



FACULDADES
DOM BOSCO

**AGATHA DE CARVALHO BAPTISTA SANTOS MARTINS
BIANCA AZEVEDO GOMES SOUZA**

**CARROS ELÉTRICOS E MEIO AMBIENTE: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA
DA BATERIA DOS CARROS ELÉTRICOS E SEU IMPACTO AMBIENTAL.**

RESENDE – RJ

2025

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

**Agatha de Carvalho Baptista Santos Martins
Bianca Azevedo Gomes Souza**

**CARROS ELÉTRICOS E MEIO AMBIENTE: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA
DA BATERIA DOS CARROS ELÉTRICOS E SEU IMPACTO AMBIENTAL**

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Anderson Fernandes de Barros

**RESENDE – RJ
2025**

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

M433 Martins, Agatha de Carvalho Baptista Santos
 Carros elétricos e meio ambiente: uma análise do ciclo de vida da
 bateria dos carros elétricos e seu impacto ambiental / Agatha de Carvalho
 Baptista Santos Martins; Bianca Azevedo Gomes Souza - 2025.
 60f.

Orientador: Anderson Fernandes de Barros
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à
finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia
de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia mecânica. 2. Veículo elétrico. 3. Impacto ambiental. 4.
Bateria. I. Souza, Bianca Azevedo Gomes. II. Barros, Anderson Fernandes
de. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional
Dom Bosco. V. Título.

CDU629.331(043)



FACULDADES
DOM BOSCO

AGATHA DE CARVALHO BAPTISTA SANTOS MARTINS

BIANCA AZEVEDO GOMES SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Anderson Fernandes de Barros

Professor Orientador

Prof. Dayana Elizabeth Werderits Silva

Membro da Banca

Prof. Diniz Félix dos Santos Filho

Membro da Banca

Outubro de 2025

Dedicamos este trabalho, de modo especial, a nós mesmas, por não desistir apesar das dificuldades e por acreditar que conseguiríamos.

Que, por meio de nossas vidas, possamos passar nosso maior legado: Seja leal a você.

À nossa família, por todo amor, cuidado e incentivo, que nos permitiram dar nosso melhor. Sem vocês não estaríamos aqui.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer, primeiramente, à nossa família, Andreia Azevedo Gomes Souza, Ayla Azevedo Gomes Souza e Rodrigo Mascarenhas Souza; Sandra de Carvalho Baptista Martins e Alexandre Santos Martins, que nunca duvidaram de nós e nos apoiaram quando achávamos que não era possível continuar. Essa conquista é tanto deles quanto nossa, por sempre nos incentivarem, nos acolherem e, principalmente, por nos amarem. Gostaríamos que vocês soubessem que, durante todos esses anos, vocês foram nosso maior e melhor exemplo.

Aos nossos amigos, que acompanharam nossa trajetória e a deixaram mais leve e divertida de se seguir.

Ao nosso orientador, Prof. Anderson Fernandes Barros, por toda dedicação, disposição e orientação que nos permitiu conduzir e concluir este estudo da melhor forma possível.

“É preciso desconfiarmos dos engenheiros, as coisas começam pela máquina de costura e acabam na bomba atômica.”

(Marcel Pagnol)

RESUMO

O aumento da demanda por soluções de mobilidade sustentável tem impulsionado a adoção de veículos eletrificados como alternativa aos veículos utilizados atualmente. No entanto, ainda se discute a real dimensão dos impactos ambientais, que para serem encontrados dependem de uma análise integrada de todo o ciclo de vida das baterias utilizadas. Este trabalho teve como principal objetivo avaliar os impactos ambientais associados às baterias de íons lítio do tipo lítio, ferro e fosfato (LFP), através da perspectiva de Análise do Ciclo de Vida interpretativa, considerando desde a extração das matérias primas até o descarte da bateria. Esta pesquisa, através dos dados coletados, analisou a influência da matriz energética brasileira sobre as emissões de CO₂ durante a fase de uso, correlacionando os resultados às metas de sustentabilidade propostas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e pelo Acordo de Paris. Para atingir estes objetivos, foi realizada uma análise bibliográfica e interpretativa utilizando dados de inventários internacionais, que foram ajustados à realidade nacional, levando em consideração uma bateria LFP de 38KWh. A metodologia SIPOC foi empregada para indicar os processos de produção e identificar os principais pontos de impacto ambiental, com ênfase nos componentes com lítio em sua composição. Os resultados mostraram que as fases de extração do lítio e de fabricação do cátodo são responsáveis por a maioria das emissões de gases de efeito estufa, devido ao alto consumo energético e ao uso de solventes e reagentes químicos. No entanto, observou-se que, devido ao cenário brasileiro ser composto por uma matriz energética que apresenta maior parte de sua formação em fontes renováveis, as emissões associadas a fase de uso da bateria são significativamente menores quando comparadas as emissões globais que apresentam cenários baseados em energia de fontes fósil. Portanto, conclui-se que os carros elétricos com baterias de LFP apontam uma viabilidade ambiental cada vez maior no contexto brasileiro. No entanto, esse potencial depende do avanço de políticas públicas que estimulem a reciclagem dos materiais, da modernização dos processos produtivos e do robustecimento das fontes renováveis de energia. Dessa forma, os resultados encontrados demonstram que a sustentabilidade desses carros não se sustenta apenas com a tecnologia utilizada, mas sim com a integração de toda a cadeia produtiva, o uso eficiente da energia e o compromisso com metas climáticas globais.

Palavras-chaves: Bateria LFP; Análise do Ciclo de Vida; Carros Elétricos; Impactos Ambientais; Emissões de CO₂.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable mobility solutions has driven the adoption of electrified vehicles as an alternative to conventional vehicles. However, the actual extent of their environmental impacts remains under discussion, and identifying these impacts requires an integrated analysis of the entire life cycle of the batteries used. This study aimed to assess the environmental impacts associated with lithium-ion batteries of the lithium iron phosphate (LFP) type, using an interpretive Life Cycle Analysis approach that considers all stages, from raw material extraction to battery disposal. Based on collected data, the research examined the influence of Brazil's energy matrix on CO₂ emissions during the battery use phase, linking the findings to sustainability goals outlined by the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Agreement. To achieve these objectives, a bibliographic and interpretive analysis was conducted using international inventory data, which were adapted to the national context, focusing on a 38 kWh LFP battery. The SIPOC methodology was applied to map production processes and identify key environmental impact points, with emphasis on lithium-containing components. The results revealed that the lithium extraction and cathode manufacturing stages are responsible for most greenhouse gas emissions, due to high energy consumption and the use of solvents and chemical reagents. However, it was observed that, given Brazil's energy matrix is largely composed of renewable sources, emissions during the battery use phase are significantly lower compared to global scenarios that rely on fossil-based energy. Therefore, it is concluded that electric vehicles equipped with LFP batteries show increasing environmental viability in the Brazilian context. Nonetheless, this potential depends on the advancement of public policies that promote material recycling, modernization of production processes, and strengthening of renewable energy sources. The findings demonstrate that the sustainability of these vehicles relies not only on the technology itself, but on the integration of the entire production chain, efficient energy management, and commitment to global climate goals.

