composições médias das baterias NMC e LFP, estima-se que a demanda global observada em 2023 tenha exigido centenas de milhares de toneladas desses minerais. Isso reforça a necessidade de ampliar a capacidade de refino, diversificar as fontes de suprimento e aprimorar os processos industriais associados às etapas de transformação.

O aumento proporcional no consumo de recursos também evidencia a relevância de políticas industriais voltadas à eficiência material e à sustentabilidade. Projeções recentes da IEA (2024) sugerem que o crescimento produtivo da eletromobilidade dependerá cada vez mais da integração entre inovação tecnológica, gestão adequada de recursos e estratégias de segurança mineral.

2.3.2 Capacidade de reciclagem e recuperação de materiais

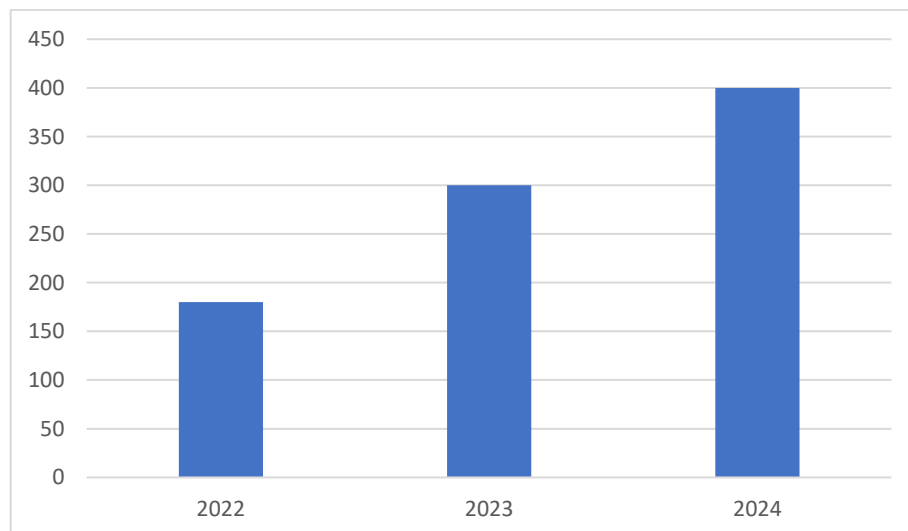
A capacidade mundial de reciclagem de baterias registrou uma expansão significativa em 2023, ultrapassando a marca de 300 GWh/ano, dos quais cerca de 80% foram processados na

China. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), caso todos os projetos anunciados sejam concluídos até 2030, a capacidade global poderá superar 1.500 GWh/ano, refletindo um crescimento substancial na infraestrutura de reaproveitamento.

Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia (DOE) reportou que, até 2023, já havia estrutura instalada suficiente para recuperar aproximadamente 35.500 toneladas de materiais por ano. Apesar do avanço, o próprio DOE (2024) reconhece que essa capacidade ainda está muito aquém do necessário para suprir a demanda futura, dado o ritmo acelerado de crescimento da frota de veículos elétricos.

O Gráfico 4 sintetiza a evolução da capacidade global de reciclagem, evidenciando o crescimento recente e o descompasso entre a oferta disponível e a necessidade projetada para a próxima década.

Gráfico 4 – Capacidade Global de Reciclagem (GWh/ano)



Fonte: IEA (2024)

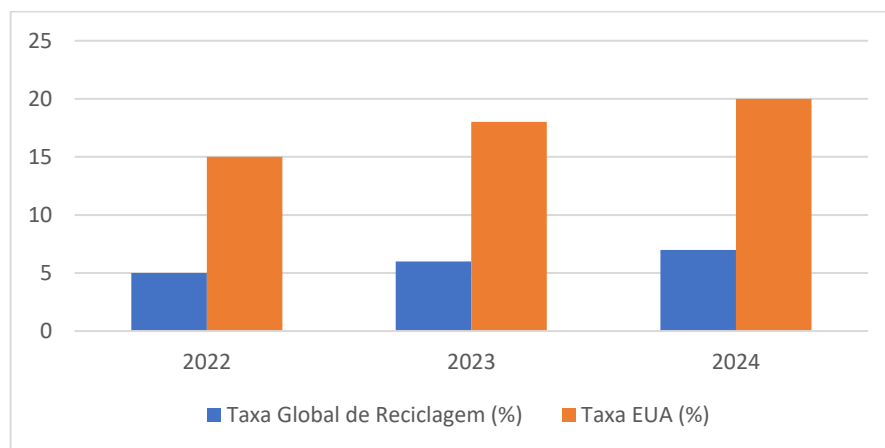
O mercado mundial de reciclagem de baterias de íon-lítio foi estimado em US\$ 10,26 bilhões em 2024, com tendência de forte expansão. Projeções da Precedence Research (2024) indicam que esse mercado poderá alcançar US\$ 73,18 bilhões até 2034, impulsionado pela maior disponibilidade de baterias em fim de vida e pelo aumento do valor econômico dos metais recuperados.

Na Europa, estima-se que, até 2030, seja possível recuperar cerca de 105 mil toneladas de cobalto, lítio, níquel e manganês, volume suficiente para viabilizar a produção de até 2,4 milhões de veículos elétricos, conforme estudo da Transport & Environment (2024). Esses dados reforçam a importância estratégica da recuperação de materiais críticos para reduzir a dependência da mineração primária.

Apesar dos avanços, a taxa efetiva de reciclagem ainda é modesta. Segundo a IEA (2024), apenas 5% das baterias de veículos elétricos em fim de vida foram de fato recicladas em 2023. Nos Estados Unidos, os melhores resultados alcançam aproximadamente 20%, índice ainda distante da meta considerada tecnicamente ideal de 80% de recuperação de lítio (ABTC, 2024).

O Gráfico 5 apresenta a evolução recente das taxas de reciclagem entre 2022 e 2024, demonstrando a diferença entre a capacidade instalada e o volume efetivamente processado.

Gráfico 5 – Taxa de reciclagem de baterias (2022–2024)



Fonte: IEA (2024)

Mesmo com seu crescimento acelerado, o setor de reciclagem ainda não se aproxima de atender à demanda crescente por metais estratégicos. Dessa forma, a consolidação de políticas públicas de incentivo à reciclagem, aliada ao desenvolvimento de rotas tecnológicas mais eficientes, torna-se essencial para mitigar o déficit material e reduzir os impactos ambientais associados à mineração primária.

Além dos desafios ligados à oferta e reciclagem de minerais, a evolução tecnológica e a redução dos custos das baterias desempenham papel central na viabilidade econômica da mobilidade elétrica, influenciando diretamente a composição química, a escolha de materiais e o desenvolvimento de novas rotas de produção.

2.3.3 Custos, composição e desafios minerais

A evolução tecnológica das químicas de bateria e a redução dos custos de produção desempenham papel central na viabilidade da mobilidade elétrica. O preço médio das baterias de íon-lítio caiu drasticamente de US\$ 1.400/kWh para cerca de US\$ 140/kWh entre 2010 e

2023, o que ampliou a competitividade do setor e acelerou sua adoção global. Essa queda contínua no custo é um dos fatores estruturais mais relevantes para o avanço dos veículos elétricos, pois influencia diretamente o preço final dos modelos, a escala produtiva e a viabilidade econômica das montadoras.

Aproximadamente 40% das vendas mundiais de veículos elétricos em 2023 utilizaram baterias LFP, que demandam menores quantidades de cobalto e níquel. Essa mudança tecnológica reduz a pressão sobre minerais críticos e demonstra uma tendência de diversificação do parque tecnológico, como indica a IEA (2024), ao favorecer baterias de menor custo e maior estabilidade térmica.

Para apoiar essa análise, a Tabela 9 apresenta a evolução recente dos preços médios das baterias de íon-lítio, evidenciando a continuidade da tendência de barateamento dos sistemas de armazenamento.

Tabela 9 – Preço médio das baterias de íon-lítio (2022–2024)

Ano	Preço Médio (USD/kWh)
2022	150
2023	139
2024	130

Fonte: IEA (2024)

Tanto o cobalto quanto o grafite, o lítio, o manganês e o níquel são considerados minerais estratégicos para a produção das baterias de veículos elétricos, compondo o grupo dos cinco insumos de maior relevância industrial. A concentração geográfica da mineração, entretanto, gera vulnerabilidades importantes: cerca de 70% do cobalto é extraído da República Democrática do Congo, enquanto o níquel provém majoritariamente da região do Sudeste Asiático, onde depósitos lateríticos apresentam emissões de CO₂ superiores às dos depósitos sulfetados (PEKKA et al., 2021). Essas diferenças intensificam os desafios ambientais e geopolíticos da cadeia produtiva.

Estudos recentes apontam que o níquel tende a ampliar sua participação nas químicas futuras de baterias, enquanto o cobalto deve apresentar estabilização ou redução relativa devido ao seu custo elevado e às preocupações éticas associadas à sua extração. Os elementos estratégicos dos cátodos (lítio, cobalto e manganês) variam conforme a rota tecnológica e o tipo

de célula, reforçando que a inovação química impacta diretamente a demanda mineral (ZIEMANN et al., 2013; CORATHERS, 2018).

A IEA (2020c) projeta que, até 2030, a demanda anual por insumos destinados à fabricação de baterias atingirá 185 kt de lítio, 180 kt de cobalto, 177 kt de manganês e 925 kt de níquel, valores muito superiores aos observados em 2019 (17, 19, 22 e 65 kt, respectivamente). Esse crescimento evidencia um salto estrutural na demanda por minerais críticos, impulsionado pela adoção acelerada dos veículos elétricos.

Para demonstrar a magnitude dessa expansão, a Tabela 10 apresenta uma comparação direta entre os volumes demandados em 2019 e as projeções para 2030.

Tabela 10 – Comparativo da demanda global anual de insumos para baterias (2019 x 2030)

Mineral	Demanda 2019 (kt/ano)	Projeção 2030 (kt/ano)	Crescimento (%)
Lítio	17	185	988%
Cobalto	19	180	847%
Manganês	22	177	705%
Níquel	65	925	1323%

Fonte: Adaptado de IEA (2020c).

O avanço da mobilidade elétrica, portanto, traz consigo novos desafios ambientais e geopolíticos. A rápida expansão da frota global de VEs ocorre paralelamente a uma estrutura produtiva ainda marcada por forte concentração regional de extração mineral e por limitações na capacidade de reciclagem, o que intensifica pressões sobre territórios mineradores. Em que pese representar um passo fundamental para a redução das emissões e para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9 e 12), a transição energética requer políticas coordenadas que conciliem inovação tecnológica, segurança mineral e sustentabilidade ambiental.

2.4 Configurações de veículos elétricos

A compreensão das diferentes configurações tecnológicas dos veículos elétricos é essencial para avaliar seu desempenho energético, seus requisitos de infraestrutura e suas implicações ambientais. Essa análise torna-se ainda mais relevante diante da crescente demanda por minerais estratégicos e da diversificação das químicas de baterias discutidas na seção anterior.

Com o avanço da eletromobilidade no início dos anos 2000, consolidaram-se três arquiteturas principais:

- (i) Veículos Elétricos à Bateria (VEB);
- (ii) Veículos Elétricos Híbridos (VEH);
- (iii) Veículos Elétricos a Célula de Combustível (VECC).

Cada configuração apresenta estratégias distintas de propulsão e interação com a infraestrutura de energia, influenciando tanto o consumo quanto o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida (IEA, 2024).

Os veículos elétricos à bateria utilizam exclusivamente motores elétricos alimentados por energia armazenada em baterias recarregáveis. Localizadas no chassi, essas baterias convertem energia elétrica em energia química, possibilitando recarga por conexão direta à rede elétrica (MAJEAU-BETTEZ et al., 2011; IEA, 2023). Os VEBs apresentam eficiência energética superior a 85%, em ambiente urbano, enquanto veículos convencionais dificilmente ultrapassam 35% (US DOE, 2024). No entanto, fatores como temperatura, relevo e velocidade média influenciam a autonomia final (HEBALA et al., 2025).

Os veículos híbridos combinam um motor a combustão interna com um motor elétrico auxiliar. Essa configuração possibilita menor consumo de combustível e redução de emissões em trajetos urbanos, ao passo que o motor a combustão assume maior protagonismo em percursos extensos ou de alta demanda de potência. A flexibilidade operacional proporciona ganhos relevantes em eficiência energética total (LIEUTENANT et al., 2022; HEBALA et al., 2025).

Os veículos a célula de combustível utilizam hidrogênio como insumo para gerar eletricidade diretamente a bordo. Apresentam autonomia superior a 500 km e reabastecimento rápido, caracterizando-se como alternativa competitiva para longas distâncias. Contudo, seu impacto ambiental depende da rota de produção do hidrogênio: fontes renováveis resultam em baixas emissões, enquanto rotas baseadas em gás natural reduzem parcialmente seus benefícios ambientais (SITNIK, 2024; IEA, 2024).

Para sintetizar as diferenças qualitativas entre VEBs e veículos convencionais, a Tabela 11 apresenta os principais parâmetros comparativos utilizados na literatura.

Tabela 11 - Comparativo entre veículos à bateria e veículos à combustão

Características	Veículo elétrico à bateria (BEV)	Veículo à combustão interna (ICEV)
Sistema de propulsão	Motor elétrico (conversão eletromecânica direta)	Motor de combustão interna
Fonte energética	Baterias recarregáveis; rede elétrica	Combustíveis fósseis (gasolina/diesel)
Infraestrutura	Rede de carregamento público e residencial	Postos de combustível tradicionais
Eficiência energética	Alta ($\approx 85\%$)	Média ($\approx 35-40\%$)
Emissão de poluentes	Zero emissões diretas	Alta emissão de CO ₂ e NO _x
Custo de operação	Reduzido (baixo custo por km)	Elevado (combustível e manutenção)
Autonomia média	Limitada (300–600 km)	Alta (600–1.000 km)
Impacto ambiental	Depende da matriz elétrica e da origem dos materiais	Elevado em todo o ciclo de vida
Nível de ruído	Muito baixo	Alto
Manutenção	Simplificada	Complexa, com mais partes móveis

Fonte: Adaptado de BARASSA (2015); IEA (2023); US DOE (2024); HEBALA et al. (2025).

Além desses aspectos qualitativos, é relevante observar diferenças quantitativas em parâmetros como eficiência energética, autonomia e emissões. Esses indicadores complementam a análise e permitem relacionar desempenho técnico com impactos ambientais.

A Tabela 12 resume valores médios frequentemente reportados na literatura para VEB, VEH, VECC e veículos à combustão.

Tabela 12 - Comparativo quantitativo entre VEB, VEH, VECC e veículos à combustão

Tecnologia	Eficiência (%)	Consumo Médio	Autonomia (km)	Emissões no Ciclo de Vida (gCO ₂ /km)*
VEB	70–80%	14–18 kWh/100 km	300–500	20–150
VEH	30–40%	4,5–5,5 L/100 km	700–900	70–110
VECC	30–40%	0,8–1,0 kg H ₂ /100 km	500–650	0–120
Combustão	20–25%	7–9 L/100 km	600–800	150–200

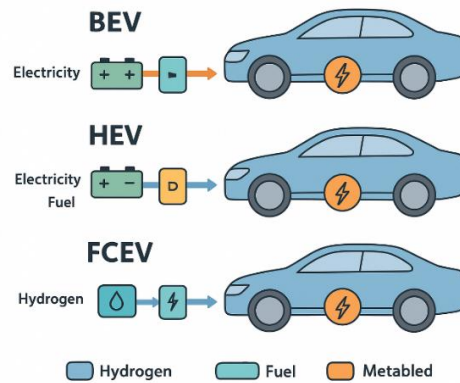
Fonte: Adaptado de IEA (2023, 2024); US DOE (2024); HEBALA et al. (2025); SITNIK (2024).