Keywords: LFP Battery; Life Cycle Analysis; Electric Vehicles; Environmental Impacts; CO₂ Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de uma Análise do Ciclo de Vida.....	20
Figura 2 – Economia Circular da Bateria	21
Figura 3 – Diagrama de borboleta de baterias de Carros Elétricos	22
Figura 4 – Diagrama SIPOC	22
Figura 5 – Características dos Veículos Elétricos Puros	28
Figura 6 – Bateria de Íon Lítio	29
Figura 7 – Consumo de eletricidade per capita (MWh/hab.)	31
Figura 8 – Consumo de eletricidade no transporte rodoviário	31
Figura 9 – Fluxo metodológico	33
Figura 10 – SIPOC do Eletrólito	38
Figura 11 – SIPOC do Cátodo.....	39
Figura 12 – Matriz Visual de Impactos Ambientais.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química e propriedades dos principais cátodos utilizados comercialmente para as baterias de íon-lítio utilizadas em carros elétricos.....	29
Tabela 2 – Inventário de componentes	36
Tabela 3 – Participação de cada fonte na Matriz Energética Brasileira	42
Tabela 4 – Emissões durante o uso de LIB de 38kWh.....	43
Tabela 5 – Emissões estimadas durante o uso	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ACV	Análise de Ciclo de Vida
Al	Alumínio
BEN	Balanco Energético Nacional
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
CH4	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO2	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
CTF	Cadastro Técnico Federal
Cu	Cobre
EC	Economia Circular
ER	Engenharia Reversa
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HC	Hidrocarbonetos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	Agência Internacional de Energia
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LCO	Óxido de Lítio-Cobalto
LFP	Fosfato de ferro-lítio
LIB	<i>Lithium Ion Battery</i> (Bateria de Ion Lítio)
LMO	Lítio-manganês spinel
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
MOVER	Mobilidade Verde e Inovação
MP	Material Particulado
N2O	Óxido Nitroso
NCA	Lítio-níquel-cobalto-alumínio
NDCs	Contribuições Nacionalmente Determinadas
NiMH	Níquel-hidreto metálico
NMC	Lítio-níquel-manganês-cobalto
NOx	Óxidos de Nitrogênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

OMS	Organização Mundial da Saúde
ONG	Organizações Não Governamentais
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
Patn	Programa de Aceleração da Transição Energética
PEV	<i>Plug-in electric vehicles</i>
RAPP	Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais
SIPOC	<i>Suppliers, Input, Process, Output and Customers</i>
SOx	Óxidos de enxofre
UNFCCC	Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima
VE	Veículos Elétricos
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
Zebra	<i>Zeolite Battery Research Africa Project</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Situação Problema	17
1.2	Justificativa do Trabalho	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Delimitação do Estudo	18
1.5	Organização do Trabalho	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Análise do Ciclo de Vida	19
2.2	<i>Supply Chain</i> através dos conceitos de Economia Circular	20
2.2.1	<i>Suppliers, Input, Process, Output and Customers</i> (SIPOC)	22
2.3	Engenharia Reversa	23
2.4	Sustentabilidade Veicular	23
2.5	Acordos Internacionais sobre Meio Ambiente	24
2.5.1	Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima (UNFCCC)	24
2.5.1.1	COP21 – Acordo de Paris	25
2.5.2	Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável – ONU	26
2.5.2.1	ODS 12	26
2.5.2.2	ODS 15	27
2.6	Carros Elétricos	27
2.7	Baterias de Íon Lítio	28
2.7.1	Reciclagem de LIBs	30
2.8	Matriz Energética Brasileira	30
3	MÉTODO DE PESQUISA	32
3.1	Definição do Problema	34
3.2	Pesquisa Bibliográfica	34
3.3	Coleta e Organização de Dados	34
3.4	SIPOC	34
3.5	ACV e Análise Interpretativa	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Caracterização da Bateria LFP	35
4.1.1	Identificação dos componentes	35

4.1.2	Análise de emissões de CO ₂	35
4.2	SIPOC.....	37
4.2.1	SIPOC Eletrólito	38
4.2.2	SIPOC Cátodo.....	39
4.3	ACV	40
4.3.1	Emissões de Extração e Fabricação	40
4.3.2	Emissões durante o uso.....	42
4.3.3	Emissões de Descarte e Reciclagem.....	44
4.4	Discussão	45
5	CONCLUSÃO	46
5.1	Limitações de Pesquisa	47
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

A poluição veicular está intrinsecamente relacionada com a poluição atmosférica e com o aquecimento global: os gases emitidos pelos automóveis são uma das principais fontes de poluentes aéreos e intensificadores do efeito estufa (CETESB, 2020).

Dentre as inúmeras fontes emissoras de poluentes do ar, as fontes antropogênicas, produzidas pelo homem, são as que os emitem em altas concentrações causando potenciais impactos na saúde (INCA, 2021). Estima-se que cerca de 90% da população mundial está exposta a níveis de concentração de poluentes acima dos recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e nas regiões metropolitanas os automóveis se constituem nas principais fontes dessa poluição (OMS, 2024).

Os gases emitidos pelos veículos automotivos, como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado (MP), produzem diversos efeitos negativos na saúde coletiva e na vida em sociedade, são eles: a redução da capacidade do sangue de transportar oxigênio, chuvas ácidas e diversos problemas respiratórios (CETESB, 2020).

Outra consequência ambiental que tem como decorrência a poluição veicular é a potencialização do efeito estufa, um fenômeno natural que possibilita a vida humana na Terra (IPCC, 2022). Esse efeito diz que parte da radiação emitida pelo Sol é refletida de volta para o espaço ao atingir a atmosfera terrestre e outra parte é absorvida pelos oceanos e pela superfície da Terra, promovendo o seu aquecimento. Os gases que compõem esse efeito fazem a retenção de parte desse calor, sem este a radiação solar seria quase que totalmente refletida para o espaço e a temperatura média do planeta seria baixa para a vida na Terra.

Os principais Gases de Efeito Estufa (GEE) emitidos por atividades humanas são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Dentre eles, o dióxido de carbono é o mais citado quando se fala em GEE. Esse gás tem como principal emissor a queima de combustíveis fósseis, principalmente vinda do setor automotivo (IPCC, 2022).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), as emissões provindas do setor de transporte contribuem por cerca de 20% das emissões de CO₂ no mundo. Com esse aumento de emissões de GEE mais calor é retido na atmosfera, aumentando a temperatura global e acarretando mudanças climáticas, fato que é comumente denominado de Aquecimento Global (Ministério do Meio Ambiente).

Diante desta situação, as empresas automobilísticas vêm sendo incentivadas a desenvolver e produzir veículos, como forma alternativa, que sejam menos poluentes e que ajudem a reduzir o aquecimento global (Broadbent; Drozdowski; Metternicht, 2017).

Com isso, a intensificação da pressão sobre o processo de descarbonização veicular alcançou tal nível que, em 2022, o Parlamento Europeu:

...respaldou a proposta da Comissão Europeia relativa a alcançar uma mobilidade rodoviária com zero emissões de CO₂ até 2035 no que refere aos automóveis novos de passageiros e veículos comerciais ligeiros... Para alcançar estas metas, todos os carros novos que entram no mercado europeu a partir de 2035 deverão produzir zero emissões de CO₂.

Além de programas de incentivo e regulamentações de emissões, como o PROCONVE e a Norma EURO, há um incentivo para que os carros à combustão sejam substituídos gradualmente pelos carros elétricos. Os modelos elétricos auxiliam na redução do consumo de fontes fósseis, uma vez que não necessitam da queima para se locomover (Ntombela et al., 2023). Todavia, não é possível avaliar a sustentabilidade dos carros elétricos apenas durante seu uso, etapas como fabricação de componentes e descarte também precisam ser consideradas.

Os impactos ambientais causados por esses carros estão concentrados, em sua maioria, na fabricação e descarte da bateria. A bateria, componente que define o que é um carro elétrico, depende da extração de componentes de materiais como lítio. Esse componente, por exemplo, é extraído pela mineração, atividade que provoca fortes impactos ambientais (Krishnan, 2024).

Ainda, para o abastecimento desses carros é necessário o uso da energia elétrica que, por sua vez, depende da matriz energética do país. Na Europa, por exemplo, de acordo com a *European Environment Agency* (2023), só 17% da energia consumida vem de fontes renováveis, desse modo a energia utilizada para abastecer os carros elétricos vem de fontes não renováveis que também poluem. No Brasil, as fontes renováveis representam cerca de 50% da matriz energética, tendo uma matriz energética mais sustentável (BEN, 2024).

Finalmente, após o fim da vida útil das baterias, não há uma estratégia para o seu descarte adequado. Por mais que a reciclagem seja uma opção, esta ainda apresenta alguns obstáculos técnicos e financeiros, incluindo também o fato de que, no Brasil, não há uma regulamentação do que fazer com essas baterias (Agência Brasil, 2023).

1.1 Situação Problema

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) das baterias dos carros elétricos auxilia na percepção de algumas problemáticas ambientais que a produção desses veículos proporciona.

Embora os carros elétricos sejam considerados uma opção mais ecológica, esta análise se concentra apenas no uso dos carros elétricos como uma alternativa aos carros tradicionais, no entanto, a análise ambiental desses veículos não pode se restringir à fase de uso, devendo incluir também a fabricação e o descarte. A cadeia de suprimento da bateria, que depende da extração do lítio, apresenta alguns impactos ambientais durante a extração do componente, ainda, seu descarte não pode ser feito de maneira inadequada, pois causa grandes prejuízos ao meio ambiente e o seu processo de reciclagem ainda é pouco explorado.

Diante do exposto, é apresentada a seguinte questão de pesquisa: dentro das metas internacionais, considerando o ciclo de vida das baterias de íon-lítio LFP, os carros elétricos são uma alternativa sustentável?

1.2 Justificativa do Trabalho

Atualmente, observa-se uma necessidade cada vez mais urgente de reduzir as emissões de CO₂ e demais poluentes provenientes da indústria automotiva. Nesse contexto, os carros elétricos têm se consolidado como uma alternativa sustentável.

A discussão desse tema, sustentado pela ferramenta de análise do ciclo de vida do produto, reforça a necessidade de apresentar uma visão mais clara dos reais impactos ambientais que os carros elétricos têm durante toda sua produção até seu desuso, desde a extração de matérias primas para construção da bateria até o seu descarte na natureza.

Diferenciando-se das pesquisas já publicadas, que se concentram em apresentar comparativos entre carros elétricos e a combustão, este estudo apresenta uma análise interpretativa dos dados coletados internacionalmente, adaptando-os ao cenário brasileiro.

Ainda, esse estudo agrega à discussão a harmonia entre o progresso da eletromobilidade nacional e os compromissos que o Brasil firmou em tratados e políticas globais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Com isso, este estudo se justifica pela necessidade de compreender melhor, baseando-se em uma revisão bibliográfica, se os carros elétricos podem ser considerados uma alternativa sustentável de acordo com a matriz energética do país e dentro das metas estabelecidas mundialmente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade ambiental do uso dos carros elétricos por meio de uma análise interpretativa do ciclo de vida das baterias de Íon Lítio, dentro das metas estabelecidas nas convenções internacionais sobre o clima e avaliando a estrutura da matriz energética nacional.

1.3.2 Objetivos Específicos

Em sinergia com o objetivo geral, faz-se necessário a especificação do que será analisado, detalhando as fases do projeto em objetivos menores, sendo eles:

- Identificar os componentes da bateria LFP dos carros elétricos;
- Analisar e discutir os impactos ambientais, causados pelos componentes que utilizam lítio em sua estrutura, da cadeia de suprimentos até o seu descarte;
- Apresentar, através da análise interpretativa do ciclo de vida da bateria, se realmente os carros elétricos são uma alternativa sustentável;
- Analisar como a participação de fontes renováveis na matriz energética nacional afeta o desempenho ambiental das baterias LFP no Brasil.

1.4 Delimitação do Estudo

O estudo será conduzido através de abordagem interpretativa baseada na ferramenta ACV das baterias de Íon Lítio LFP, componentes que fazem parte dos carros elétricos a venda no Brasil. O foco estará na identificação dos componentes da bateria, seu ciclo de vida, os impactos ambientais causados e se, apesar dessas problemáticas, os carros elétricos podem ser considerados uma alternativa sustentável de acordo com a matriz energética do país e dentro das metas estabelecidas mundialmente. Os dados analisados serão coletados através de pesquisas, artigos científicos, teses e dissertações relacionados ao tema.

1.5 Organização do Trabalho

Para uma melhor leitura, entendimento e organização, o trabalho está estruturado em cinco capítulos.

No Capítulo 1 foi realizada uma introdução contextualizando o tema de pesquisa. Ou seja, a importância da diminuição de GEE e poluentes no cenário atual, iniciativas governamentais relacionadas ao tema, bem como uma discussão e análise de alternativas mais ecológicas dentro da indústria automotiva, como a opção de carros elétricos, e as questões não

levantadas acerca da utilização desses veículos. Ainda, foi apresentado a justificativa, a situação problema, delimitação e o objetivo geral e específicos do trabalho.

A revisão da literatura é apresentada no Capítulo 2, explorando pesquisas acerca dos componentes da bateria dos carros, acordos internacionais destacando a importância de alternativas mais sustentáveis, detalhamento da matriz energética nacional, e definições técnicas acerca das ferramentas da qualidade que serão utilizadas. Neste capítulo, as pesquisas sobre a obtenção desses componentes na cadeia de suprimentos e o descarte após sua vida útil serão objetivadas utilizando a ACV da bateria.

O Capítulo 3 demonstra a metodologia utilizada na pesquisa, como a coleta e análise de dados, que estará diretamente associada com o Capítulo 4, onde será apresentado os resultados obtidos acerca da utilização dos carros elétricos como uma alternativa sustentável.

A conclusão do trabalho em sinergia com os objetivos, limitações de estudo e as recomendações para futuras pesquisas, é apresentada no Capítulo 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para melhor exposição da temática, vale destacar as definições dos principais conceitos abordados ao longo deste trabalho e as validações por diversos autores especialistas que concedem o embasamento teórico da proposta sugerida.

2.1 Análise do Ciclo de Vida

Segundo a ISO14040 (norma de gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida), revisada em 2022, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para avaliação dos impactos ambientais associados a um produto, processo produtivo e/ou serviço ao longo de seu ciclo de vida, considerando a extração de matérias primas, processo logístico e o descarte.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (2021):

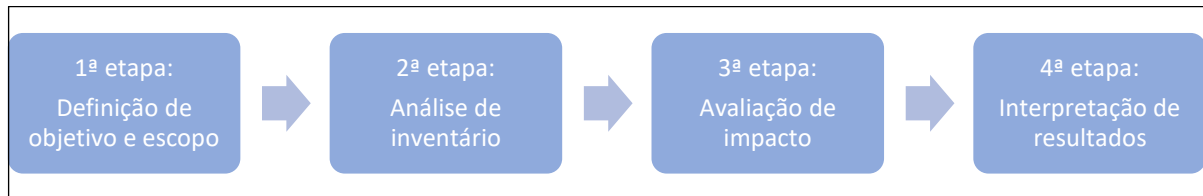
os resultados obtidos permitem comparações entre produtos, além de apresentar um levantamento completo dos insumos utilizados e produzidos durante o ciclo de vida. A ACV possui uma série de benefícios, como a identificação oportunidades de melhorias na performance ambiental de produtos e serviços, auxílio a tomadores de decisão dos setores produtivos e governamental, seleção de indicadores ambientais relevantes ao contexto local e divulgação de ações sustentáveis e apoio a criação de políticas públicas.

Conhecida como um método de análise do berço à sepultura (*cradle-to-grave analysis*), a ACV tem como foco a identificação de quais etapas do trajeto de um produto mais

impactam o meio ambiente, sendo uma modelagem de sistemas de produção reconhecida internacionalmente (Filho; Junior; Luedemann, 2016).

Em sua estrutura apresenta 4 etapas como principais:

Figura 1 – Fases de uma Análise do Ciclo de Vida



Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2009a).

- 1ª etapa: São levantadas as definições das fronteiras do estudo, o porquê está sendo realizado, quais os critérios de qualidade e regras de corte e como será utilizado;
- 2ª etapa: Ocorre a análise de inventário que envolve a obtenção de informações que representam os fluxos de massa e energia de entrada e saída de diferentes fases do ciclo de vida do produto, conforme os limites definidos na etapa anterior.;
- 3ª etapa: Trata-se da avaliação de impacto dos resultados do inventário, captando os dados obtidos e os transformando em indicadores de impacto ambiental (potencial de toxicidade humana, consumo total de energia no ciclo de vida);
- 4ª etapa: A interpretação de todos os resultados obtidos nas, verificando a consistência e integridade dos resultados a fim de definir recomendações e limitações.