*Variam conforme matriz energética ou rota de produção do hidrogênio.

Desse modo, a diversidade de configurações tecnológicas influencia não apenas o desempenho energético, mas também a intensidade material necessária para a fabricação dos sistemas de armazenamento e o grau de dependência dos minerais críticos, como discutido em seções anteriores. Esses aspectos, somados às diferenças no ciclo de vida e às estratégias de reciclagem, desempenham papel crucial para a sustentabilidade industrial da mobilidade elétrica, tema aprofundado nas seções subsequentes.

A Figura 4, apresentada adiante, sintetiza as diferenças estruturais entre as principais arquiteturas tecnológicas.

Figura 4 - Comparativo esquemático entre tipos de veículos elétricos



Fonte: Adaptado de HEBALA et al. (2025); Sitnik (2024); LIEUTENANT et al. (2022).

2.5 Argumentos contrários à implementação dos VEs em virtude da escassez de minerais como matéria-prima

A expansão da mobilidade elétrica, embora represente um avanço essencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa, impõe desafios estruturais que podem comprometer a sustentabilidade dessa transição.

Entre os principais entraves destacam-se a escassez de minerais estratégicos, a elevada concentração geográfica das reservas e os impactos socioambientais associados à sua extração. Esses fatores evidenciam os limites físicos e econômicos que condicionam o ritmo de produção de baterias e o crescimento da frota de veículos elétricos (VEs).

Pesquisas recentes indicam que a demanda crescente por minerais críticos — especialmente lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite — pode restringir a expansão da mobilidade elétrica no médio prazo (IEA, 2024a). Como esses minerais são essenciais para a fabricação dos cátodos e ânodos das baterias de íons-lítio, sua disponibilidade condiciona diretamente o custo, a eficiência e a escala produtiva da indústria.

A concentração geográfica das reservas aumenta essa vulnerabilidade. A República Democrática do Congo, responsável por mais de 70% da produção global de cobalto, implantou em 2025 um sistema de cotas de exportação, elevando a instabilidade do mercado e pressionando os custos de produção de baterias (HODGSON, 2025).

Situação semelhante ocorre no refino de lítio e níquel, cujas etapas de processamento são altamente concentradas na China, o que motivou a adoção de políticas de autonomia industrial pela União Europeia (SPILLER et al., 2024).

Além das restrições de oferta, a reciclagem ainda não representa uma alternativa capaz de compensar a crescente demanda. Apesar da expansão recente, apenas 5% das baterias em fim de vida foram efetivamente recicladas em 2024, valor muito inferior ao necessário para reduzir a pressão sobre a extração primária (IEA, 2024b).

A baixa recuperação de materiais como níquel, manganês e grafite amplia o risco de estrangulamento produtivo e dificulta o aumento da oferta para baterias de alta densidade energética (RMIS, 2025).

Estudos também demonstram que os VEs necessitam de quantidades significativamente maiores de metais críticos do que os veículos convencionais, aumentando o impacto ambiental da etapa de extração (CAPPELLI, 2025). A capacidade produtiva atual de lítio, níquel e cobalto não é suficiente para atender à demanda projetada até o final da década, podendo restringir o crescimento da eletromobilidade (WOODLEY, 2023).

Esse risco é agravado por dilemas éticos associados à mineração, especialmente no caso do cobalto extraído na RDC sob condições precárias e uso documentado de trabalho infantil (HARVEY, 2024).

Embora avanços tecnológicos na reciclagem e novos métodos de extração representem caminhos promissores, eles ainda não são suficientes para equilibrar o mercado. A previsão é que a demanda global permaneça superior à oferta, mesmo considerando a expansão da capacidade de reaproveitamento (RMIS, 2025). A dependência de poucos países produtores intensifica a volatilidade de preços e amplia a vulnerabilidade geopolítica (CRELLIN, 2025).

Alguns minerais apresentam perspectivas específicas. O lítio possui potencial de extração em larga escala a partir de água do mar, com custos projetados entre US\$ 7 e US\$ 10 por libra, valores ainda superiores ao custo atual de cerca de US\$ 2,80/lb, mas tecnicamente viáveis no longo prazo (GOLDEN, 2024). Projetam-se também alterações relevantes no balanço global do níquel, com risco de déficit superior a 30% na década de 2030 (JENNIFER, 2024).

A demanda mundial por cobalto pode atingir 190 kt em 2050, valor equivalente a aproximadamente 40% das reservas conhecidas (COBALT INSTITUTE, 2025). Em paralelo, a produção global de terras raras continua a crescer, alcançando 390 mil toneladas em 2024 (CORDIER, 2024; PISTILLI, 2025).

Para contextualizar essas tendências e reforçar a dimensão quantitativa do desafio, apresenta-se a seguir a Tabela 13, que sintetiza a produção recente e as projeções até 2030 para os principais minerais empregados na cadeia produtiva das baterias.

Tabela 13 – Produção e projeção de minerais

Mineral	Produção 2023 (milhões ton)	Produção 2024 (milhões ton)	Projeção 2030 (milhões ton)	Observações
Lítio	0.0028	0.0028	0.01	Preço US\$2,80/lb; extração marinha: US\$7–10/lb
Níquel	1.95	2.0	2.5	Principal matéria-prima: hidróxido/sulfeto misto
Cobalto	0.105	0.11	0.19	Demanda VE aumenta 6x até 2030; concentração RDC/China
Terras Raras	0.376	0.39	0.42	Produção global em expansão; China, Brasil, Vietnã, Rússia, Índia

Fonte: FRASER et al. (2021); Cobalt Institute (2025); Energy Transitions (2023).

A partir desses dados, observa-se que, embora a oferta global esteja em expansão, o ritmo de crescimento permanece inferior à demanda projetada pela indústria de VEs. Mesmo com a reciclagem, novas rotas tecnológicas e políticas industriais, a dependência por minerais críticos continuará a representar um dos principais pontos de fragilidade da transição energética. Nesse contexto, a implementação de estratégias de governança mineral, diversificação de suprimento e estímulo à inovação torna-se essencial para garantir a sustentabilidade da eletromobilidade.

2.6 Discussão sobre o capítulo

A análise integrada dos conceitos, dados quantitativos e evidências apresentados neste capítulo permite compreender que o avanço da mobilidade elétrica ocorre em um contexto marcado por tensões entre benefícios ambientais, limitações tecnológicas e restrições materiais.

Os indicadores analisados demonstram que, embora os veículos elétricos reduzam substancialmente as emissões ao longo do uso, essa redução depende de cadeias de suprimento que permanecem fortemente intensivas em mineração, energia e insumos estratégicos.

Os cenários da IEA mostram crescimento acelerado da frota global, especialmente no STEPS e no SDS, com impactos diretos tanto na demanda adicional de energia quanto na necessidade de minerais críticos.

Essa relação revela um paradoxo estrutural: as metas ambientais que impulsionam a expansão dos VEs ampliam simultaneamente a pressão sobre territórios mineradores e sobre uma cadeia de refino concentrada em poucos países. A dependência de lítio, níquel, cobalto e manganês cresce de forma desproporcional ao ritmo de diversificação tecnológica, como demonstrado pelas projeções de demanda até 2030.

A avaliação quantitativa das químicas NMC e LFP evidencia esse descompasso. Embora as baterias LFP reduzam a pressão sobre níquel e cobalto, permanecem dependentes de lítio e enfrentam menor densidade energética. Já as baterias NMC oferecem maior autonomia, mas intensificam a necessidade de insumos de maior impacto socioambiental, como o cobalto extraído na República Democrática do Congo.

Essa comparação reforça que a escolha tecnológica envolve *trade-offs* intrínsecos entre desempenho, custo e sustentabilidade.

Os dados sobre capacidade de reciclagem revelam outra assimetria importante: a infraestrutura mundial cresce em ritmo acelerado, mas ainda distante do volume necessário para mitigar a dependência da mineração primária. Mesmo com potencial técnico de recuperação superior a 90% para alguns metais, as taxas efetivas de reciclagem permanecem inferiores a 20% em grande parte do mundo, o que indica um gargalo operacional e político que limita o fechamento de ciclos produtivos.

As configurações de VEs analisadas — VEB, VEH e VECC — também reforçam que a sustentabilidade da mobilidade elétrica não é homogênea. VEBs oferecem maior eficiência, mas dependem mais intensamente de baterias. VEHs reduzem a necessidade de armazenamento eletroquímico, mas mantêm parte das emissões. VECCs ampliam a autonomia, porém deslocam o debate para a origem do hidrogênio. A comparação mostra que a transição energética não se resume à substituição tecnológica, mas exige avaliação sistêmica de infraestrutura, matriz energética e ciclo de vida.

Por fim, os argumentos contrários à adoção massiva dos VEs, fundamentados na escassez mineral e na concentração geopolítica da produção, dialogam diretamente com os resultados quantitativos apresentados. As projeções acumuladas demonstram que a oferta global de minerais cresce em ritmo inferior à demanda estimada pela indústria automotiva. Mesmo com ganhos tecnológicos, novos métodos de extração e expansão da reciclagem, os dados indicam que a cadeia de suprimento permanecerá tensionada ao longo da década.

Dessa forma, a discussão evidencia que a sustentabilidade da mobilidade elétrica depende de decisões integradas envolvendo governança mineral, políticas industriais, inovação tecnológica e expansão da reciclagem. O capítulo demonstra que, embora os VEs representem um avanço significativo no combate às emissões, sua consolidação requer não apenas ganhos ambientais no uso, mas também soluções estruturais para reduzir dependências, mitigar impactos e assegurar uma transição energética tecnicamente viável e socialmente responsável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo consistiu em uma revisão bibliográfica narrativa com estrutura sistemática, cujo objetivo foi investigar os impactos ambientais e o potencial de esgotamento mineral associados às baterias utilizadas em veículos elétricos. A revisão abrangeu todas as etapas do ciclo de vida (desde a extração dos recursos minerais até o descarte ou reaproveitamento) e foi escolhida devido ao caráter interdisciplinar da temática, que integra conhecimentos de gestão ambiental, Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção. Ressalta-se que, embora siga critérios metodológicos claros e estruturados, esta revisão não se caracteriza como uma revisão sistemática no sentido estrito do PRISMA.

O método empregado baseou-se na análise qualitativa e interpretativa de fontes científicas, institucionais e técnicas, permitindo a identificação de convergências, lacunas e tendências da literatura recente. Considerando o contexto contemporâneo de transição energética e a crescente relevância das políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável, foram priorizadas referências nacionais e internacionais de reconhecida credibilidade.

Para assegurar rastreabilidade, sistematização e reprodutibilidade, definiu-se um procedimento metodológico estruturado, documentado em fichamentos analíticos e planilhas de controle, garantindo que outro pesquisador possa replicar o processo desde a busca inicial até a síntese dos resultados. As subseções a seguir descrevem, de forma organizada, cada etapa desse processo metodológico.

3.1 Delineamento metodológico

O delineamento metodológico adotado neste trabalho foi estruturado a partir de uma sequência organizada de etapas que direcionou a revisão bibliográfica e orientou a análise crítica do conteúdo teórico.

A pergunta norteadora — “de que modo o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos influencia o esgotamento de recursos minerais e os impactos ambientais associados à sua fabricação, uso e descarte?” — guiou todo o processo metodológico e funcionou como eixo central para as decisões de seleção e interpretação das fontes.

A definição das etapas metodológicas seguiu uma lógica progressiva. Inicialmente, realizou-se o planejamento e a delimitação do escopo temático. Em seguida, procedeu-se à busca sistemática das fontes, aplicando critérios rigorosos de triagem e classificando o material selecionado em categorias temáticas.

A etapa posterior consistiu na análise comparativa dos estudos, seguida da síntese interpretativa dos resultados. Esse encadeamento garantiu coerência interna e permitiu construir uma base metodológica sólida. Todas as etapas foram registradas em fichamentos e planilhas de controle, assegurando rastreabilidade.

O recorte temporal — 2010 a 2025 — foi definido devido à consolidação, a partir de 2010, das principais químicas de baterias de íon-lítio presentes no mercado, como NMC e LFP. Esse período também coincide com o avanço das políticas de transição energética e com o crescimento das discussões sobre segurança mineral.

Além disso, engloba os primeiros esforços estruturados de reciclagem em escala industrial. Assim, o intervalo temporal selecionado é representativo tanto do progresso tecnológico quanto do amadurecimento regulatório do setor. A inclusão de publicações de 2024 e 2025 ocorreu desde que estivessem dentro do período real de coleta bibliográfica, concluída em meados de 2025.

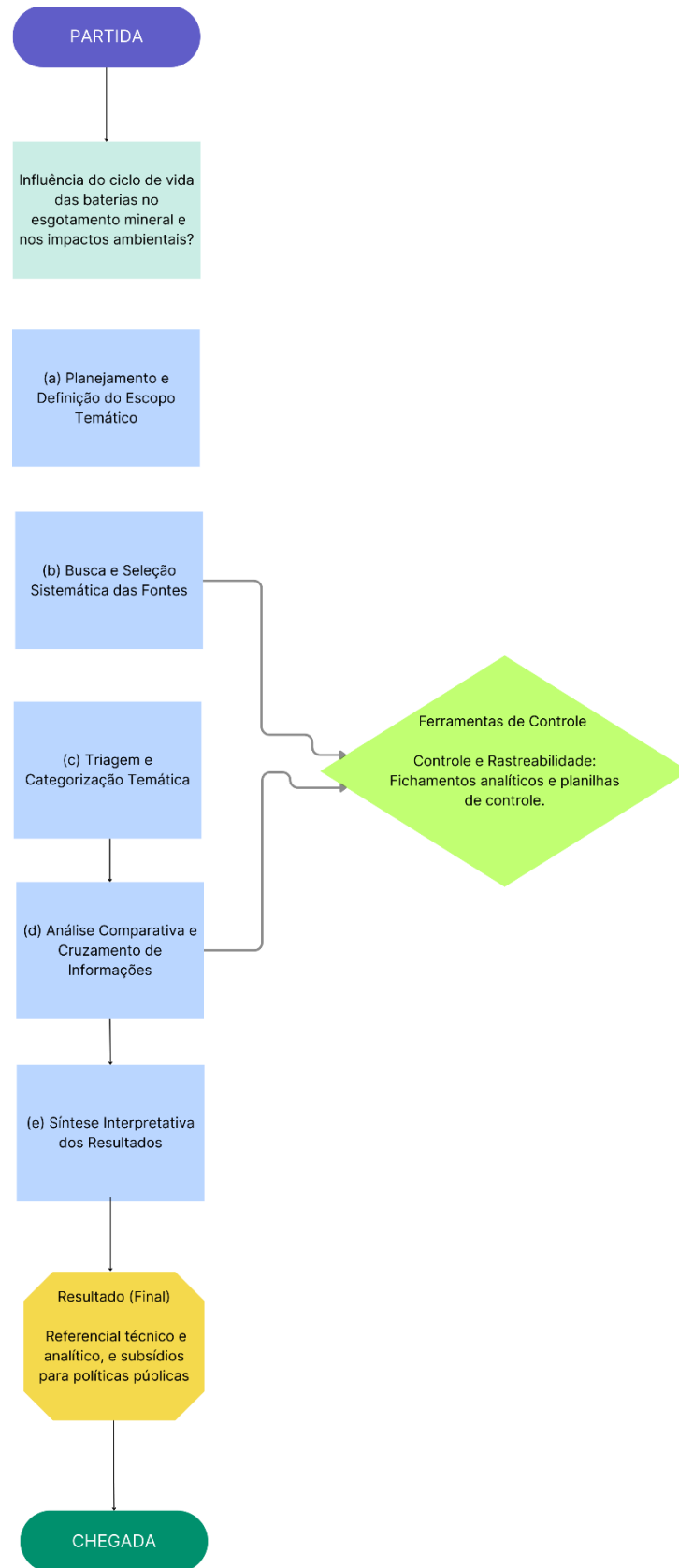
Embora o estudo não realize uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) completa, foram consideradas como referência conceitual as normas ISO 14040 e ISO 14044. Essas diretrizes auxiliaram na compreensão dos fluxos de materiais e das fronteiras sistêmicas que envolvem as etapas de fabricação, uso e descarte das baterias. A utilização dessas normas como base teórica fortaleceu a consistência metodológica, mesmo sem sua aplicação prática integral.

A opção por uma abordagem narrativa e analítico-comparativa se justifica pelo caráter multidisciplinar do tema. A mobilidade elétrica envolve elementos ambientais, tecnológicos, econômicos e geopolíticos, o que exige uma análise integrada.

Assim, a metodologia buscou não apenas descrever as fontes consultadas, mas também identificar relações, contrastes e convergências entre elas. Essa estratégia ampliou a capacidade interpretativa e possibilitou captar nuances relevantes do debate científico contemporâneo.

Para facilitar a visualização do processo adotado, elaborou-se o Fluxo Metodológico apresentado na Figura 5. Esse esquema sintetiza as etapas de planejamento, busca, triagem, análise e integração dos resultados, reforçando a clareza do percurso metodológico e sua reprodutibilidade.

Figura 5 – Fluxo Metodológico



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

3.2 Fontes e bases de dados

A seleção das fontes utilizadas nesta pesquisa foi orientada por critérios de abrangência, credibilidade institucional e relevância científica, de modo a garantir consistência metodológica e robustez interpretativa. Foram incluídos artigos revisados por pares, dissertações, documentos técnicos, livros especializados, relatórios internacionais e publicações de órgãos governamentais que tratam diretamente de temas como mobilidade elétrica, sustentabilidade energética, avaliação ambiental e mineração de recursos estratégicos.

As principais bases de dados acadêmicas utilizadas foram Google Acadêmico, SciELO, ScienceDirect, Scopus e IEEE Xplore, que permitiram acesso a periódicos da Engenharia Elétrica, Engenharia de Materiais, Engenharia de Produção e Sustentabilidade. Essas bases foram escolhidas por sua amplitude de cobertura e pelo rigor editorial, além de oferecerem mecanismos eficientes de filtragem por relevância, ano, metodologia e impacto científico.

A busca foi complementada por repositórios institucionais, como o Portal de Periódicos CAPES, que disponibiliza conteúdo técnico de alta qualidade e amplo alcance multidisciplinar. Além disso, foram consultadas publicações de órgãos estratégicos, a exemplo do Departamento de Energia dos Estados Unidos (US DOE), da Agência Internacional de Energia (IEA), do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Esses materiais forneceram dados numéricos atualizados, projeções técnicas e análises de políticas públicas essenciais para contextualizar a temática no cenário global e nacional.

A Tabela 14 apresenta a organização das fontes e bases de dados consultadas, permitindo visão estruturada dos materiais e da finalidade de cada grupo documental dentro da pesquisa.

Tabela 14 – Fontes de informação e bases de dados utilizadas na pesquisa

Tipo de fonte	Base ou instituição consultada	Natureza da informação	Finalidade na pesquisa
Artigos científicos	Google Acadêmico, SciELO, ScienceDirect, Scopus, IEEE Xplore	Dados técnicos, análises de impacto ambiental, estudos comparativos e indicadores de ciclo de vida	Fundamentar o referencial teórico e identificar avanços tecnológicos e impactos ambientais das baterias automotivas
Livros técnicos e dissertações	Repositórios universitários e Portal de Periódicos CAPES	Conceitos fundamentais, modelagens de sistemas e fundamentos de engenharia e sustentabilidade	Suporte conceitual e metodológico à análise técnica e energética
Relatórios institucionais e documentos técnicos	US Department of Energy (DOE), Agência Internacional de Energia (IEA), BNDES	Estatísticas de produção e consumo energético, políticas públicas, dados industriais	Relacionar dados empíricos e políticas globais de mobilidade elétrica
Publicações governamentais brasileiras	Ministério do Meio Ambiente (MMA), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)	Diretrizes regulatórias, normas ambientais e planos de sustentabilidade nacionais	Integrar as políticas públicas e normas brasileiras à análise metodológica
Publicações internacionais e organismos multilaterais	ONU, União Europeia, Agência Internacional de Energia (IEA)	Indicadores globais de sustentabilidade, transição energética e governança mineral	Permitir comparação internacional e contextualização da pesquisa

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

O uso combinado de diferentes tipos de fontes buscou garantir pluralidade metodológica, permitindo confrontar perspectivas técnicas, regulatórias e científicas. Essa triangulação reforça a confiabilidade dos achados e reduz vieses interpretativos, uma vez que informações provenientes de relatórios institucionais puderam ser comparadas com dados experimentais, estudos de ciclo de vida e pesquisas acadêmicas independentes.

As palavras-chave empregadas nas buscas foram estruturadas com operadores booleanos (*AND/OR*) e utilizadas tanto em português quanto em inglês, garantindo maior amplitude e precisão na recuperação das publicações. Termos como *“baterias automotivas”*, *“lithium-ion batteries”*, *“impacto ambiental”*, *“critical minerals”*, *“battery recycling”*, *“sustentabilidade energética”* e *“rare earth elements”* permitiram alcançar resultados diversos, desde estudos experimentais até análises de cenários energético-minerais.

Para maior transparência metodológica, a Tabela 15 sintetiza as combinações booleanas utilizadas e as categorias temáticas derivadas do conjunto de termos selecionados.

Tabela 15 – Palavras-chave e combinações booleanas utilizadas na pesquisa

Eixo temático	Palavras-chave principais	Combinações booleanas aplicadas	Objetivo da busca
Tecnologia e engenharia das baterias	“baterias automotivas”, “baterias de íons de lítio”, “níquel”, “cobalto”, “manganês”, “terras raras”	(“baterias automotivas” OR “baterias de íons de lítio”) AND (“níquel” OR “cobalto” OR “manganês”)	Identificar aspectos técnicos e químicos das baterias e sua evolução tecnológica
Impacto ambiental e esgotamento mineral	“impacto ambiental”, “esgotamento mineral”, “recursos naturais”, “avaliação do ciclo de vida”	(“impacto ambiental” AND “baterias automotivas”) OR (“esgotamento mineral” AND “veículos elétricos”)	Analisar os impactos ecológicos e o consumo de recursos minerais estratégicos
Reciclagem e sustentabilidade	“reciclagem de baterias”, “reaproveitamento de materiais”, “sustentabilidade energética”	(“reciclagem de baterias” OR “reaproveitamento de materiais”) AND “sustentabilidade energética”	Explorar estudos sobre reaproveitamento e sustentabilidade no ciclo de vida das baterias
Gestão e políticas públicas	“gestão ambiental”, “política pública”, “normas ambientais”, “mobilidade elétrica”	(“gestão ambiental” AND “mobilidade elétrica”) OR (“política pública” AND “baterias automotivas”)	Relacionar a literatura técnica com diretrizes normativas e políticas setoriais
Abordagem geral e interdisciplinar	“veículos elétricos”, “sustentabilidade”, “transição energética”, “engenharia de produção”	(“veículos elétricos” AND “sustentabilidade”) OR (“engenharia elétrica” AND “transição energética”)	Ampliar o escopo da revisão e conectar o tema às dimensões tecnológicas e sociais

Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Essa etapa, portanto, estruturou-se como um pilar central da revisão, assegurando que os materiais analisados fossem representativos da literatura contemporânea, atualizados até 2025 e pertinentes às abordagens ambiental, tecnológica, mineral e econômica que sustentam esta pesquisa.

3.3 Critérios de seleção e organização do material

A fim de assegurar a confiabilidade das fontes e sua relevância, foi seguido um protocolo criterioso de seleção durante a triagem do material. Com rigor metodológico, foram incluídos artigos científicos, dados comparativos sobre impacto ambiental e esgotamento mineral, estudos de ciclo de vida (ACV/LCA) e publicações pertinentes às políticas públicas aplicadas à mobilidade elétrica sustentável.

Foram excluídos textos sem revisão por pares, relatórios opinativos, conteúdos jornalísticos ou documentos que não evidenciassem sua metodologia ou aplicabilidade direta ao tema.

Os estudos selecionados foram agrupados em cinco eixos temáticos:

- a) Composição química e disponibilidade dos elementos minerais;
- b) Impacto ambiental e energético do ciclo de vida das baterias;
- c) Implicações econômicas e geopolíticas da extração mineral;
- d) Tecnologias emergentes e processos de reciclagem;
- e) Políticas públicas e regulamentações voltadas à sustentabilidade e governança ambiental.

Cada eixo foi subdividido em subtemas, permitindo o cruzamento de informações entre diferentes fontes. Para possibilitar a formulação de fluxos de correlação entre variáveis e quadros interpretativos, os dados foram resumidos em fichas comparativas contendo autor, ano, metodologia aplicada, principais resultados e conclusões de maior relevância, além de indicadores quantitativos quando disponíveis, como intensidade de CO₂ (kg CO₂/kWh), consumo energético por ciclo e taxa de reciclagem (%).

As tabelas, figuras e gráficos utilizados foram mencionados no texto, garantindo clareza e permitindo análises comparativas objetivas, conforme sugerido para pesquisas de engenharia.

3.4 Procedimentos de análise e interpretação

Por meio de uma abordagem teórica de triangulação, a análise do material foi guiada pelo exame comparativo de dados de origem técnica e pela interpretação qualitativa. A integração de variadas perspectivas – ambiental, mineral, regulatória e tecnológica – foi possibilitada por essa triangulação, permitindo também a identificação de pontos de convergência entre os estudos revisados.

Quadros-resumo e fichamentos analíticos foram utilizados para o processamento das informações, destacando-se variáveis relacionadas à eficiência energética, ao consumo de recursos minerais críticos e às emissões de gases de efeito estufa. Para correlacionar as etapas do ciclo de vida das baterias – fabricação, utilização, descarte e reciclagem – com seus impactos sociais e ambientais, foram desenvolvidos mapas conceituais, proporcionando visão sistêmica das relações entre tecnologia e sustentabilidade.

Com o objetivo de compreender como o meio acadêmico fundamenta o debate sobre sustentabilidade e inovação tecnológica, a etapa interpretativa também envolveu a análise qualitativa do discurso científico. Categorias definidas previamente guiaram essa análise textual, permitindo identificar tendências metodológicas emergentes e avaliar conceitos-chave do tema.

Os resultados obtidos por esse método proporcionam uma visão integrada dos desafios técnicos e ambientais associados às baterias automotivas, permitindo compreender vínculos entre mineração, sustentabilidade e tecnologia, diretamente relacionados aos objetivos deste trabalho

3.5 Síntese metodológica e reprodutibilidade

A reprodutibilidade mencionada refere-se exclusivamente à estratégia de busca e à organização dos dados, garantindo transparência deste trabalho, uma vez que todas as etapas – análise, busca e triagem – estão detalhadas descritivamente, permitindo sua repetibilidade por pesquisadores futuros. Além disso, o método adota uma ótica interdisciplinar, articulando dimensões ambientais e técnicas com base nos princípios da Engenharia Elétrica e da Engenharia de Produção.

Com o objetivo de oferecer subsídios aplicáveis à formulação de políticas públicas e à otimização de processos industriais, a integração entre revisão bibliográfica, discussão normativa e análise comparativa permite que os resultados ultrapassem uma simples descrição técnica, fornecendo contribuições interpretativas e objetivas.

A consistência da aplicação metodológica e o enfoque narrativo consolidam uma abordagem científica sobre o papel das baterias na transição da matriz energética, reforçando a necessidade de inovação tecnológica e de gestão sustentável dos recursos minerais críticos.

Essa metodologia estabeleceu um referencial técnico e analítico consistente, que orienta a interpretação dos resultados apresentados na seção seguinte, voltados à análise dos impactos ambientais, da disponibilidade mineral e das implicações tecnológicas das baterias de veículos elétricos.

3.6 Discussão sobre o capítulo

O presente capítulo apresentou de forma detalhada os materiais, métodos e procedimentos de análise adotados nesta pesquisa, destacando a consistência e a robustez metodológica do estudo. A escolha por uma revisão bibliográfica de caráter narrativo e analítico-comparativo se mostrou adequada para investigar os impactos ambientais e o potencial de esgotamento mineral das baterias de veículos elétricos, considerando a complexidade interdisciplinar do tema, que envolve dimensões ambientais, tecnológicas, econômicas e regulatórias.

A aplicação de um protocolo rigoroso de seleção de fontes, aliado à utilização de bases de dados amplamente reconhecidas e de fichamentos analíticos, permitiu identificar convergências, lacunas e tendências emergentes na literatura. Esse procedimento fortalece a rastreabilidade e a reprodutibilidade do estudo, garantindo que outros pesquisadores possam replicar as etapas de busca, triagem e análise. A estruturação dos estudos em eixos temáticos e subtemas possibilitou o cruzamento de informações e a formulação de fluxos interpretativos, evidenciando relações entre variáveis ambientais, de eficiência energética e de consumo de minerais críticos.

A triangulação de abordagens – qualitativa, quantitativa e interpretativa – forneceu uma visão integrada dos desafios técnicos e ambientais das baterias, permitindo compreender vínculos sistêmicos entre mineração, sustentabilidade e inovação tecnológica. Além disso, a inclusão de indicadores quantitativos, quando disponíveis, como intensidade de CO₂, consumo energético e taxas de reciclagem, trouxe maior objetividade à análise e alinhamento com boas práticas da pesquisa em engenharia.

A síntese metodológica demonstrou que a metodologia empregada não apenas descreve o estado da arte, mas também oferece subsídios técnicos e analíticos para a formulação de políticas públicas e a otimização de processos industriais. Ao articular a revisão bibliográfica, a análise comparativa e a discussão normativa, o capítulo estabelece um referencial sólido para a interpretação dos resultados, preparando o terreno para a avaliação dos impactos ambientais, da disponibilidade mineral e das implicações tecnológicas das baterias, que será detalhada na seção seguinte.

Em síntese, o capítulo evidencia que a abordagem metodológica adotada permitiu equilibrar rigor científico, clareza interpretativa e aplicabilidade prática, consolidando uma base consistente para a análise crítica do papel das baterias na transição energética e na sustentabilidade dos recursos minerais estratégicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos resultados que foram obtidos na revisão bibliográfica este capítulo exibe uma análise de modo interpretativo e comparativo desses dados, dando destaque ao interlace entre os fatores ambientais, econômicos, geopolíticos e técnicos que envolvem a cadeia produtiva e o uso das baterias de veículos elétricos (VEs). Relacionando dados não só de fontes científicas, mas também institucionais, tais como a Agência Internacional de Energia – IEA, o Departamento de Energia dos Estados Unidos – US DOE, relatórios contemporâneos da indústria, essa discussão inicia de uma abordagem sistêmica, com a finalidade de avaliar o modo que o crescente avanço do incremento da frota mundial de veículos elétricos influi no esgotamento mineral e na sustentabilidade ambiental.

Busca-se o entendimento sobre em que grau a diversificação de matérias-primas, os avanços tecnológicos e as políticas públicas são capazes de reduzir os impactos que decorrem do ciclo de vida das baterias automotivas a partir das evidências reunidas. O cenário mundial e suas implicações no cenário brasileiro são considerados nessa análise, identificando os pontos de convergência e contradições que envolvem o crescimento econômico, a inovação tecnológica e o uso sustentável dos recursos minerais.

Além disso, considerando que o título deste trabalho inclui o termo qualidade, este capítulo passa também a integrar essa dimensão de forma explícita, relacionando-a tanto à qualidade ambiental dos impactos (como toxicidade, contaminação hídrica e geração de resíduos complexos), quanto à qualidade tecnológica das baterias (durabilidade, eficiência e desempenho), assegurando alinhamento conceitual entre o título, os objetivos e a discussão apresentada.