2.2 *Supply Chain* através dos conceitos de Economia Circular

A cadeia de suprimentos, em inglês *Supply Chain*, representa um sistema de deslocamento de materiais e informações correlacionados com um propósito claro de proporcionar o melhor valor possível ao consumidor, abrangendo todas as fases de produção e entrega de mercadorias. O gerenciamento da cadeia de suprimentos refere-se à supervisão de todos os passos necessários para criar um produto, começando pela obtenção de matérias-primas até a entrega final ao cliente (Leite; Nogueira, 2022).

Segundo Silva e Sehnem (2024), uma cadeia de suprimentos sustentável combina eficientemente em sua administração os princípios e critérios de responsabilidade ambiental. Isso abrange o design de produtos, a escolha de materiais, a produção, a logística e a gestão do descarte de produtos. Tecnologias associadas à cadeia de suprimentos, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, auxiliam na identificação de riscos, tendências e oportunidades, além de possibilitar a redução de desperdícios e o aumento da eficiência.

A transparência total da cadeia de suprimentos é fundamental, referindo-se à capacidade e disposição da empresa em compartilhar abertamente informações sobre a origem de produtos ao longo de toda a cadeia (Antonialli; Bossle; Hendry; Pereira; Silva, 2023).

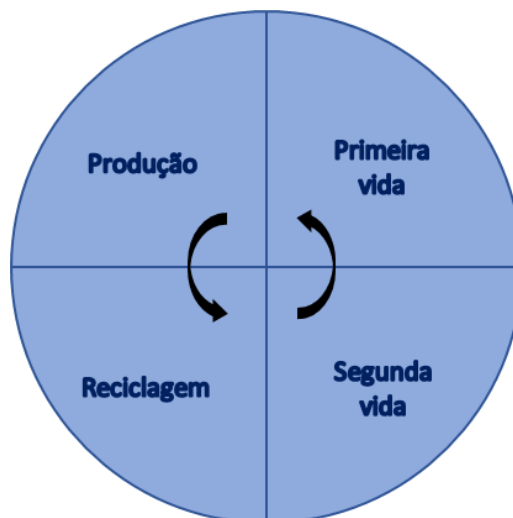
De acordo com Almeida et al. (2022, pg. 150):

a cadeia de suprimentos atual identifica três objetivos, interesses econômicos, demandas sociais e preocupações ambientais, sendo que a fusão destes três objetivos da cadeia de suprimentos gerou a denominação de cadeia de suprimentos sustentável

No contexto atual, o modelo de funcionamento de uma cadeia de suprimentos sustentável é uma chave importante para o atendimento das regulamentações de insumos e emissões que cada vez mais tomam conta das organizações.

Além da Cadeia de Suprimentos Sustentável, dentro das organizações, a Economia Circular (EC), considerando um ciclo fechado de recirculação, vem sendo tratada também como um meio de lidar com as preocupações ambientais, pois diminui a dependência de novas extrações de recursos e descarte ao buscar a permanência dos materiais pelo maior tempo possível (Almeida; Junior; Tavares; Teles, 2022). Aplicando esse conceito para as baterias, sua Economia Circular se daria conforme Figura 2:

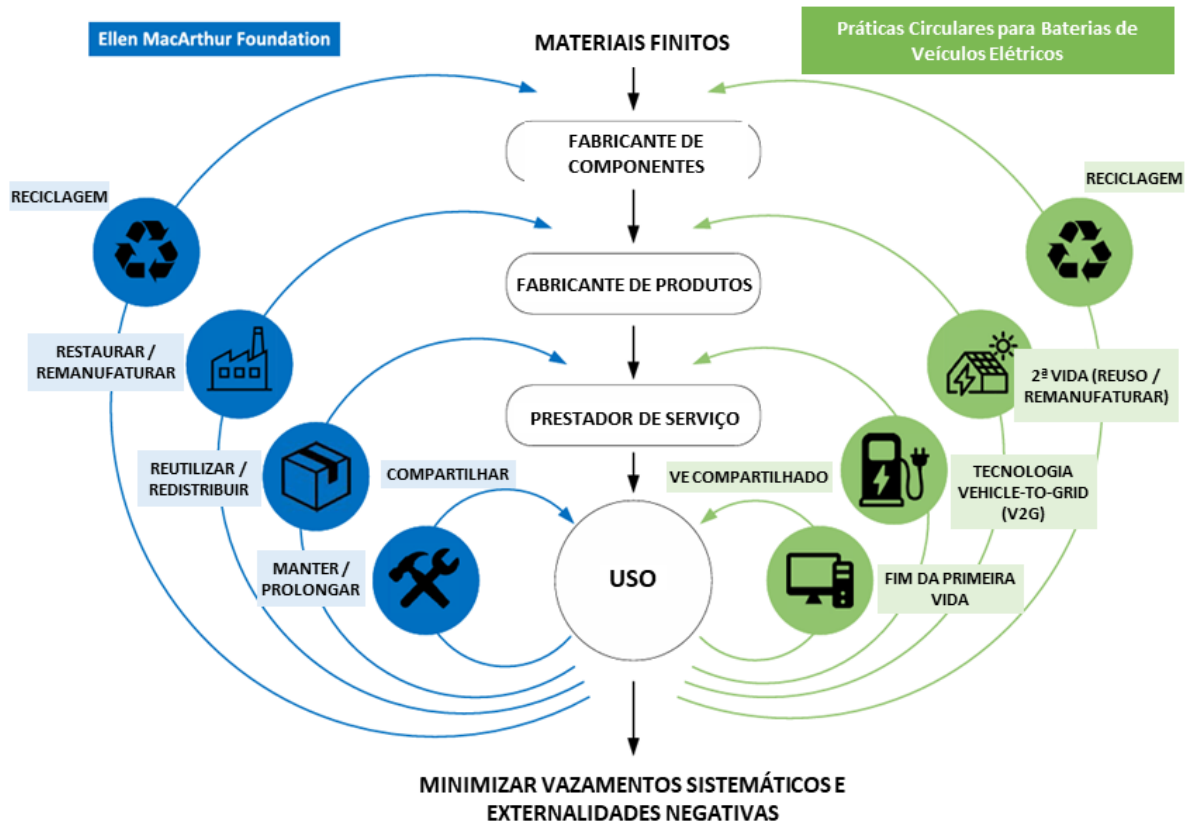
Figura 2 – Economia Circular da Bateria



Fonte: Autores (2025).

Inferindo a aplicabilidade deste conceito, o diagrama de borboleta, apresentado na Figura 3, mostra adoção dos conceitos de economia circular a fim de maximizar o uso e minimizar os impactos, através da estabilização da cadeia de suprimentos, por meio de ciclos fechados com a reutilização em estacionárias (2º vida) e a reciclagem dos principais minérios utilizados como matéria prima.

Figura 3 – Diagrama de borboleta de baterias de Carros Elétricos

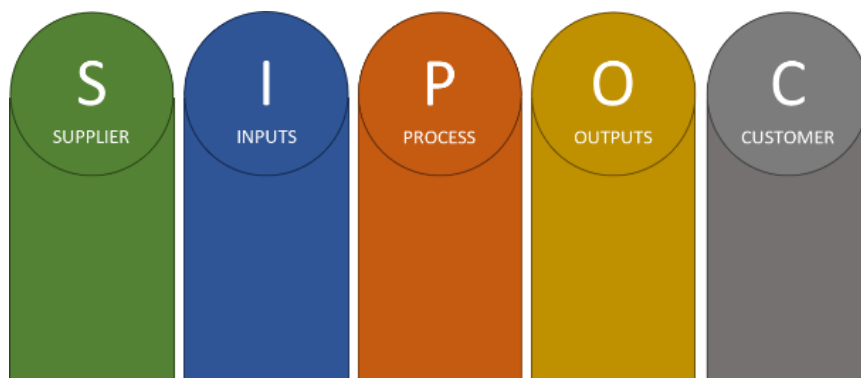


Fonte: Adaptado da Etxandi-Santolaya et al. (2023).

2.2.1 Suppliers, Input, Process, Output and Customers (SIPOC)

Conforme Teles et al. (2021) a ferramenta *Suppliers, Input, Process, Output and Customers* (SIPOC) é um recurso utilizado para realizar a gestão visual dos processos, e suas etapas, que estruturam as operações e planejamentos de projetos de organizações em um diagrama, como na Figura 4, como o próprio nome indica, contendo os fornecedores, entradas, processos, saídas e consumidores da operação envolvida.

Figura 4 – Diagrama SIPOC



Fonte: Adaptado de Souza et al. (2023).

Assim, o SIPOC integra as inovações tecnológicas atuais que ofertam maior rapidez e eficácia em vários setores, analisando o processo de maneira ampla e identificando os elementos relevantes, estando diretamente ligado com as práticas de *Supply Chain* (Teles et al., 2021)

2.3 Engenharia Reversa

De acordo com Quincozes (2024), a origem da engenharia reversa remonta ao início da engenharia em si. Historicamente, esta prática era aplicada em investigações mecânicas e eletrônicas. Nos primórdios da informática, era comum desmantelar programas para compreendê-los melhor ou resolver problemas, em uma época em que a documentação de código era limitada.

Em busca de garantir processos mais eficazes e rápidos, a indústria aumentou sua demanda no processo de Engenharia Reversa (ER), que consiste na desmontagem de um produto, ou sistema, a fim de analisar e entender como foi projetado, e acerca de seu funcionamento, para então realizar melhorias, criar produtos similares ou digitalizar o modelo físico (Bin Aqeel et al., 2023).

A engenharia reversa se torna uma ferramenta essencial ao reduzir de maneira significativa o tempo exigido para fabricar e os custos relacionados à criação de novos produtos, por meio da reutilização de dados e componentes que já existem (Al Uwaimri, 2025).

2.4 Sustentabilidade Veicular

Segundo Amâncio et al. (2008), desde a década de 80, comissões como a de Brundtland têm debatido acerca de conceitos como sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, visando a distribuição igualitária de recursos entre nações e manutenção das três dimensões (econômica, social e ambiental) que compõem a sustentabilidade a fim de manter o padrão de qualidade de vida para as gerações posteriores.

Dessa forma, o foco central dos agentes, sejam ONG, nações ou organizações privadas, comprometidos com o desenvolvimento sustentável introduzido no Relatório Brundtland, é na equidade da proteção da dimensão ambiental, sem prejudicar o desenvolvimento das dimensões sociais e econômicas, equilibrando as responsabilidades em diversos processos, tanto exploratórios quanto de inovações tecnológicas (Amâncio; Claro; Claro, 2008).

Com isso, as nações têm criado programas e metas para cumprir com os acordos internacionais. Para o seguimento automobilístico, no contexto brasileiro o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), por meio de uma medida provisória, idealizou um novo programa, denominado Mobilidade Verde e Inovação (MOVER), de

promoção ao aumento de investimentos em eficiência energética, delimitando as matérias primas de fabricação dos automóveis e reduzindo a cobrança de impostos de parceiros que se dispõem a reduzir seus índices de poluição através do IPI Verde (GOV, 2023).

Do poço à roda é o conceito de medição contemplado pelo programa MOVER, que tem como seguinte definição:

o Mover avança em vários pontos. Entre eles, está sua definição como um programa de “Mobilidade e Logística Sustentável de Baixo Carbono”, proporcionando a inclusão de todas as modalidades de veículos capazes de reduzir danos ambientais. O novo programa também aumenta os requisitos obrigatórios de sustentabilidade para os veículos comercializados no país. Entre as novidades está a medição das emissões de carbono "do poço à roda", ou seja, considerando todo o ciclo da fonte de energia utilizada.

Resumindo, o programa promove a mensuração de emissões de carbono de todo o ciclo da fonte de energia utilizada, conceito semelhante ao ACV, fomentando requisitos mínimos das 3 dimensões da sustentabilidade, com veículos mais econômicos, seguros e menos poluentes advindos diretamente das fábricas (GOV, 2023).

Outro programa sancionado em 22 de janeiro de 2025 é o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten) visando uma transformação no cenário energético, estimulando a economia verde através do financiamento de projetos de desenvolvimento sustentável, priorizando o desenvolvimento tecnológico e a produção de combustíveis de baixa emissão, objetivando a descarbonização da matriz brasileira de transporte (GOV, 2025).

2.5 Acordos Internacionais sobre Meio Ambiente

2.5.1 Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima (UNFCCC)

A Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, consolidou a presença de representantes de 179 países com o objetivo de analisar uma agenda global a fim de minimizar os problemas ambientais mundiais (Ipea, 2015).

Conforme informado pelo Ministério do Meio Ambiente, a ideia de desenvolvimento sustentável, buscando um modelo de crescimento econômico e social em comunhão com à preservação ambiental e ao equilíbrio climático, deu início a elaboração da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Essa Convenção tem como objetivo estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera em níveis que impeçam a interferência humana perigosa no sistema climático global.

O artigo 3 – Princípios – da UNFCCC, aponta que as anomalias observadas nos dados de temperatura indicam que há uma tendência de aquecimento global devido a razões antrópicas, com isso foram definidos compromissos e obrigações para todas as Partes da Convenção (países participantes), a fim de garantir a ideia central da UNFCCC.

Entre os inúmeros compromissos assumidos, dentro do artigo 4 da UNFCCC, por todas as Partes, tem-se:

- (c). Promover e cooperar no desenvolvimento, aplicação e difusão, incluindo transferência, de tecnologias, práticas e processos que controlem, reduzam ou evitem as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal em todos os setores relevantes, incluindo os setores de energia, transporte, indústria, agricultura, silvicultura e gestão de resíduos;

Nesse sentido, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima mantém uma reunião anual desde 1995 chamada de Conferência das Partes (COP), “as COPs são as responsáveis pelo início do processo de planejamento, discussão e execução de ações mitigadores no que diz respeito à mudança climática” (Pontes; Figueiredo, 2023, p. 26).

Segundo Doan (2024), desde seu início, em 1995, as COPs mais importantes dentro da trajetória da mudança climática foram a COP 3, com o Protocolo de Kyoto, assinado em 1997 com o foco na redução de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global, a COP 21 com o Acordo de Paris, fortalecendo a resposta à ameaça da mudança climática.

2.5.1.1 COP21 – Acordo de Paris

Aprovado por 195 países na 21ª Conferência das Partes (COP 21) da UNFCCC, o Acordo de Paris é um tratado internacional juridicamente vinculativo sobre mudanças climáticas. Esse acordo foi adotado com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça climática, reforçando a capacidade dos países em lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças (UNFCCC, 2015).

Conforme Gao et al. (2017), o Acordo de Paris estabeleceu o comprometimento para aumentar os esforços a fim de limitar o aquecimento global, mantendo uma meta de manter o aumento da temperatura média global em menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de adivar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima desses níveis.

Para que esse objetivo fosse alcançado, cada governo se envolveu na construção de compromissos nacionais de ação climática, conhecidos como contribuições nacionalmente determinadas (NDCs). Dessa forma, cada nação apresenta as medidas nacionais que serão

tomadas para a contribuição na redução de GEE levando em consideração o que cada governo considera viável a partir do cenário econômico e social do seu país (UNFCCC, 2015).

Seguindo esse princípio, segundo Delgado et al. (2017), para que os objetivos impostos pelo Acordo de Paris sejam cumpridos, descarbonizar o setor de transportes se torna prioridade, visto que as emissões provindas desse setor contribuem por mais de 10% das emissões de gases do efeito estufa no mundo.

2.5.2 Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável – ONU

A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) é um plano global composto por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que tem como meta alcançar um mundo melhor para todos os povos e nações. Esses 17 objetivos têm como meta acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e prosperidade (Nações Unidas Brasil, 2025).