4.1 Panorama global da cadeia de suprimentos de baterias e seus impactos

A cadeia mundial de suprimento de minerais foi redesenhada dada a rápida expansão do mercado de VEs. A República Democrática do Congo detém, aproximadamente, 70% da produção mundial do cobalto, enquanto a China responde por mais de 80% do processo de refino do lítio, manganês e níquel (IEA, 2024). Fragilidades estruturais e geopolíticas são criadas em virtude dessa concentração geográfica dos minerais, já que uma alta exposição a instabilidades políticas, barreiras comerciais e práticas trabalhistas precárias são causadas em virtude dessa dependência de poucos países produtores (HARVEY, 2024; CRELLIN, 2025).

Na prática, esse tipo de concentração tem sido registrado e analisado por agências internacionais. A IEA, por exemplo, aponta níveis elevados de concentração geográfica de produção e processamento de minerais críticos, com a República Democrática do Congo fornecendo grande parcela do cobalto global e com a China dominando etapas de refino. Esses dados corroboram o cenário de risco estrutural destacado nos estudos revisados.

O valor mundial do mercado de lítio ultrapassou US\$ 90 bilhões em 2024, sob o ponto de vista econômico, dado em razão da elevação da demanda por minerais críticos, decorrendo da impulsão que foi dada no mercado das baterias de íon-lítio. Porém, os preços de mercado são voláteis, demonstrando que o segmento ainda é extremamente sensível a choques de oferta e de políticas de exportação, especialmente em relação ao cobalto e ao níquel. Exemplificando esse cenário, a República Democrática do Congo adotou cotas para a exportação de cobalto, no ano de 2025, visando o fortalecimento do beneficiamento interno e a estabilização dos preços internacionais do minério (HODGSON, 2025).

Existe também o componente social e o ambiental, que vai além da vulnerabilidade econômica. A depredação do meio ambiente, a contaminação dos recursos hídricos e as emissões de gases de efeito estufa se associam com frequência à exploração intensiva de minerais críticos. Os processos de mineração e refino do cobalto respondem a até 35% das emissões totais decorrentes da produção de baterias de íon-lítio (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2024).

Desafios diretos são impostos à sustentabilidade em razão da dependência mútua entre a extração mineral e a tecnologia. Dessa urgência em celeridade para que seja realizada essa transição energética decorre um paradoxo: ao passo que as emissões de CO₂ em veículos são reduzidas, o consumo de recursos não renováveis é aumentado no processo produtivo. Em função disso, as políticas de estímulo ao fornecimento circular guardam sua devida importância, embasadas na economia de ciclo fechado e no reaproveitamento de materiais.

Na América do Sul, a Argentina, a Bolívia e o Chile formam o triângulo do lítio, área estratégica que responde por, aproximadamente, 75% das reservas mundiais conhecidas de lítio (JASKULA, 2024). No entanto, os impactos ambientais e sociais que decorrem da expansão da exploração nessa região do processo extrativista suscitam questionamentos, em virtude das grandes quantidades de água que são consumidas, afetando ecossistemas frágeis do altiplano andino. Uma forte regulação ambiental e divisão isonômica dos benefícios econômicos são necessárias para a sustentabilidade da produção do lítio.

Os fatores apontados destacam que a transição energética mundial, em que pense haja de fato sua relevante urgência e necessidade, necessita de planejamento para que novas formas de

dependência e desigualdade mineral não sejam empregadas. Cooperar internacionalmente para a utilização responsável dos recursos, estimular a pesquisa sobre reciclagem e fortalecer as cadeias regionais são medidas essenciais para se assegurar uma transição equilibrada e justa.

A partir desse panorama global e de seus desdobramentos ambientais, torna-se essencial quantificar esses impactos ao longo do ciclo de vida. Por isso, a próxima subseção apresenta a análise estruturada com base no modelo GREET, que permite interpretar, de forma comparativa, o peso ambiental de cada etapa da cadeia das baterias.

4.2 Impactos ambientais e energéticos das baterias de veículos elétricos: análise com base no modelo GREET

Do início do processo extrativo dos insumos até o seu término, no descarte ou reaproveitamento, todas as etapas do ciclo de vida das baterias de veículos elétricos devem ser analisadas em conjunto, a fim de que sejam mensurados seus impactos ambientais e energéticos.

O modelo GREET é uma ferramenta que possui finalidade de se chegar a uma projeção estimada do consumo de energia e das emissões de gases de efeitos estufa (GEE) de tecnologias de automóveis. Ela foi desenvolvida pelo Argonne National Laboratory, sediado nos EUA (ARGONNE, 2024).

O software GREET, sigla do inglês *Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy use in Technologies*, foi usado como referência conceitual e metodológica, apesar de não ter sido usado diretamente neste trabalho, visando modelar a análise em torno das entradas (inputs), constituídas pelas matérias-primas e energia, e dos outputs (saídas), correspondendo às emissões, aos resíduos e aos subprodutos no decorrer do ciclo de vida das baterias dos automóveis.

São concentradas na produção das células das baterias e no processamento dos minerais críticos as fases mais intensivas tanto em energia quanto emissões de GEE (Gases de efeito estufa), conforme aponta o GREET. De 3 a 6 toneladas de CO₂-equivalente são geradas pela produção de uma bateria de íon-lítio de 60 kWh, variando segundo a matriz elétrica e a eficiência dos processos industriais adotados segundo apontam estudos que se alicerçam nesse modelo (ARGONNE, 2024; EEA, 2023).

A demanda pela otimização dos processos que envolvem o refino e a montagem ficam em evidência dado o consumo energético para essa produção, que fica entre 50 e 80 kWh por kWh de capacidade instalada, em média, de capacidade instalada. (HEBALA et al., 2025).

A alta correlação entre a origem da energia elétrica e a pegada de carbono total do veículo é outro ponto de destaque observado nos estudos do GREET. As emissões que se associam à utilização e à recarga das baterias são consideravelmente reduzidas em países que possuem matriz elétrica renovável, tais como o Brasil e a Noruega. Já em regiões nas quais a eletricidade tem origem principal oriunda do gás natural ou carvão, em contrapartida, os VEs têm um menor benefício climático líquido, principalmente nas primeiras etapas do ciclo de vida (IEA, 2024; US DOE, 2024).

Analisando o ciclo de vida evidencia-se que, passados entre 20 a 30 mil quilômetros de utilização do VE, suas emissões acumuladas se reduzem se comparadas as de um veículo convencional a combustão interna, fato que mitiga e equilibra os primeiros impactos da fabricação da bateria (ARGONNE, 2024; EEA, 2023). A depender do tipo de bateria empregado, o peso do veículo e a eficiência do sistema de recarga esse ponto de equilíbrio se altera.

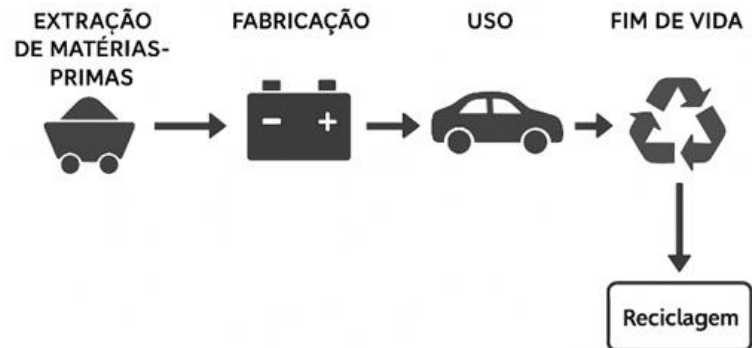
Outros dados são fornecidos pelo GREET para a análise das emissões reguladas além do consumo energético, tais como óxidos de nitrogênio, material particulado e orgânicos voláteis. As emissões diretas de poluentes são reduzidas em até 90% quando são postos lado a lado os VEs e os veículos de combustão interna, conforme apontam os estudos de modelagens recentes, o que evidencia tanto ganhos de saúde pública, quanto ganhos ambientais urbanos (EEA, 2023; IEA, 2024).

A eficiência ambiental dos veículos elétricos possui uma dependência muito alta tanto da matriz elétrica quanto das políticas de reciclagem e das tecnologias de refino é uma conclusão que se chega a partir da integração desses dados. Desse modo, o software GREET funciona como base metodológica para o entendimento de variáveis distintas, sejam as econômicas, geográficas ou técnicas, se relacionam e afetam o desempenho ambiental das baterias, sem haver a necessidade de se aplicar diretamente o software.

Os impactos que se concentram na fase de produção e na fase de extração mineral ainda se mostram como um desafio fundamental para a sustentabilidade da mobilidade elétrica, em que pese que os veículos elétricos apresentem consideráveis vantagens ambientais ao longo de seu uso, é um reforço que a análise criteriosa deste modelo conceitual reforça. Para que os veículos elétricos consolidem a longo prazo tanto sua viabilidade ambiental quanto energética é fundamental que sejam equilibrados o balanço tecnológico, a descarbonização da matriz elétrica e o fortalecimento das práticas de reciclagem.

O modelo GREET é reconhecido mundialmente como uma das ferramentas mais completas para a avaliação do ciclo de vida de tecnologias veiculares e energéticas. A figura 6 indica simplificada o fluxo do ciclo de vida das baterias de íon-lítio.

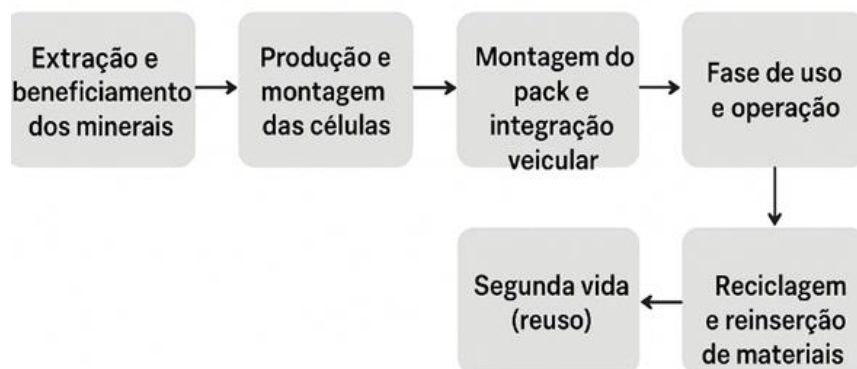
Figura 6 – Fluxo simplificado do ciclo de vida das baterias de íon-lítio



Fonte: Adaptado de GREET (Argonne National Laboratory, 2024) e ISO 14040/14044 (2023)

O modelo foi empregado como referência conceitual e metodológica para a estruturação e análise das etapas do ciclo de vida das baterias de íon-lítio utilizadas nos veículos elétricos (VEs), ainda que este estudo não tenha realizado uma aplicação direta do software, o modelo foi adotado. As fases principais são apresentadas, na figura 7, de forma esquemática, na avaliação desde a extração mineral até a reciclagem e reinsertão de materiais.

Figura 7 – Etapas do ciclo de vida das baterias segundo o modelo GREET



Fonte: Adaptado de Argonne National Laboratory (2024).

É possível descrever o ciclo de vida das baterias automotivas em 6 estágios principais:

a) Extração e beneficiamento dos minerais

Voltados essencialmente à produção dos ânodos e cátodos das células das baterias, ocorre na primeira etapa, a mineração e o refino dos minerais críticos, como o cobalto, o grafite, o lítio, o manganês e o níquel. No que tange às emissões e à energia, essa é a fase que ocorre com maior intensidade, principalmente em função do transporte mineral e da utilização de combustíveis fósseis nos maquinários (IEA, 2024). Podem representar até 40% do total do ciclo de vida de uma bateria de íon-lítio as emissões de CO₂ dessa fase, segundo o GREET identifica, a depender da origem energética da mineração.

b) Produção e montagem das células

Primeiramente é realizado, nessa fase, o refino químico, seguido pela síntese dos materiais anódicos e catódicos e, por último, a montagem das células e dos módulos. São fatores decisivos, nessa etapa, o mix energético regional e a energia elétrica empregada. Países com matrizes elétricas mais limpas, tais como o Canadá e a Noruega, segundo indicam estudos baseados no GREET, têm a capacidade de reduzir até 30% das emissões de gases de efeito estufa no processo de produção das baterias, se comparada à China, país em que há uma dependência ainda muito grande da eletricidade pelo carvão (Argonne National Laboratory, 2024).

c) Montagem do *pack* e integração veicular

As células, que são produzidas e depois montadas, são agrupadas em módulos e, junto dos sistemas de controle eletrônico e térmico, são integradas ao sistema elétrico do veículo. Essa etapa é fundamental para a eficiência energética do sistema, apesar de ser responsável por uma pequena fração do impacto total (cerca de 5%).

d) Fase de uso e operação

Os veículos elétricos não produzem diretamente emissões de escapamento durante sua utilização, contudo seu impacto indireto depende da matriz elétrica que é utilizada para seu carregamento das baterias. O GREET possui a capacidade de modelar variados cenários, partindo de redes com alta penetração de renováveis até inclusive matrizes baseadas em carvão, fato que demonstra que se comparada aos veículos à combustão, a redução líquida de emissões pode variar de 25% a 70%, dependendo de onde provém a eletricidade (US DOE, 2023; IEA, 2024).

e) Segunda vida (reuso)

As baterias podem ser recondiçionadas para aplicações estacionárias – findada sua vida útil nos automóveis, o que ocorre em geral entre 8 e 12 anos – como sistemas de armazenamento

de energia em redes elétricas. A utilização útil das baterias pode ser prolongada em até 10 anos extras nessa segunda via, diminuindo o impacto sobre o ciclo produtivo e retardando a necessidade de reciclagem (Energy Transitions, 2024).

f) Reciclagem e reinserção de materiais

Compostos ativos e metais valiosos das baterias descartadas são envolvidos nesta última etapa. Um crédito ambiental é contabilizado nessa fase pelo GREET, já que a reciclagem diminui a necessidade de se extrair minérios novamente. A reciclagem tem a possibilidade de compensar até 15% da demanda total de lítio e 25% de cobalto até 2030, conforme estimativa da Agência Internacional de Energia. Porém, ainda há uma limitação da eficiência global da reciclagem, que ainda permanece em cerca de 10% em escala mundial (ABTC, 2024).

Esse fluxo de materiais é resumido de forma gráfica pela figura 6 apresentada anteriormente, que evidencia os pontos críticos do impacto ambiental e as possibilidades de mitigação que o modelo GREET auxilia em sua identificação. O uso conceitual do modelo nessa pesquisa auxilia, desse modo, na organização das evidências bibliográficas e nas técnicas de modo sistemático, possibilitando a compreensão da interdependência entre os processos da indústria e os impactos ambientais que se relacionam às baterias automotivas.

4.3 Impactos ambientais e energéticos ao longo do ciclo de vida das baterias

A compreensão dos fluxos de energia e das emissões associadas a cada etapa do ciclo de vida é possibilitada pela análise dos impactos energéticos e ambientais das baterias automotivas, conforme o modelo GREET. As diretrizes metodológicas do modelo GREET foram adotadas como referência para a estruturação comparativa e analítica, mesmo que nesse estudo o software não tenha sido executado propriamente, possibilitando a avaliação dos efeitos ambientais de cada etapa e sua contribuição na transição energética.

A etapa de extração e beneficiamento de minerais é a que mais tem relevância para o impacto ambiental total das baterias, correspondendo a até 40% das emissões de CO₂-equivalente associadas à sua produção, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024). Isso decorre do consumo elevado de energia e da emissão de poluentes originada tanto do processo de mineração quanto do refino de materiais críticos, tais como o cobalto, o lítio e o níquel. Ecossistemas locais são afetados pelo processo de extração a céu aberto e pelo uso intensivo de reagentes químicos, que implicam em demanda elevada de recursos d'água na geração de resíduos tóxicos (ZENG et al., 2023; IEA, 2024).