2.5.2.1 ODS 12

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 tem como meta assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.

Conforme as Nações Unidas do Brasil, dentro da ODS 12 ainda existem submetas, que detalham de uma melhor forma quais aspectos precisam ser atendidos para que o objetivo principal seja cumprido. Pode-se destacar a submeta 12.4:

Alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente

2.5.2.2 ODS 15

O Objetivo 15 tem como meta proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade (Nações Unidas do Brasil, 2025). Desse modo, o Objetivo 15 se divide em outras etapas para que seja melhor a identificação dos aspectos mais importantes a serem cumpridos. Dentre eles, tem-se:

15.2 Promover a implementação da gestão sustentável de todos os tipos de florestas, deter o desmatamento, restaurar florestas degradadas e aumentar substancialmente o florestamento e o reflorestamento globalmente.

15.3 Combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo.

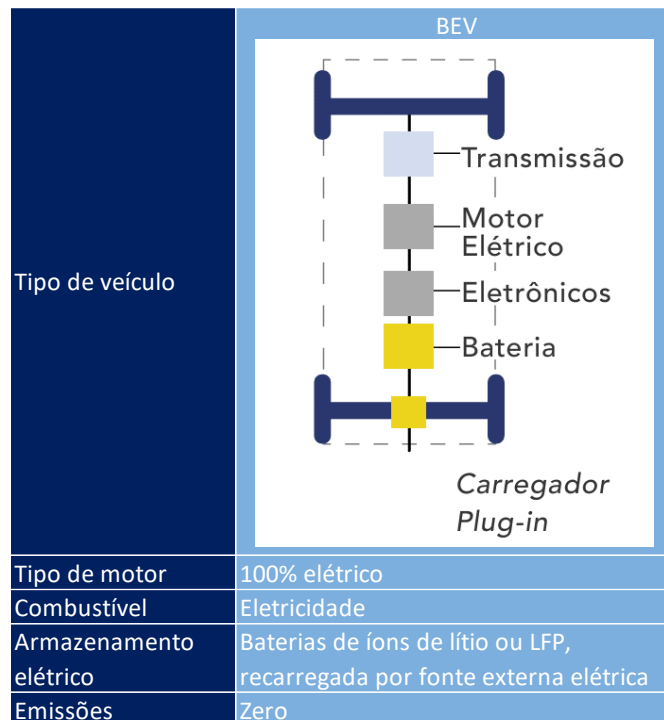
2.6 Carros Elétricos

A ascensão dos carros elétricos se deu por volta da década de 1970, após a primeira grande crise do petróleo, quando a busca por tecnologias alternativas aos combustíveis fósseis recebeu maior interesse do mercado. Esses carros fazem parte do grupo de veículos chamados “emissões zero”, pois quase não emitem poluentes (atmosféricos e sonoro) na sua utilização (Delgado et al., 2017).

Segundo Ntombela et al. (2023), os carros elétricos, ou veículos elétricos (VE), são veículos que tem como matriz motora a energia elétrica. Podem ser divididos em elétricos puros (BEV), que possuem a energia armazenada em baterias recarregáveis, ou híbridos, que possuem motores a combustão interna e motores elétricos.

A maioria desses carros dispões de baterias químicas que armazenam a energia elétrica necessária responsável pelo acionamento do motor e por fazer o veículo se mover. Os modelos mais antigos de VE utilizavam baterias de ácido de chumbo (NiMH), enquanto os mais modernos possuem baterias de íons de lítio (LIB) (Freitas; Marchesini, 2022).

Todos os BEV e alguns dos Híbridos são denominados de *plug-in electric vehicles* (PEV), pois a fonte da energia elétrica desses carros é fornecida de forma externa, ou seja, eles precisam ter suas baterias recarregadas de tempos em tempos, conforme disposição de componentes demonstrados na Figura 5 (Delgado et al., 2017).

Figura 5 – Características dos Veículos Elétricos Puros

Fonte: Adaptada de Cadernos FGV Energia, pg. 18 (2017).

2.7 Baterias de Íon Lítio

As baterias dos carros elétricos possuem um papel imprescindível dentro do contexto de mobilidade elétrica, sendo o componente mais importante e de maior custo na cadeia de suprimentos dos carros elétricos (Rodríguez; Consoni, 2020).

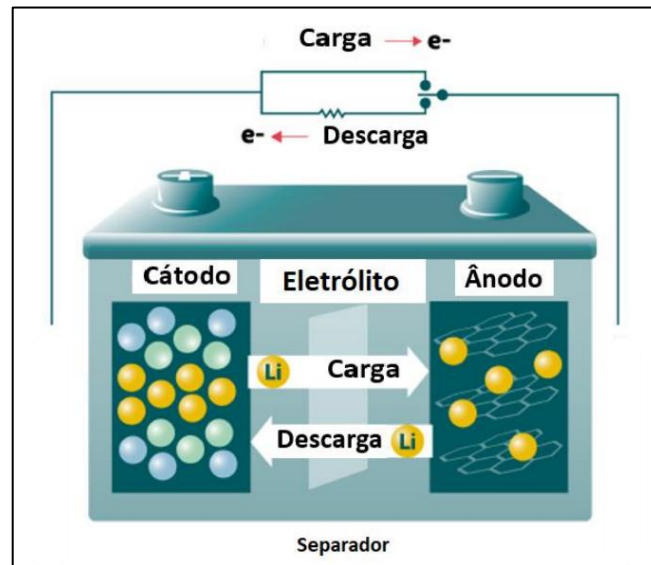
Conforme Waseem et al. (2025), existem inúmeros tipos de químicas que alimentam as baterias, como NiMH (Níquel-hidreto metálico), *Zebra* (*Zeolite Battery Research Africa Project*), e algumas versões mais modernas das baterias de chumbo-ácido, mas são as baterias de lítio-íon que possuem maior aceitação no mercado, além de apresentarem uma maior densidade energética e menos peso quando comparadas com as anteriores.

Essas baterias foram introduzidas na década de 1990, primeiro como um componente de telefones celulares e computadores, para só então serem concebidas nos carros elétricos. São descritas como dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia potencial química durante o carregamento, e, por sua vez, convertem essa energia química em energia elétrica durante o descarregamento (Freitas; Marchesini, 2022).

Uma bateria de Íon Lítio é composta de várias células empilhadas e cada célula é composta por três elementos primários: dois eletrodos (cátodo e ânodo) imersos em um eletrólito, conforme Figura 6. Esse eletrólito promove o transporte de íons entre os eletrodos e, ao se conectar externamente os eletrodos, as reações de redução no cátodo e oxidação no ânodo

promovem a reação de um fluxo de elétrons e corrente a ser utilizada (Waseem et al., 2025). Ainda, há a presença de um separador que tem como função impedir o contato direto entre os eletrodos, a fim de evitar um curto-circuito (Moreira et al., 2024).

Figura 6 – Bateria de Íon Lítio



Fonte: Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (2018).

Ambos os componentes, ânodo e cátodo, possuem funções diferentes dentro das baterias, enquanto os ânodos estão associados com o tempo de recarga e com a segurança da bateria, os cátodos determinam a capacidade de armazenamento de energia. Decorrente disso, as baterias são definidas pela composição química de sus cátodos (Monteiro, 2021).

Alguns dos principais materiais que são misturados ao lítio para servir de cátodo são: óxido de lítio-cobalto (LCO); Lítio-manganês spinel (LMO); Fosfato de ferro-lítio (LFP), Lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC); Lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA). Na Tabela 1 é possível identificar os tipos de cátodo mais utilizados e suas particularidades:

Tabela 1 – Composição química e propriedades dos principais cátodos utilizados comercialmente para as baterias de íon-lítio utilizadas em carros elétricos

Cátodo	Composição Química	Capacidade (mAh/g)	Voltagem de Operação (V)
LCO	LiCoO_2	140	3,9
LMO	LiMn_2O_4	125	4,0
LFP	LiFePO_4	160	3,45
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_a\text{Co}_{1-x-a}\text{O}_2$	170	3,8
NCA	$\text{LiNi}_x\text{Co}_a\text{Al}_{1-x-a}\text{O}_2$	200	3,8

Fonte: Adaptado de Monteiro (2021).