O impacto é do mesmo modo expressivo na etapa de produção e montagem das células. Entre 60 e 100 kg de CO₂-equivalente são emitidos na fabricação de 1 kWh de capacidade em baterias de íon-lítio, a depender da matriz energética que se emprega na produção (ELLINGSEN et al., 2022). Países com a matriz energética mais limpa como os da União Europeia e o Brasil possuem a tendência de apresentarem emissões consideravelmente menores do que de regiões cuja geração elétrica possui dependência forte de carvão mineral (IEA, 2023).

Há uma redução significativa das emissões diretas durante a etapa de uso e operação, na qual os veículos elétricos podem chegar a zero emissões locais. O impacto indireto, no entanto, depende de qual tipo de fonte de energia elétrica foi utilizada no carregamento. As emissões totais de ciclo de vida podem ser até 70% menores se comparadas a um veículo a combustão interna, em cenários de alta penetração de fontes renováveis, enquanto nas redes baseadas em carvão mineral essa margem de vantagem é reduzida para aproximadamente 25% (US DOE, 2024).

Uma oportunidade de prolongamento da vida útil das baterias é representada pelas etapas de segunda via e reuso, modificando seu uso para sistemas estacionários de armazenamento de energia, tais como unidades solares residenciais e *microgrids*. A vida útil pode ser prolongada em até dez anos, diminuindo a demanda por novos insumos minerais e deixando de emitir emissões equivalentes a aproximadamente 15 toneladas de CO₂ por MWh reutilizado (IEA, 2024).

Por fim, o maior desafio logístico e tecnológico ainda é o da reinserção e da reciclagem de materiais. É na casa de 7% a taxa média de recuperação global de baterias automotivas, valor ainda muito baixo do potencial técnico de 80% (IEA, 2024). Uma capacidade cada vez maior de recuperação de cobalto, lítio e níquel é demonstrada pelas recentes tecnologias de reciclagem hidrometalúrgica e pirometalúrgica, contudo ainda há uma restrição econômica e de escala (ZHANG et al., 2024).

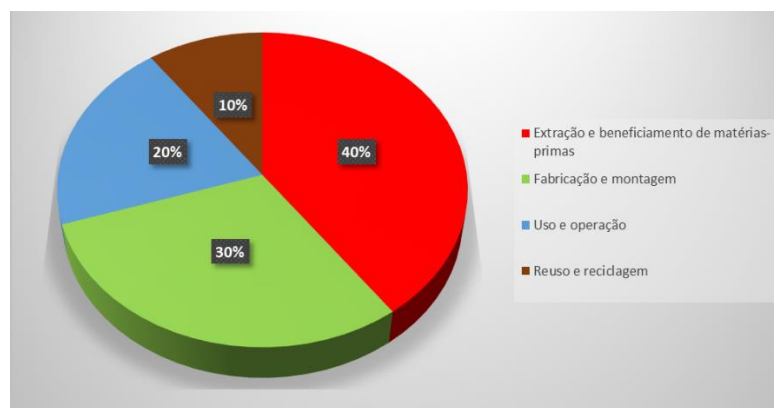
4.4 Comparação de impactos ambientais entre tecnologias de baterias

A escolha de um tipo de célula possui influência direta tanto no desempenho ambiental quanto no potencial de esgotamento mineral, fato que é possível se compreender quando se analisa comparativamente as diferentes tecnologias de baterias de veículos elétricos. Predominam atualmente no mercado as tecnologias de íon-lítio e suas variações químicas: Níquel-Manganês-Cobalto (NMC), Lítio-Ferro-Fosfato (LFP) e Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA), além das baterias com a tecnologia emergente de estado sólido.

O impacto das fases na produção das baterias sobre o meio ambiente se distribui de forma desigual: a extração e beneficiamento de matérias-primas críticas representam, em média, 40% do total das emissões associadas ao ciclo de vida, seguidas pela fabricação e montagem (30%), uso e operação (20%) e reuso/reciclagem (10%).

Para evidenciar essa diferenciação entre as etapas do ciclo de vida, apresenta-se o Gráfico 6, que demonstra a distribuição percentual dos impactos ambientais das baterias, destacando o peso relativo das fases de extração, fabricação, uso e fim de vida.

Gráfico 6 – Distribuição dos impactos ambientais das baterias ao longo do ciclo de vida



Fonte: Adaptado de GREET (2024).

As baterias NMC possuem alta densidade energética e são utilizadas em veículos de médio e alto desempenho, apesar de possuírem maior impacto ambiental em razão da utilização em grande quantidade de cobalto e níquel, minerais em que na sua extração possuem elevada pegada de carbono e riscos socioambientais (IEA, 2024; HEBALA et al., 2025). As baterias LFP, outrossim, possuem menor densidade energética, porém apresentam menor toxicidade e ausência do mineral cobalto, o que as destaca como alternativas mais sustentáveis para curtas distâncias e veículos urbanos (US DOE, 2024).

Essa comparação, centrada no conteúdo mineral por kWh e no risco de esgotamento associado, constitui o eixo central da análise deste trabalho, destacando que escolhas tecnológicas têm impactos diretos sobre a sustentabilidade mineral e ambiental das baterias. A sistematização desses dados permite compreender como a substituição gradual de NMC por LFP contribui para reduzir vulnerabilidades da cadeia de suprimentos e riscos de escassez de minerais críticos.

Uma bateria LFP, quando se leva em conta as emissões totais de CO₂-equivalente, se comparada a uma bateria NMC ou similar pode apresentar redução de até 35% no impacto

climático (IEA, 2024). A menor energia incorporada na etapa produtiva e a ausência de metais críticos são as causas principais dessa diferença.

As baterias de estado sólido, por outro lado, prometem reduzir consideravelmente as emissões e a dependência de metais críticos, tendo a capacidade de reduzir em até 50% o consumo tanto do lítio quanto do cobalto, além de oferecer maior segurança operacional e durabilidade (MCKINSEY & COMPANY, 2024). Apesar dessas vantagens seu emprego em larga escala ainda é dificultado pelo seu custo produtivo e pelos seus desafios técnicos associados à sua estabilidade eletrolítica.

Para sintetizar essas diferenças entre as principais tecnologias e evidenciar como cada configuração influencia o desempenho energético e o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida, apresenta-se a seguir a Tabela 16, que reúne comparativamente seus principais parâmetros técnicos e ambientais.

Tabela 16 – Comparação dos tipos de baterias quanto ao impacto ambiental e desempenho

Tipo de Bateria	Composição Principal	Densidade Energética	Metais Críticos Envolvidos	Principais Vantagens	Principais Desvantagens	Impacto Ambiental Relativo
NMC (Níquel-Manganês-Cobalto)	Óxidos de níquel, manganês e cobalto	Alta	Cobalto e níquel	Alta capacidade energética e autonomia; desempenho superior.	Elevado impacto ambiental; alto custo; riscos socioambientais na extração.	Mais alto
LFP (Fosfato de Ferro-Lítio)	Fosfato de ferro e lítio	Média	Lítio	Menor toxicidade; maior segurança térmica; ausência de cobalto.	Menor densidade energética; autonomia reduzida.	35% menor que NMC
Estado Sólido	Lítio metálico com eletrólito sólido	Muito alta	Reduzido uso de lítio e cobalto	Alta eficiência; maior durabilidade; segurança elevada.	Custo elevado; tecnologia ainda experimental.	Até 50% menor que NMC

Fonte: Adaptado de IEA (2024); US DOE (2024); HEBALA (2025); MCKINSEY & COMPANY (2024).

A substituição gradual e progressiva das baterias NMC pelas LFP, de modo geral, e no futuro, por baterias de tecnologias de estado sólido, se mostra como uma estratégia para a mitigação do exaurimento de minerais estratégicos e as emissões associadas à cadeia produtiva. Essa diversificação tecnológica, contudo, necessita ser seguida por avanços nos processos de reciclagem e no reuso de componentes, afim de que seja assegurado a circularidade dos materiais e a sustentabilidade dos veículos elétricos e seu setor automotivo.

4.5 Reciclagem e economia circular das baterias

Uma das principais estratégias para a mitigação do impacto ambiental e alívio da pressão sobre a extração de minerais críticos é a reciclagem das baterias automotivas. O emprego de práticas de economia circular é essencial para garantir a sustentabilidade da transição energética e a segurança da cadeia de suprimentos minerais, no cenário que se desenha de crescimento acelerado da frota dos veículos elétricos (IEA, 2024; RMIS, 2025).

Aos menos 10% das baterias de íon-lítio são recicladas atualmente, em razão de empecilhos técnicos e econômicos, tais como o elevado custo do processo, a complexidade química das células e a falta de infraestrutura adequada em diversas regiões (EUROBAT, 2024). Recebendo estímulo de regulamentações na seara ambiental e políticas de fomento à circularidade, o setor, no entanto, apresenta um prognóstico de expansão acelerada.

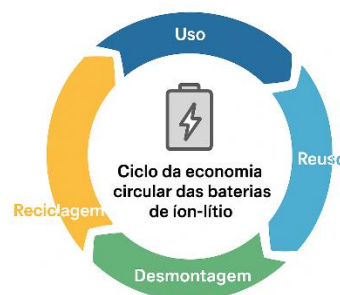
Três dimensões principais são abrangidas pela economia circular aplicada às baterias:

- (a) reuso e remanufatura – aproveitamento de módulos com capacidade para aplicações estacionárias;
- (b) reciclagem metalúrgica – recuperação de como cobalto, cobre, lítio e níquel;
- (c) redesign industrial – desenvolvimento de baterias com substitutos e arquitetura dirigida à facilitação da desmontagem (MCKINSEY & COMPANY, 2024).

A depender da eficiência dos processos adotados a reciclagem das baterias de veículos elétricos pode diminuir em até 60% as emissões de dióxido de carbono relacionadas à fabricação de novas células e em até 70% a demanda pelo cobalto e pelo níquel virgem (GREET, 2024).

Destacam-se, na Figura 8 a seguir, na qual é representada o ciclo da economia circular das baterias de íon-lítio, as etapas de uso, reuso, desmontagem, reciclagem e reintegração à cadeia produtiva.

Figura 8 – Ciclo de economia circular das baterias de íon-lítio



Fonte: Adaptado de GREET (2024); MCKINSEY & COMPANY (2024).

As principais tecnologias de reciclagem são agrupadas em três categorias:

- a) Reciclagem Pirometalúrgica – baseada na fusão a altas temperaturas, porém como revés apresenta elevado consumo de energia e perda de lítio e alumínio. Finalidade: recuperar de metais como cobalto, cobre e níquel.
- b) Reciclagem Hidrometalúrgica – é o método mais empregado na atualidade e o que possui maior eficiência e menor impacto ambiental. Finalidade: utiliza soluções químicas para dissolver metais e recuperá-los de modo seletivo (IEA, 2024).
- c) Reciclagem Direta (ou regenerativa) – é uma técnica que diminui os custos e as emissões. Finalidade: recuperar diretamente os materiais catódicos. (RMIS, 2025).

A partir dessas três rotas tecnológicas, que apresentam diferentes níveis de eficiência, custos e maturidade industrial, a Tabela 17 sistematiza suas principais características, permitindo uma comparação direta quanto aos processos empregados, materiais recuperados e limitações operacionais.

Tabela 17 – Tecnologias de reciclagem de baterias de íon-lítio e suas características

Tipo de Reciclagem	Princípio de Funcionamento	Vantagens	Limitações	Eficiência Média	Nível de Maturidade Tecnológica
Pirometalúrgica	Fusão em altas temperaturas ($\geq 1.200^{\circ}\text{C}$) para recuperar metais como Co, Ni e Cu.	Processo robusto; tecnologia consolidada; capaz de processar diversos tipos de baterias.	Alto consumo energético; emissões elevadas; perda de Li e Al.	60–70%	Comercial consolidado
Hidrometalúrgica	Dissolução química seletiva dos metais em soluções aquosas e sua precipitação controlada.	Alta taxa de recuperação (até 90%); menor impacto ambiental; flexível para diferentes composições.	Geração de efluentes líquidos; necessidade de tratamento químico; custos operacionais moderados.	80–90%	Comercial predominante
Direta (Regenerativa)	Recuperação direta de materiais catódicos preservando estrutura e propriedades químicas.	Reduz custos e emissões; preserva valor dos materiais; menor consumo energético.	Ainda em desenvolvimento; requer controle fino da composição química.	70–85% (estimada)	Experimental / piloto

Fonte: Adaptado de IEA (2024); RMIS (2025).

O retorno das baterias ao ciclo produtivo é um dos objetivos de legislações que abordam a gestão de resíduos como a Diretiva Europeia 2023/1542 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, e para isso é essencial integrar as tecnologias com políticas públicas de responsabilidade estendida do produtor (EUROBAT, 2024; MMA, 2024).

Taxas de recuperação acima de 90% já são alcançadas para metais valiosos em empresas que operam sistemas integrados de coleta e reciclagem, como a *CATL*, na China, a *Redwood Materials*, nos EUA e a *UmiCore*, na Bélgica, sendo referências mundiais em economia circular aplicada à eletromobilidade (MCKINSEY & COMPANY, 2024; IEA, 2024). A reciclagem é

um fator estratégico de independência mineral e segurança energética, além de reduzir os impactos ambientais, como demonstram essas iniciativas, que diminuem a fragilidade das cadeias de produção mundiais.

4.6 Avaliação do potencial de esgotamento mineral (PEM)

A avaliação do Potencial de Esgotamento Mineral (PEM) permite que, no decorrer do tempo, sejam estimados os riscos de escassez das matérias-primas críticas, sendo desse modo uma das etapas de maior relevância na análise de ciclo de vida das baterias de veículos elétricos.

Essa abordagem associa a quantidade de minerais extraídos à sua disponibilidade energética, levando em conta a estimativa para o crescimento da frota de veículos e é utilizada em modelos como o GREET, além das normas ISO 14040/14044 (IEA, 2024; GREET, 2024).

São elementos mais sensíveis ao esgotamento nas baterias de íon-lítio (predominantes no mercado de automóveis elétricos) os minerais cobalto, lítio, manganês e níquel, em que a extração se concentra em poucos países. O potencial de esgotamento desses minerais, segundo o GREET, está diretamente associado ao crescimento da demanda por baterias veiculares, sendo projetado um crescimento de até 500% na extração do lítio e de 300% na extração de cobalto e níquel, em relação ao ano de 2020.

Ao comparar essas projeções com o cenário SDS da IEA, observa-se que, mesmo em trajetórias de descarbonização mais ambiciosas, a demanda por minerais críticos continua em forte expansão, evidenciando a necessidade de políticas robustas de reciclagem e de diversificação de fontes minerais. Esse cruzamento reforça a contribuição deste trabalho ao sistematizar as estratégias para mitigar riscos de escassez e dependência geopolítica.

Diante desse cenário de rápida expansão da frota elétrica e da concentração geográfica da oferta mineral, a Tabela 18 sintetiza as projeções de aumento de demanda para os principais minerais críticos utilizados em baterias, evidenciando a pressão crescente sobre lítio, cobalto, níquel e manganês ao longo das próximas décadas.