No caso dos ânodos, o principal material é o grafite e, para os eletrólitos, comumente são utilizados uma mistura de sais de lítio, como o LiPF₆, LiBF₄, LiClO₄ e LiSO₂ que são dissolvidos em solventes orgânicos como o carbonato de propileno, carbonato de etileno ou dimetil sulfóxido (Moreira et al., 2024).

2.7.1 Reciclagem de LIBs

A reciclagem de baterias, fomentada pelo conceito de EC, é uma etapa crucial a ser alcançada para que os carros elétricos consigam crescer dentro do conceito de sustentabilidade veicular, diminuindo os resíduos poluentes que as baterias emitem após serem descartadas.

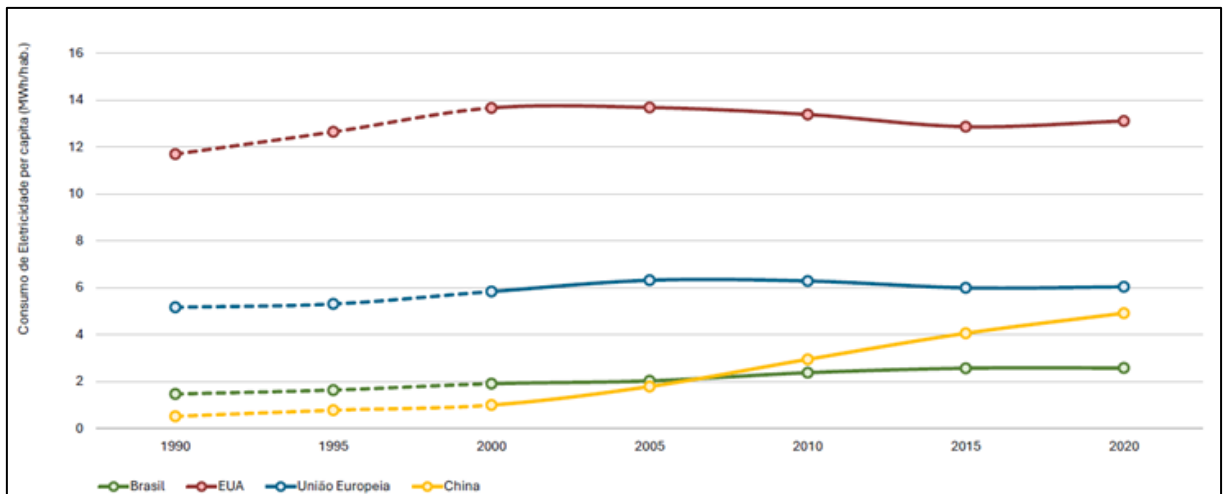
Antes de passar pelo processo de reciclagem de fato, as baterias precisam cumprir algumas etapas de pré-tratamento, onde há a descarga das baterias, desmontagem e separação (Kim et al., 2021).

Entre os principais métodos de reciclagem de baterias é possível citar a pirometalurgia, que consiste na separação dos materiais metálicos dos não metálicos através do tratamento térmico, geralmente a pirólise. A bateria é exposta a altas temperaturas dentro de um ambiente controlado, e, segundo Makusa et al. (2021), há a fusão dos metais presentes devido ao estado líquido ou pastoso dos metais, permitindo, ainda, sua separação dos materiais não metálicos.

Ao final do processo, os metais são recuperados como ligas ou compostos metálicos, que podem passar por novos processos de purificação a fim de serem utilizados novamente como matéria-prima para novas LIBs ou em outras aplicações (Moreira et al., 2024).

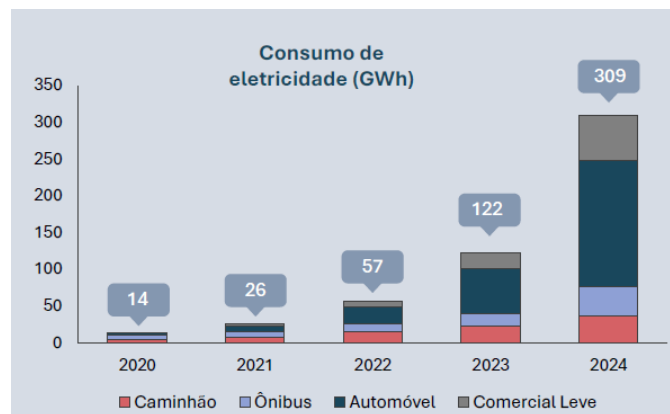
2.8 Matriz Energética Brasileira

Divergindo de grande parte do cenário global, o Brasil apresenta números crescentes da participação de energias renováveis na matriz energética. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2025, a participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 88,2% em 2024, aumento de 12,4% de energias advindas da geração eólica e 11,4% de energias da geração termoelétrica. Observando dados da Agência Internacional de Energia (IEA), as emissões, per capita, do Brasil equivalem a 14,5% das emissões do Estados Unidos da América, 37,8% das emissões União Europeia e 26,7% das emissões da China, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 – Consumo de eletricidade per capita (MWh/hab.)

Fonte: Balanço Energético Nacional, p. 68 (2025).

A partir do relatório de ano base 2024, o BEN passou a publicar dados de consumo de eletricidade do setor rodoviário, que compreendem os anos 2020 a 2024, sendo possível observar um crescimento de 143 vezes no licenciamento de carros elétricos, de 1.500 unidades em 2020 para 215.300 unidades em 2024, e de 22 vezes no consumo de eletricidade no mesmo período, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Consumo de eletricidade no transporte rodoviário

Fonte: Balanço Energético Nacional, p. 30 (2025).

A intensidade média ponderada de emissões da matriz elétrica (kgCO₂e/kWh) funciona como índice de “pegada de carbono” média para distribuir a participação que cada fonte de energia tem na matriz e as características das emissões. Na prática este índice é amplamente utilizado para comparações de níveis de emissões entre países, sendo uma base para a ACV uma vez que permite calcular os impactos quantitativos de CO₂ embutidos no uso de eletricidade. Outro uso deste índice é para projeções de cenários futuros, simulando a funcionalidade da descarbonização da matriz (BEN, 2025).

3 MÉTODO DE PESQUISA

O estudo dispôs de uma classificação selecionada a fim de assegurar a credibilidade e repetitividade dos expostos neste documento, de acordo com o demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da Pesquisa

Natureza	Objetivo	Abordagem	Procedimentos de pesquisa
Básica	Exploratória	Quantitativa	Experimental
Aplicada	Descritiva	Qualitativa	Prisma
	Explicativa	Combinada	Revisão Bibliográfica
	Normativa		Estudo de Caso
			Matriz

Fonte: Adaptada de (Cronin; George, 2023; Kothari, C. R.; Garg, 2019).

De natureza básica, visando o enriquecimento dos conhecimentos relativos a problemática principal, esta pesquisa se concentra na expansão e aprofundamento do conhecimento teórico, sem aplicações práticas, podendo ser caracterizada como uma análise interpretativa baseada em dados secundários.

Pode ser tipificada como exploratória, pois visa preencher lacunas de informação, obtendo familiaridade com o problema de pesquisa aumentando o conhecimento acerca do tema, podendo, ainda, ser utilizada para construções de hipóteses iniciais a fim de planejar estudos mais aprofundados e estruturados (Gil, 2002, pg. 41).

A abordagem utilizada será a combinada, determinando a pesquisa quantitativa para avaliar o efeito ambiental e a pesquisa qualitativa para analisar as percepções sobre a sustentabilidade das baterias de íon-lítio.

Como critérios de inclusão, foram levados em conta fontes secundárias como trabalhos acadêmicos, artigos, documentos e sites governamentais e jornalísticos redigidos em língua portuguesa, espanhola e inglesa, podendo ser classificada como uma revisão bibliográfica.