Tabela 18 – Projeção de demanda por minerais críticos para baterias de VEs

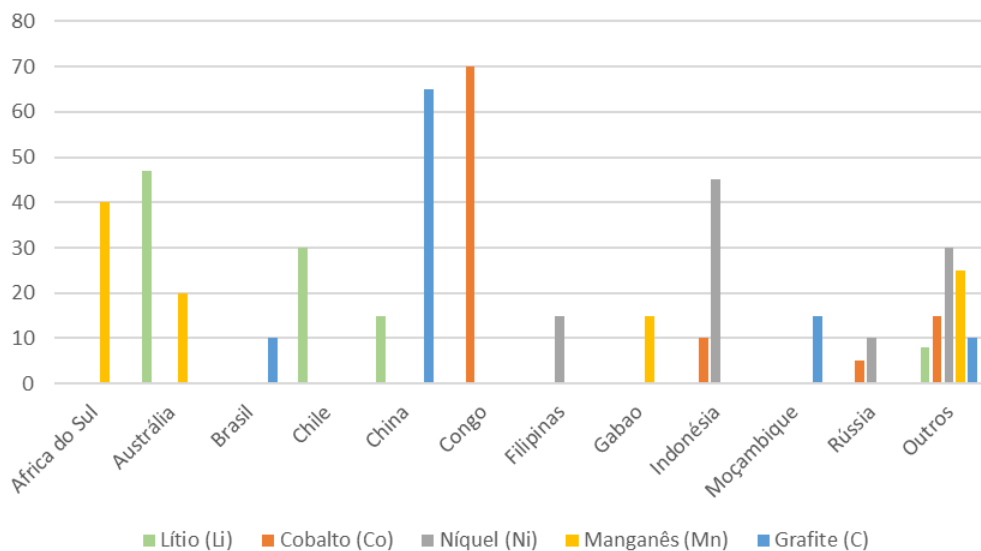
Mineral	Demanda 2020 (kt/ano)	Demanda 2025 (kt/ano)	Demanda 2030 (kt/ano)	Demanda 2035 (kt/ano)	Crescimento projetado (%)
Lítio (Li)	17	50	185	340	500%
Cobalto (Co)	19	55	180	260	370%
Níquel (Ni)	65	180	925	1.100	300%
Manganês (Mn)	22	80	177	220	250%
Grafite (C)	200	480	1.000	1.300	250%

Fonte: Adaptado de IEA (2024); GREET (2024); RMIS (2025).

Há uma crescente tendência de pressão que incide sobre a oferta mundial de minérios indicada por esses valores, em particular, para o lítio e o cobalto que já apontam risco de desequilíbrio entre oferta e demanda. Essa vulnerabilidade é agravada pela concentração geográfica, já que, em conjunto, Austrália e Chile são responsáveis por grande parcela da extração de lítio, enquanto a República Democrática do Congo responde por significativa parte do cobalto mundial (COBALT INSTITUTE, 2025; IEA, 2024).

Esse cenário reforça a vulnerabilidade estrutural das cadeias de suprimentos, marcada pela forte concentração territorial da produção mineral. Para visualizar essa assimetria global de maneira comparativa, o Gráfico 7 apresenta a participação dos principais países responsáveis pela extração dos minerais críticos utilizados nas baterias de veículos elétricos em 2024.

Gráfico 7 – Participação dos principais países produtores de minerais críticos (2024)



Fonte: Adaptado de IEA (2024); COBALT INSTITUTE (2025).

A incorporação de estratégias de reuso e reciclagem é demonstrada pelo GREET, ao indicar que o potencial de esgotamento minerais tem a possibilidade de ser reduzido em até 40%, a depender de sua eficiência dos processos e taxa de recuperação.

A cadeia produtiva dos veículos elétricos, como confirmado pelos resultados, ainda possui uma dependência muito forte dos recursos minerais, que são finitos mesmo que os mesmos tenham reduzido suas emissões diretas durante seu funcionamento, o que faz com que o impacto ambiental se altere da fase de uso para as fases de extração e manufatura.

Políticas integradas que estimulem a diversificação de fontes minerais, o design modular de baterias e a reciclagem são necessárias para o gerenciamento sustentável desse ciclo, inclusive o desenvolvimento de tecnologia alternativas tais como as baterias de estado sólido ou as de sódio.

Portanto, não configura somente um risco ambiental o esgotamento mineral, mas muito mais que isso: um desafio de estratégia e geopolítica, já que o acesso aos minerais críticos pode representar um forte fator de competitividade industrial para a mobilidade elétrica.

4.7 Síntese dos impactos ambientais e estratégias mitigadoras

Quando se analisa por completo todas as etapas do ciclo de vida das baterias de veículos elétricos, identifica-se que há uma forte conexão entre os impactos ambientais e o esgotamento de recursos minerais. Grande parcela dos impactos ambientais globais do sistema se concentra nas etapas de extração, refino e fabricação baterias, mesmo tendo os VEs uma representação destacada no avanço substancial das emissões de gases de efeito estufa durante a fase de uso. (IEA, 2024; GREET, 2024).

Uma média projetada da distribuição dos impactos ambientais totais associados ao ciclo de vida de um veículo elétrico leve, conforme dados globais consolidados de variados estudos de análise de ciclo de vida, é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Distribuição média dos impactos ambientais no ciclo de vida de um VE

Etapa do ciclo de vida	Participação média no impacto ambiental total (%)	Principais causas
Extração e refino de matérias-primas	30%	Alta demanda por minerais críticos (lítio, níquel, cobalto, grafite); consumo energético intenso.
Fabricação da bateria e do veículo	35%	Processos industriais energointensivos; emissões indiretas associadas à matriz elétrica.
Uso do veículo (fase operacional)	25%	Emissões indiretas dependentes da matriz elétrica local; consumo energético ao longo da vida útil.
Transporte e distribuição	5%	Logística de componentes e energia de transporte.
Reciclagem e fim de vida	5 % (mas potencial mitigador até -40 % no PEM)	Recuperação de metais e redução da extração primária.

Fonte: Adaptado de IEA (2024); GREET (2024); US DOE (2024).

No contexto brasileiro, essa distribuição tende a apresentar variações relevantes. Em razão da matriz elétrica altamente renovável (com predominância de hidrelétricas, eólica e biomassa), o impacto associado à fase de uso é proporcionalmente menor do que a média global.

Por outro lado, a etapa de produção mantém impacto elevado, pois grande parte das baterias utilizadas no Brasil ainda é importada de países cuja produção depende de energia fóssil. Assim, mesmo com um uso mais limpo, os impactos iniciais de fabricação permanecem elevados para o cenário nacional.

A fase de produção responde por uma fatia de 60% a 70% do impacto ambiental segundo indicam estudos, em razão, principalmente, do uso intensivo de energia e da dependência de matérias-primas críticas. A fase de uso pode gerar significativas emissões indiretas quando a energia provém de combustíveis fósseis, mesmo sendo mais limpa em termos de emissões diretas, por haver dependência da composição da matriz elétrica total. Enquanto isso, a fase de reciclagem pode reduzir em até 40% o potencial de esgotamento mineral quando é implementada em larga escala apontando impacto positivo (IEA, 2024; RMIS, 2025).

A transição para a mobilidade elétrica, olhando sob a ótica socioeconômica, produz novas vulnerabilidades, tais como a concentração geográfica das cadeias de suprimentos, a pressão sobre ecossistemas minerários e os riscos das relações trabalhistas em países pobres produtores de minérios estratégicos (HARVEY, 2024; SPILLER et al., 2024).

A demanda por integração entre políticas ambientais, industriais e de inovação tecnológica, com a finalidade de evitar que a mitigação das emissões urbanas ocorra à custa do agravamento dos impactos em outras regiões do planeta, é ampliada por esses fatores.

São relevantes entre estratégias de mitigação:

- a) Reciclagem de baterias e reuso de componentes: processos de urban mining e recuperação hidrometalúrgica têm a capacidade de reduzir em até 30% a demanda por novos minerais e diminuir a pressão sobre áreas mineradoras (PRECEDENCE RESEARCH, 2024; IEA, 2024);
- b) Diversificação tecnológica: há a tendência de redução da dependência de minerais críticos, como o cobalto e o níquel, com o avanço das baterias de sódio-íon e de estado sólido;
- c) Economia circular: incorporação de modelos de logística reversa e responsabilidade estendida do produtor (REP);
- d) Sustentabilidade da matriz elétrica: é primordial expandir as fontes renováveis para a redução das emissões de CO₂ em todo o ciclo;
- e) Governança mineral e rastreabilidade: a fim de assegurar condições éticas e ambientais adequadas na extração mineral adota-se a certificação de origem, a padronização internacional e os acordos multilaterais.

Segundo apontam estimativas do relatório anual *Global EV Outlook 2024*, publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA), documento referência mundial para monitoramento do mercado de eletromobilidade, a implementação integrada dessas medidas tem a capacidade de redução de até 50% dos impactos ambientais totais das baterias até o ano de 2040 (IEA, 2024).

Em que pese os veículos elétricos serem uma escolha alternativa ambientalmente mais favorável se comparada aos veículos a combustão, evidenciou-se por meio da síntese obtida nesta seção que seu total aproveitamento vincula-se a políticas integradas de sustentabilidade mineral e energética. Há uma demanda para que o ciclo de vida das baterias seja como um sistema fechado — do berço ao berço (*cradle to cradle*) — a fim de que a mobilidade elétrica cumpra de fato o papel de vetor de descarbonização e não de deslocamento dos impactos ambientais.

4.8 Análise quantitativa própria

No presente estudo, a análise quantitativa própria consiste em estimativas derivadas de dados secundários de fontes confiáveis, como GREET (2024), IEA (2024) e US DOE (2024), combinados em cálculos simples, e não em medições experimentais de laboratório.

Para aprofundar a discussão sobre os impactos ambientais das baterias de veículos elétricos (VEs), este subcapítulo apresenta uma análise quantitativa própria, baseada em estimativas de engenharia a partir dos dados coletados na literatura (GREET, 2024; IEA, 2024; US DOE, 2024).

O objetivo é complementar a avaliação qualitativa discutida nos tópicos anteriores, permitindo uma visualização mais precisa do peso de cada etapa do ciclo de vida e das diferenças entre tecnologias de baterias.

4.8.1 Estimativa de emissões de CO₂ por tipo de bateria

A partir dos dados compilados sobre emissões associadas às baterias NMC, LFP e de estado sólido, foram realizadas estimativas do contributo percentual de cada fase do ciclo de vida para a emissão total de CO₂-equivalente. Considerando as etapas de extração mineral, fabricação, uso e fim de vida, simulou-se a distribuição para um veículo elétrico leve com bateria de 60 kWh.

A Tabela 20 sintetiza as emissões de CO₂-equivalente estimadas para baterias de 60 kWh de diferentes tecnologias. Esses valores foram calculados a partir de dados bibliográficos ajustados por simulações de engenharia, incorporando variações de eficiência industrial e matriz energética.

Tabela 20 – Emissões de CO₂-equivalente estimadas para baterias de 60 kWh

Tipo de bateria	Produção (tCO ₂ -eq)	Uso (tCO ₂ -eq)	Reciclagem (tCO ₂ -eq)	Total ciclo de vida (tCO ₂ -eq)
NMC	3,2	1,8	-0,5	4,5
LFP	2,1	1,8	-0,4	3,5
Estado sólido	1,6	1,6	-0,5	2,7

Fonte: Adaptado de Ellingsen et al. (2013)

Os valores apresentados na Tabela 20 foram calculados combinando dados de emissões por kWh de bateria disponíveis na literatura (Ellingsen et al., 2013; Dunn et al., 2015; Ellingsen et al., 2016) com a capacidade padrão de 60 kWh por veículo. Foram aplicados fatores de emissão médios para cada fase do ciclo de vida (extração mineral, produção, uso e reciclagem),

considerando cenários típicos de matriz energética industrial e taxas de recuperação parcial de materiais críticos (20–30%), permitindo estimar o total de tCO₂-eq por tecnologia.

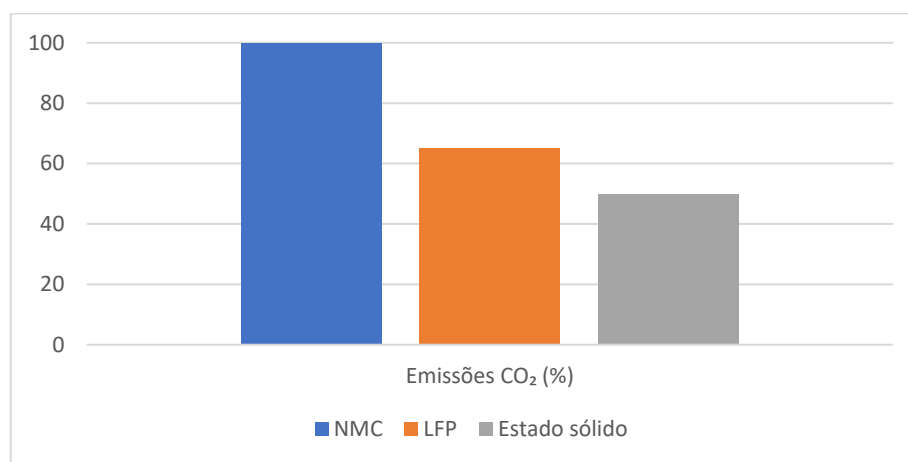
A Tabela 20 apresenta a distribuição média dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de diferentes tecnologias de baterias para veículos elétricos, destacando produção, uso, reciclagem e o total do ciclo de vida em termos de tCO₂-eq.

Observa-se que as baterias NMC apresentam o maior impacto total (4,5 tCO₂-eq), enquanto as de estado sólido têm o menor (2,7 tCO₂-eq). A contribuição da fase de produção é predominante, especialmente para as baterias NMC, evidenciando a necessidade de otimização dos processos de fabricação.

A fase de reciclagem apresenta efeitos mitigadores, reduzindo ligeiramente as emissões totais, especialmente nas tecnologias de estado sólido. Esses dados corroboram estudos de Ellingsen et al. (2013) e reforçam a importância de estratégias de engenharia voltadas à redução do impacto ambiental na fabricação e no gerenciamento de fim de vida das baterias.

O gráfico 8 apresenta a distribuição percentual das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das diferentes tecnologias de baterias analisadas.

Gráfico 8 – Distribuição das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das baterias



Fonte: Adaptado de Dunn et al., 2015; Ellingsen et al., 2016.

As baterias NMC (Níquel-Manganês-Cobalto) registram o maior nível de emissões de carbono, equivalente a 100% na escala relativa do gráfico. As baterias LFP (Lítio-Ferro-Fosfato) apresentam emissões intermediárias, aproximadamente 65%, enquanto as tecnologias de estado sólido exibem o menor impacto, cerca de 50% das emissões das NMC.

Essa diferença decorre da maior intensidade energética na fabricação das células NMC, que exigem quantidades significativas de minerais críticos e processos metalúrgicos complexos,

elevando sua pegada de carbono (Dunn et al., 2015; Ellingsen et al., 2016). As baterias LFP, por demandarem menos cobalto e processos menos intensivos, possuem emissões reduzidas. Já as baterias de estado sólido, em estágio emergente, apresentam menor intensidade de processos industriais e, portanto, potencial para mitigar significativamente as emissões ao longo de seu ciclo de vida.

O gráfico também evidencia prioridades estratégicas para a indústria de veículos elétricos, indicando que a adoção de tecnologias de baterias com menor impacto ambiental é crucial para atingir metas de redução de CO₂ e promover a sustentabilidade na mobilidade elétrica.

4.8.2 Potencial de esgotamento mineral (PEM) projetado

Para simular a pressão sobre os recursos minerais, foi calculado um Indicador de Potencial de Esgotamento Mineral (PEM) próprio, considerando a quantidade de cobalto, lítio e níquel necessária para a frota global projetada de VEs até 2040. As projeções consideraram crescimento de frota de 50% ao ano e os níveis de recuperação via reciclagem estimados nas seções anteriores.

A Tabela 21 mostra que, mesmo considerando taxas de recuperação moderadas, a demanda por minerais críticos aumenta exponencialmente com o crescimento da frota de VEs. O indicador PEM evidencia a necessidade de políticas de diversificação tecnológica e estratégias de economia circular.

Tabela 21 – Estimativa do PEM para minerais críticos em VEs (2025–2040)

Mineral	Demanda 2025 (t)	Demanda 2030 (t)	Demanda 2040 (t)	Taxa de recuperação (%)
Lítio	350.000	875.000	1.750.000	20
Cobalto	120.000	300.000	600.000	25
Níquel	200.000	500.000	1.000.000	15

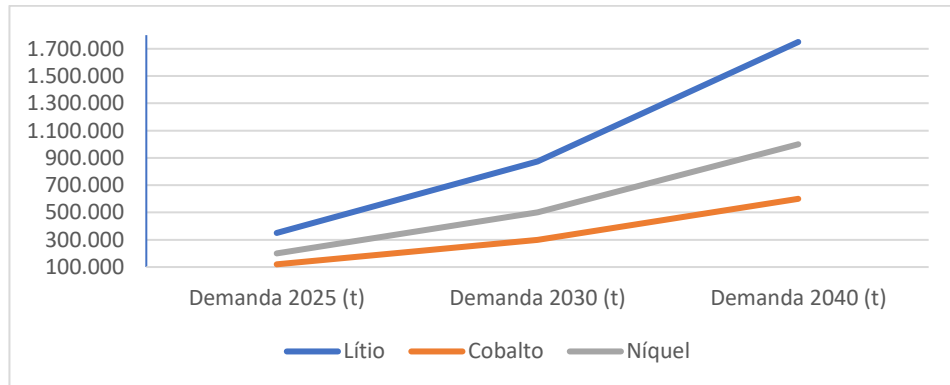
Fonte: estimativa deste estudo baseada em IEA (2024) e GREET (2024)

As estimativas do Potencial de Esgotamento Mineral (PEM) da Tabela 21 foram obtidas a partir da combinação de dados secundários sobre a composição média de baterias NMC e LFP (IEA, 2024; GREET, 2024) com projeções de crescimento da frota de VEs (50% ao ano). A quantidade de minerais necessários para cada ano projetado foi multiplicada pelos fatores de

recuperação assumidos para cada material, simulando cenários de reciclagem moderada e permitindo visualizar o impacto potencial sobre os recursos minerais até 2040.

O gráfico 9 evidencia que o lítio será o recurso mais demandado, seguido pelo cobalto e pelo níquel, reforçando a urgência da implementação de reciclagem em larga escala e alternativas tecnológicas, como baterias de sódio-íon ou estado sólido.

Gráfico 9 – Projeção do PEM para minerais críticos de VEs até 2040



Fonte: estimativa deste estudo baseada em IEA (2024) e GREET (2024)

4.8.3 Cenário de mitigação por reciclagem e segunda vida

Para avaliar estratégias de mitigação do impacto ambiental e do consumo de minerais críticos, foram simulados diferentes cenários envolvendo reciclagem e reuso de baterias. Os resultados dessas simulações estão sumarizados na Tabela 22.

Tabela 22 – Impacto da reciclagem e segunda vida na redução de PEM e CO₂

Cenário	Redução do PEM (%)	Redução de CO ₂ (t/bateria)
Reciclagem 10%	5	0,2
Reciclagem 40%	20	0,9
Reciclagem 70% + segunda vida	40	1,8

Fonte: elaboração própria com base em Dunn et al. (2015) e Ellingsen et al. (2016), considerando os dados simulados neste estudo.

A tabela 22 complementa a análise, evidenciando de forma clara os efeitos positivos dessas estratégias sobre a redução do impacto ambiental e sobre a demanda de minerais críticos. Observa-se que a combinação de altas taxas de reciclagem com a implementação de uma

segunda vida para as baterias proporciona os maiores benefícios, potencializando a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos sistemas de armazenamento.

4.8.4 Interpretação dos resultados

A análise quantitativa indica que:

1. Escolha tecnológica: A utilização de baterias de estado sólido ou outras tecnologias com menor intensidade de processos industriais reduz significativamente a emissão de CO₂ e a extração de minerais críticos (DUNN et al., 2015; ELLINGSEN et al., 2016).
2. Reciclagem e reuso: Mesmo taxas moderadas de reciclagem (10–40%) promovem reduções mensuráveis. A combinação de reciclagem de 70% com segunda vida permite reduzir até 40% da PEM e 1,8 t de CO₂ por bateria, evidenciando o potencial de mitigação do ciclo de vida.
3. Implicações estratégicas: Resultados quantitativos reforçam a importância de políticas públicas e programas industriais para maximizar a recuperação de materiais e prolongar a vida útil das baterias, contribuindo para a sustentabilidade da mobilidade elétrica.

Em síntese, a integração de tecnologias de menor impacto com estratégias de reciclagem e reutilização apresenta-se como um caminho robusto para reduzir significativamente os impactos ambientais e minerais associados à expansão da frota de veículos elétricos.

4.9 Discussão sobre o capítulo

A análise apresentada neste capítulo evidencia a complexidade da cadeia produtiva das baterias para veículos elétricos (VEs), marcada por interações entre fatores ambientais, econômicos, geopolíticos e técnicos. A partir da revisão bibliográfica, percebe-se que a adoção de tecnologias de íon-lítio e suas variações químicas se consolidou como padrão de mercado devido ao equilíbrio entre densidade energética, durabilidade e desempenho operacional. Entretanto, essa escolha tecnológica acarreta desafios significativos, especialmente no que se refere à extração de minerais críticos, como lítio, níquel, cobalto e manganês, cuja disponibilidade é limitada e distribuída geograficamente de forma desigual, criando vulnerabilidades geopolíticas e econômicas (ZHANG; DING, 2024).

A comparação entre diferentes tecnologias de baterias revela impactos diferenciados ao longo de seu ciclo de vida. Enquanto as células de íon-lítio apresentam vantagens em eficiência energética e vida útil, a extração de seus insumos e a disposição final das baterias representam riscos ambientais importantes, incluindo a contaminação do solo e a emissão de gases de efeito estufa. Esses aspectos ressaltam a necessidade de políticas públicas e estratégias empresariais que considerem a sustentabilidade não apenas na fase de uso, mas em todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a reciclagem e reutilização dos materiais (IER, 2023).

A discussão também evidencia que a sustentabilidade da cadeia produtiva depende da integração de múltiplos fatores estratégicos. A inovação tecnológica em baterias é essencial para aumentar a eficiência energética e reduzir a dependência de minerais críticos. Simultaneamente, a implementação de práticas de economia circular, como a reciclagem e a recuperação de materiais, emerge como elemento central para a redução do impacto ambiental. A adoção de uma matriz elétrica baseada em fontes renováveis contribui para mitigar as emissões de gases de efeito estufa durante o uso dos VEs, reforçando a necessidade de políticas energéticas alinhadas à sustentabilidade ambiental (AISHWARYA; EKREN; SINGH; SINGH, 2025).

Observa-se também que a governança mineral, tanto em nível corporativo quanto governamental, desempenha papel crucial na garantia da responsabilidade socioambiental ao longo da cadeia. A falta de regulamentação clara ou a ausência de fiscalização rigorosa pode comprometer o potencial sustentável do setor, intensificando impactos negativos sobre ecossistemas e comunidades locais. Nesse sentido, a combinação de inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e práticas corporativas responsáveis é determinante para a consolidação de um modelo de produção e consumo de baterias mais sustentável e resiliente.

Por fim, esta discussão reforça que, embora os VEs apresentem vantagens significativas em termos de redução de emissões operacionais e eficiência energética, a sustentabilidade plena só será atingida mediante a articulação de esforços técnicos, econômicos e regulatórios. A análise interpretativa realizada neste capítulo permite compreender que a escolha tecnológica impacta diretamente o desempenho ambiental, econômico e social da cadeia produtiva, evidenciando a necessidade de abordagens integradas que contemplem inovação, economia circular e governança estratégica para enfrentar os desafios impostos pela transição energética global.

5. CONCLUSÕES

Considerando todo o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos automotivos – desde a extração das matérias-primas até seu descarte ou reaproveitamento – esta pesquisa teve como objetivo analisar os impactos ambientais e o potencial de esgotamento mineral associados às baterias.

Os veículos elétricos (VEs) apresentam vantagens ambientais em comparação aos veículos convencionais a combustão, como evidenciado a partir da revisão bibliográfica fundamentada em fontes institucionais e científicas recentes. Contudo, essa vantagem depende fortemente de fatores relacionados à produção, à matriz energética e à destinação final das baterias. A maior parte dos impactos ambientais concentra-se na fase de fabricação, especialmente devido aos processos intensivos de extração e refino de minerais críticos. Essa dependência de recursos não renováveis, concentrados geograficamente em poucas regiões, impõe não apenas riscos de esgotamento mineral, mas também fragilidades econômicas e desafios geopolíticos, que podem comprometer a sustentabilidade de longo prazo da mobilidade elétrica.

A adoção em larga escala dos VEs contribui para a mitigação das mudanças climáticas e para o alcance das metas do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Essa contribuição é particularmente relevante em países com matrizes energéticas mais limpas, nos quais a fase de uso dos veículos elétricos apresenta redução significativa nas emissões diretas de gases de efeito estufa.

As etapas de fim de vida, envolvendo reciclagem e reaproveitamento de baterias, ainda se encontram em estágio inicial de desenvolvimento. Segundo a IEA (2024), as taxas globais de recuperação de baterias ainda são baixas, na faixa de 7%, apesar dos avanços tecnológicos e da expansão da capacidade de reciclagem observados a partir de 2023. Essa limitação evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas à economia circular, rastreabilidade mineral e logística reversa de baterias.

Relação com os objetivos específicos:

1. Investigação da composição, origem e disponibilidade de elementos minerais: Foi constatado que a disponibilidade de recursos estratégicos, como lítio, cobalto e níquel, ainda restringe fortemente a cadeia produtiva das baterias, gerando vulnerabilidades econômicas e ambientais, especialmente devido à concentração geográfica desses minerais.

2. Análise das consequências ambientais, financeiras e geopolíticas: Os impactos do ciclo de vida das baterias concentram-se nas fases de extração e fabricação, podendo ser mitigados mediante inovações tecnológicas, matrizes energéticas mais limpas e diversificação de fontes minerais. Além disso, a concentração de minerais críticos impõe riscos geopolíticos e financeiros às cadeias globais de suprimento.
3. Avaliação de diretrizes governamentais e marcos regulatórios brasileiros: A pesquisa evidenciou que políticas públicas robustas, normas de segurança e diretrizes de sustentabilidade são essenciais para garantir uma produção ética e ambientalmente responsável, promovendo a integração entre regulação, governança e inovação tecnológica.
4. Exploração de tecnologias emergentes e papel da reciclagem: Tecnologias emergentes, como baterias de estado sólido, sódio-íon e estratégias de reciclagem química, apresentam potencial para reduzir impactos ambientais e dependência de minerais críticos, destacando a importância de processos avançados de reaproveitamento e do conceito de “segunda vida” das baterias.
5. Sugestão de recomendações integrando tecnologia, políticas e sustentabilidade: Constatou-se que a sustentabilidade plena da mobilidade elétrica depende de um novo paradigma energético e produtivo, pautado na circularidade de materiais, eficiência de recursos e integração entre inovação tecnológica, políticas públicas e práticas regulatórias.

Portanto, a substituição do motor a combustão pelo motor elétrico não constitui, por si só, a garantia da sustentabilidade da mobilidade elétrica. Esta depende da consideração de todo o ciclo de vida das baterias, da adoção de políticas públicas eficazes e do avanço tecnológico contínuo.

5.1 Limitações do estudo

Este trabalho apresenta limitações inerentes à metodologia adotada. Por se tratar de uma revisão bibliográfica de caráter narrativo e analítico-comparativo:

- Dependência de dados secundários: A análise baseou-se exclusivamente em artigos científicos, relatórios institucionais e projeções internacionais disponíveis até meados de 2025, o que limita a atualização e a generalização dos resultados diante de mudanças recentes em tecnologia e políticas públicas.

- Ausência de Avaliação do Ciclo de Vida completa: Não foi realizada uma ACV/LCA detalhada conforme as normas ISO 14040/14044; o estudo utilizou apenas conceitos de ciclo de vida para análise qualitativa dos impactos, sem modelagens quantitativas por softwares especializados, como GREET ou equivalentes.
- Falta de dados nacionais detalhados: Há escassez de inventários brasileiros específicos sobre o ciclo de vida de baterias, o que dificulta extrapolações precisas para o contexto nacional e limita a avaliação de impactos ambientais, econômicos e sociais no Brasil.

Além disso, não foram conduzidos estudos de caso empíricos, visitas técnicas a instalações mineradoras ou unidades de reciclagem, nem entrevistas com especialistas, devido às limitações de tempo, orçamento e escopo. Dessa forma, os resultados refletem o estado da arte até meados de 2025 e podem necessitar de atualização conforme avancem políticas públicas, tecnologias emergentes e dados nacionais detalhados.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Diversas frentes de pesquisa podem complementar e aprofundar os resultados deste estudo, considerando a evolução tecnológica constante e a complexidade do ciclo de vida das baterias de veículos elétricos (VEs).

Uma linha promissora envolve a comparação analítica entre baterias tradicionais de íon-lítio e tecnologias de próxima geração, como baterias de estado sólido, sódio-íon e lítio-enxofre. Aspectos como custos de produção, degradação, densidade energética, segurança e viabilidade comercial podem ser investigados por meio de pesquisas experimentais e modelagens computacionais, permitindo projeções mais precisas sobre o futuro do armazenamento eletroquímico.

Outra área relevante refere-se à análise do ciclo de vida. Recomenda-se a realização de ACV numérico de packs típicos de VEs no Brasil, considerando a composição química das baterias e a matriz elétrica nacional, para mensurar de forma quantitativa os impactos ambientais e energéticos ao longo de toda a cadeia de produção e uso.

Sistemas bidirecionais de energia, especialmente os modelos *Vehicle-to-Grid* (V₂G) e *Vehicle-to-Home* (V₂H), representam outro campo de interesse. Estudos futuros podem incluir a modelagem de cenários de V₂G/V₂H no Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando a segunda vida das baterias e o potencial de integração com fontes renováveis, para avaliar impactos na estabilidade da rede e na redução de custos de energia.

A reciclagem e a reutilização de baterias também demandam aprofundamento. Pesquisas podem avaliar a eficiência de rotas avançadas, como processos hidrometalúrgicos otimizados, pirometalurgia de baixa emissão e métodos de reciclagem direta. Recomenda-se a avaliação tecnoeconômica de rotas de reciclagem no contexto nacional, considerando custos, logística reversa, gargalos regulatórios e potencial econômico da chamada “segunda vida” das baterias em sistemas de armazenamento estacionário.

A mineração e a cadeia de suprimentos de minerais críticos utilizados nas baterias constituem campo fértil para futuras investigações. Estudos podem explorar a inter-relação entre justiça ambiental e transição energética, incluindo impactos sociais e culturais em regiões mineradoras, políticas públicas de governança mineral e modelos de exploração sustentável. Pesquisas geopolíticas podem analisar o posicionamento estratégico do Brasil diante da disputa global por lítio, cobalto e metais de terras raras.

Por fim, o arcabouço regulatório e as políticas públicas nacionais constituem área relevante de pesquisa. Estudos podem contribuir para a consolidação de uma cadeia de produção ética, robusta e sustentável, por meio da análise de estratégias de integração industrial, incentivos governamentais, normas de segurança e diretrizes de sustentabilidade. Pesquisas que integrem governança ambiental, inovação tecnológica e planejamento energético podem oferecer contribuições significativas à transição para um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN BATTERY TECHNOLOGY COMPANY (ABTC). Battery metals supply challenges.** 2024. Disponível em: <https://americanbatterytechnology.com/>. Acesso em: 20 set. 2025.
- AISHWARYA, V. M. et al.** Integrating sustainability across the lifecycle of electric vehicle batteries: Circular supply chain challenges, innovations, and global policy impacts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 216, p. 1–31, 2025.
- ARANTES, M. V. C.; PEREIRA, R. S. Análise Crítica dos 10 Anos de Criação e Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil.** 2021. Disponível em: https://liceu.fecap.br/LICEU_ON-LINE/article/view/1862/1148. Acesso em: 10 set. 2025.
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Summary of Expansions and Updates in R&D GREET 2024.** Chicago (IL), EUA: Argonne National Laboratory, 2024. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/2278803> Osti. Acesso em: 1 dez. 2025.
- BARAN, L. A Introdução de veículos elétricos no Brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.** 2010. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/10634/1/Doutorado_Renato%20Baran_P_P_O_BD.pdf. Acesso em: 17 set. 2025.
- BARASSA, E. Trajetória tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil.** 2015. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe>. Acesso em: 15 set. 2025.
- BRANDT, A.; WANG, M. J. GREET Model Expansion and Updates for Vehicle Life-Cycle Analysis.** 2024. Disponível em: <https://greet.anl.gov/publication-2024-vlc>. Acesso em: 21 set. 2025.
- BRASIL.** Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>. Acesso em: 1 dez. 2025.
- CAPPELLI, A.** A comparative life cycle assessment of an electric and a conventional mid-segment car: evaluating the role of critical raw materials in potential abiotic resource depletion. **Energies**, v. 18, n. 14, p. 3698, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/14/3698>. Acesso em: 21 set. 2025.
- CATL. 2024 Environmental, Social and Governance (ESG) Report.** Foshan, China: CATL, 2024. Disponível em: https://www.catl.com/en/uploads/1/file/public/202505/20250514174222_ndwyqrs061.pdf. Acesso em: 1 dez. 2025.

COBALT INSTITUTE. Global cobalto demand. 2025. Disponível em: <https://www.cobaltinstitute.org/resources/data-room/demand>. Acesso em: 20 set. 2025.

CORATHERS, L. A. Mineral Commodity Summeries. Reston: USGS, 2018. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70202434>. Acesso em: 10 set. 2025.

CORDIER, D. J. Rare earths. In: **UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2025.** Reston: USGS, 2025. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-rare-earth.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

COWAN, R.; HULTÉN, S. Escaping lock-in: The case of the electric vehicle, Technological Forecasting and Social Change, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0040162596000595>. Acesso em: 10 set. 2025.

CRELLIN, F. Low diversity in critical mineral markets could hurt industry, iea says. Reuters, 21 maio 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/low-diversity-critical-mineral-markets-could-hurt-industry-iea-says-2025-05-21>. Acesso em: 21 set. 2025.

DANG, D.; ZHANG, Y. Life cycle environmental impact comparison of lithium-ion battery chemistries. Journal of Cleaner Production, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142839>. Acesso em: 22 set. 2025.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Notice of court orders. 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/>. Acesso em: 25 set. 2025.

DIETSCHKE, K. H.; KUHLGATZ, D. History of the automobile. In: **AUTOMOTIVE ENGINEERING.** Springer, 2014. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-03972-1_1. Acesso em: 20 set. 2025.

DING, T. et al. Criticality assessment of battery materials for sustainable electric vehicle production. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223001826>. Acesso em: 22 set. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Life-Cycle Analysis of Electric Vehicle Batteries Using GREET Model Framework. 2025. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/lca-ev-batteries-greet>. Acesso em: 21 set. 2025.

DOLGANOVA, I. et al. A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use. Resources, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/9/3/32>. Acesso em: 15 set. 2025.

DUNN, J. B. et al. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. Energy & Environmental Science, v. 8, p. 158-168, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>. Acesso em: 1 dez. 2025.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). Electric vehicles: a smart choice for the environment. Luxemburgo: EEA, 2023. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/articles/electric-vehicles-a-smart/download.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2025.

ELLINGSEN, L. A. et al. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. **Journal of Environmental Management**, v. 119, p. 124-135, 2013.

ELLINGSEN, L. A. et al. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. **Energy**, v. 104, p. 115–134, 2016.

ENERGY TRANSITION. Cobalt for energy transition. 2023. Disponível em: https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/07/ETC_Materials_Factsheet_Cobalt.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.

EUROBAT. Position Paper on Batteries Regulation 2024. Brussels: EUROBAT, 2024. Disponível em: https://www.eurobat.org/wp-content/uploads/2024/02/14022024-EUROBAT-manifesto-2024_WEB.pdf. Acesso em: 1 dez. 2025.

FRASER, J. et al. Study on future demand and supply security of nickel for electric vehicle batteries. 2021. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/jrc123439>. Acesso em: 20 set. 2025.

GHOSH, S.; CHAKRABORTY, D. Evaluating the sustainability of EV battery recycling pathways using LCA and circular economy principles. **Journal of Environmental Management**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120581>. Acesso em: 22 set. 2025.

GOLDEN, M. New technology extracts lithium from brines inexpensively and sustainably. **Stanford News**, 2024. Disponível em: <https://news.stanford.edu/stories/2024/08/new-technology-extracts-lithium-from-brines-inexpensively-and-sustainably>. Acesso em: 20 set. 2025.

GORNER, M.; PAOLI, L. How Global Electric Car Sales Defied Covid-19 in 2020. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/how-global-electric-car-sales-defied-covid-19-in-2020>. Acesso em: 18 set. 2025.

GREET. Publications of GREET model development and applications center for transportation. 2025. Disponível em: <https://greet.anl.gov/list.php>. Acesso em: 20 set. 2025.

HARPER, G. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 11 set. 2025.

HARVEY, F. Un-led panel aims to tackle abuses linked to mining for ‘critical minerals’. **The Guardian**, 26 abr. 2024. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2024/apr/26/un-led-panel-tackle-abuses-mining-critical-minerals>. Acesso em: 21 set. 2025.

HEBALA, A. et al. Comparative analysis of energy consumption and performance metrics in fuel cell, battery, and hybrid electric vehicles under varying wind and road conditions. **Journal of Computational and Theoretical Transport**, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/4/150>. Acesso em: 20 set. 2025.

HODGSON, C. Dr Congo to end cobalt export ban in favour of quotas. **Financial Times**, 2025. Disponível em: <https://www.ft.com/content/89293fb8-69f0-4581-9d5d-29d2bb9e6165>. Acesso em: 21 set. 2025.

HOME, A. Funds bet that nickel price has hit rock bottom. **Reuters**, 22 set. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/funds-bet-that-nickel-price-has-hit-rock-bottom-2025-09-22>. Acesso em: 21 set. 2025.

HOYER, K. G. The History of Alternative Fuels in Transportation: The Case of electric and Hybrid Cars. **Journal of Industrial Policy and Management**, 2008. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/juipol/v16y2008i2p63-71.html>. Acesso em: 17 set. 2025.

IBARRA-GUTIÉRREZ, S. et al. Assessing the potential of quebec lithium industry: Mineral reserves, lithium-ion batteries production and greenhouse gas emissions. **Applied Energy**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721003809>. Acesso em: 17 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>. Acesso em: 18 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Electric Vehicles**. 2020a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>. Acesso em: 9 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2020**. 2020b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em: 9 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Model**. 2020c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-model>. Acesso em: 9 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **About history**. 2021a. Disponível em: <https://www.iea.org/about/history>. Acesso em: 10 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook**. 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>. Acesso em: 10 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2024**. 2024a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 25 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries**. 2024b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/life-cycle-assessment-of-ev-batteries>. Acesso em: 25 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Trends in electric vehicle batteries. In: **GLOBAL EV OUTLOOK 2024**. 2024c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries>. Acesso em: 20 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero Roadmap 2025**. 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-2025>. Acesso em: 22 set. 2025.

INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH (IER). **Environmental Impacts of Lithium-Ion Batteries**. 2023. Disponível em: <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/environmental-impacts-of-lithium-ion-batteries/>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ISO. NBR ISO 14040/14044: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework / Requirements and guidelines. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

JASKULA, B. W. **Mineral Commodity Summaries 2008**. Reston, VA: USGS, 2008. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/mineral2008>. Acesso em: 10 set. 2025.

JASKULA, B. W. **Minerals Yearbook: Lithium**. Reston: USGS, 2012. Disponível em: <https://www.usgs.gov/publications/lithium-0>. Acesso em: 10 set. 2025.

JASKULA, B. W. **Mineral Commodity Summaries 2024 – Lithium Data Release**. Reston, VA: USGS, 2024. Disponível em: <https://data.usgs.gov/datacatalog/data/USGS%3A65b7d7ffd34e36a39045b4e8>. Acesso em: 10 set. 2025.

JENIFFER, L. Nickel Demand to Triple by 2030: Can the Market Keep Up? **Carbon Credits**, 2024. Disponível em: <https://carboncredits.com/nickel-demand-to-triple-by-2030-can-the-market-keep-up>. Acesso em: 21 set. 2025.

KUMAR, R. *et al.* Integrating life cycle thinking into EV battery design: pathways for decarbonization. **Energy**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.129842>. Acesso em: 22 set. 2025.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle Explained**. Wiley, 2003. Disponível em: <https://library.herts.ac.uk/bib/269661>. Acesso em: 10 set. 2025.

LEHTIMAK, H. *et al.* Sustainability of the use of critical raw materials in electric vehicle batteries: a transdisciplinary review. **Journal of Cleaner Production**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266701002400132X>. Acesso em: 21 set. 2025.

LIEUTENANT, K. *et al.* Comparison of “zero emission” vehicles with petrol and hybrid cars in terms of total co2 release—a case study for romania, poland, norway and germany. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 7988, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/7988>. Acesso em: 20 set. 2025.

MAJEAU-BETTEZ, G. et al. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. **Environmental Science & Technology**, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21506538/>. Acesso em: 8 set. 2025.

MCDOWELL, C.; LI, F. Circular economy strategies for end-of-life electric vehicle batteries: a global perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107012>. Acesso em: 22 set. 2025.

McKINSEY & COMPANY. **The future of electric vehicles & battery chemistry**. 17 dez. 2024. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-chemistries-powering-the-future-of-electric-vehicles>. Acesso em: 1 dez. 2025.

MESSAGIE, M. et al. A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. **Energies**, v. 7, n. 3, p. 1467, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/3/1467>. Acesso em: 10 set. 2025.

MOHR, S. H. et al. Lithium resources and production: Critical assessment and global projections. **Minerals**, v. 2, n. 1, p. 65-88, 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/2/1/65>. Acesso em: 12 set. 2025.

NIRI, A. J. et al. Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain. **International Journal of Global Warming**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123010341>. Acesso em: 21 set. 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Automotive Lithium-ion Battery (LIB) Supply Chain and U.S. Competitiveness Considerations**. NREL/PR-6A50-63354. 2015. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63354.pdf>. Acesso em: 9 set. 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Comparative Analysis of Vehicle Life-Cycle Energy and Emissions Using GREET**. 2024. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/vehicle-lca.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

OAKDENE, H. **Lanthanide Resources and Alternatives**. 2010. Disponível em: http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf. Acesso em: 8 set. 2025.

PEKKA, T. et al. **Strategic roadmap for the development of Finnish battery mineral resources**. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354067442_Strategic_roadmap_for_the_development_of_Finnish_battery_mineral_resources. Acesso em: 10 set. 2025.

PINEDA, C. C.; CONSONI, F. L. Diagnóstico dos Cenários de Manejo Ambiental do Uso e Disposição Final de Baterias de Lítio de Veículos Elétricos. **Revista e-Locução**, 2020. Disponível em: <https://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucacao/article/view/252>. Acesso em: 10 set. 2025.

PISTILLI, M. Rare earths reserves: top 8 countries. **Investing News**, 2025. Disponível em: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earth-reserves-countr>. Acesso em: 21 set. 2025.

PRECEDENCE RESEARCH. Lithium-ion battery recycling market size, share, and trends 2025 to 2034. 2024. Disponível em: <https://www.precedenceresearch.com/lithium-ion-battery-recycling-market>. Acesso em: 25 set. 2025.

REDWOOD MATERIALS. Redwood Materials is partnering with Ultium Cells to recycle GM's EV battery scrap. 2024. Disponível em: <https://techcrunch.com/2024/05/23/redwood-materials-gm-ultium-battery-scrap/>. Acesso em: 1 dez. 2025.

RAW MATERIALS INFORMATION SYSTEM (RMIS). Lithium-based batteries supply chain challenges. 2025. Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>. Acesso em: 21 set. 2025.

ROCIO, M. A. R. et al. Terras Raras: Situação Atual e Perspectivas. **Química Nova**, v. 35, n. 3, p. 556-562, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-26022015-112419/publico/2014SalumDebora.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

ROSKILL. Rare earths: Global industry, markets and outlook. 2016. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Rare_Earths.html?id=wIGUzgEACAAJ&redir_esc=y. Acesso em: 10 set. 2025.

SITNIK, L. J. Comparison of the cumulative energy demand of BEV and FCEV in their long-term operation. **Combustion Engines**, 2024. Disponível em: <https://www.combustion-engines.eu/Comparison-of-the-cumulative-energy-demand-of-BEV-and-FCEV-in-their-long-term-operation%2C168438%2C0%2C2.html>. Acesso em: 20 set. 2025.

SPILLER, B. et al. Critical minerals for electric vehicles: what you need to know. 2024. Disponível em: <https://www.resources.org/common-resources/critical-minerals-for-electric-vehicles-what-you-need-to-know>. Acesso em: 21 set. 2025.

STRUBEN, J.; STERMAN, J. D. Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. **System Dynamics Review**, 2006. Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2006/proceed/papers/STRUB391.pdf>. Acesso em: 14 set. 2025.

SZCZECH, J. R.; JIN, S. Nanostructured silicon for high capacity lithium battery anodes. **Energy & Environmental Science**, 2011. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2011/ee/c0ee00281j>. Acesso em: 4 dez. 2025.

TRANSPORT & ENVIRONMENT. Europe's leading advocates for clean transport and energy. 2024. Disponível em: <https://www.transportenvironment.org/>. Acesso em: 25 set. 2025.

TUO, Z. The comparative development advantages of battery materials and battery industry in Gansu. 2010. Disponível em: <https://www.adb.org/sites/default/files/project-documents/38512-prc-dpta.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

US DEPARTMENT OF ENERGY. R&D GREET life cycle assessment model. 2025. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/rd-greet-life-cycle-assessment-model>. Acesso em: 21 set. 2025.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). Framework for Sustainable Materials Management and Life-Cycle Thinking. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/smm/framework-sustainable-materials-management>. Acesso em: 20 set. 2025.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). World Minerals Outlook—Cobalt, Gallium, Helium, Lithium, Magnesium, Palladium, Platinum, and Titanium Through 2029. Scientific Investigations Report 2025–5021. Reston, VA: USGS, 2025. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20255021>. Acesso em: 10 set. 2025.

VAN MIERLO, J. et al. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. **Energy Procedia**, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517305513?via%3Dihub>. Acesso em: 10 set. 2025.

WHEELER, E. Electric vehicles to set new market share record in 2020. **S&P Global**, 2020. Disponível em: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/electric-vehicles-to-set-new-market-share-record-in-2020-59050766>. Acesso em: 16 set. 2025.

WOODLEY, L. et al. Enumerating the climate impact of disequilibrium in critical mineral supply. **ArXiv**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2309.15368>. Acesso em: 21 set. 2025.

YAKSIC, A.; TILTON, J. E. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. **Resources Policy**, 2009. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/jrpoli/v34y2009i4p185-194.html>. Acesso em: 8 set. 2025.

YU, A. et al. Life cycle environmental impacts and carbon emissions: A case study of electric and gasoline vehicles in China. **Applied Energy**, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920918304747?via%3Dihub>. Acesso em: 10 set. 2025.

ZHANG, Y.; DING, T. et al. Vulnerability to geopolitical disruptions of the global electric vehicle lithium-ion battery supply chain network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 188, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109919>. Acesso em: 4 dez. 2025.

ZIEMANN, S. et al. The future of mobility and its critical raw materials. **Metallurgical Research**, 2013. Disponível em: <https://www.metallurgical-research.org/articles/metal/abs/2013/01/metal130008/metal130008.html>. Acesso em: 10 set. 2025.