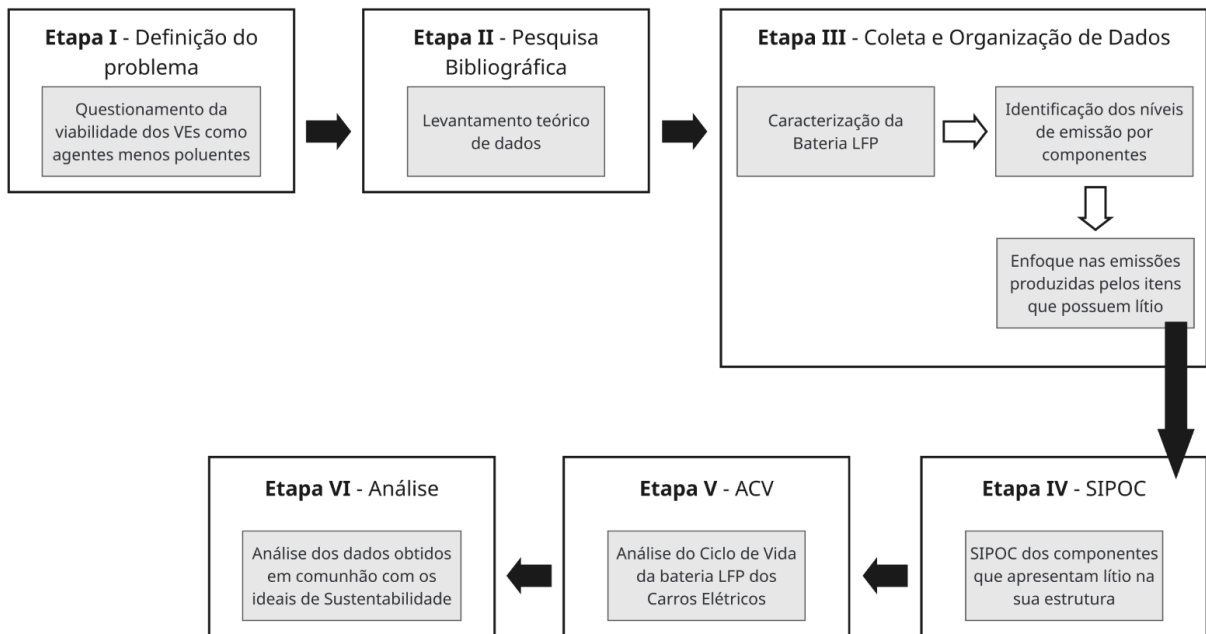
Para a realização do estudo algumas etapas metodológicas, em conjunto com os objetivos, foram adotadas:

- Definição do problema de estudo: Identificação da necessidade cada vez mais urgente de alternativas que substituam os carros à combustão;
- Pesquisa bibliográfica: Levantamento teórico através de artigos acadêmicos disponíveis em plataformas como *SciELO*, *ScienceDirect*, repositórios universitários, periódicos nacionais e internacionais, bem como em banco de dados bibliográficos, como o *ResearchGate* e o *Google Scholar*, além da utilização de sites e documentos

governamentais e jornalísticos. Tal pesquisa utiliza-se da metodologia de pesquisa bibliográfica sistemática;

- Coleta e organização dos dados: caracterização dos componentes das baterias dos carros elétricos e o nível de emissão de CO₂ de cada componente;
- SIPOC: através da Ferramenta de Mapeamento de Processos SIPOC, será realizado um detalhamento dos componentes da bateria dos carros elétricos que apresentam lítio em sua composição, de forma que seja possível identificar como eles são obtidos dentro da cadeia de suprimentos;
- ACV e Análise Interpretativa: junção dos dados obtidos pela pesquisa bibliográfica e pelo SIPOC. Analisa-se os impactos ambientais causados pela extração e descarte desse componente e, por consequência, adotando uma abordagem da ACV interpretativa, apresenta-se a viabilidade da aplicação dos carros elétricos como alternativa na diminuição de CO₂ e poluentes gerados por veículos automotivos, de modo que essa utilização esteja alinhada com os acordos internacionais mencionados na etapa 2, avaliando, ainda, sua estruturação dentro da matriz energética brasileira.

Figura 9 – Fluxo metodológico



Fonte: Autores (2025).

3.1 Definição do Problema

A utilização dos carros elétricos como uma alternativa à emissão de combustíveis fósseis é uma pauta ambiental há muito comentada, sendo amplamente divulgada e apoiada por meio de políticas públicas que promovem essa troca. Todavia, quando se tem uma visão de toda a cadeia produtiva desses carros, alguns componentes, como a bateria, não possuem uma produção alinhada com os ideais de sustentabilidade.

3.2 Pesquisa Bibliográfica

A fundamentação teórica da pesquisa foi obtida através de técnicas bibliográficas sistemáticas. Sendo uma ferramenta utilizada para sintetizar as observações e análises de inúmeros estudos sobre determinado tema a fim de responder uma pergunta específica, neste trabalho foi conduzida valendo-se de artigos acadêmicos disponíveis em plataformas como *SciELO*, *ScienceDirect*, repositórios universitários, periódicos nacionais e internacionais, bem como em banco de dados bibliográficos, como o *ResearchGate* e o *Google Scholar*, além da utilização de sites e documentos governamentais e jornalísticos para o embasamento teórico.

Essas informações foram disponibilizadas dentro do Capítulo 2, e tem como objetivo fundamentar a pesquisa realizada e explicar, de forma didática, o conteúdo apresentado.

3.3 Coleta e Organização de Dados

É realizada a caracterização da bateria LFP por meio da identificação dos seus componentes. Através dessa identificação torna-se possível calcular, de forma estimada, as emissões de CO₂ de cada componente, destacando os que contém lítio em sua composição, devido ao seu impacto no ciclo de produção.

3.4 SIPOC

Com os componentes identificados, utilizando-se da Ferramenta SIPOC, é possível mapear o processo de obtenção, tratamento e preparo até que estejam aptos para o uso. Dentro dessa etapa é feito o detalhamento dos fornecedores de insumos, recursos utilizados, etapas dentro da atividade, produtos gerados e clientes envolvidos em toda a cadeia produtiva.

3.5 ACV e Análise Interpretativa

Com a junção dos dados coletados através do SIPOC e dados secundários, é realizada uma Análise do Ciclo de Vida da bateria dos carros elétricos. Por adotar uma abordagem do ACV interpretativo, inspirando-se em Porzio et al. (2021), não foram utilizados softwares de

modelagem, baseando-se na interpretação sistemática dos dados disponíveis, conforme sugerido em diretrizes como ISO14040/1444. Dessa forma, com os componentes identificados, é possível averiguar os impactos ambientais causados durante a obtenção dos recursos necessários, a montagem e o descarte.

Com todos os dados obtidos, em comunhão com os ideais apresentados pela UNFCCC e pela Agenda 2030 da ONU, é realizada a análise da viabilidade da utilização dos carros elétricos como uma alternativa alinhada aos ideais de sustentabilidade veicular.

Por fim, é avaliado o impacto dos carros elétricos dentro da matriz energética brasileira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A sustentabilidade da bateria dos carros elétricos é construída através de múltiplos fatores dentro de seu ciclo de vida, iniciando do processo de extração de matéria prima até o reuso nas chamadas “segundas vidas”. Essa seção apresenta uma análise dos pontos chave das métricas sustentáveis envolvendo “pegada de carbono”, uso de energia elétrica, emissões geradas, ritmo de degradação do meio e eficiência de reciclagem dos componentes.

4.1 Caracterização da Bateria LFP

4.1.1 Identificação dos componentes

Conforme identificado anteriormente no item 2.7, a bateria de LFP é composta a priori pelo cátodo de LiFePO_4 , sendo seguido pelo ânodo de grafite, eletrólito, separador, coletores de corrente e sistemas auxiliares. Avançando por essa estrutura, cada componente teve suas massas apresentadas e foram relacionados às suas respectivas emissões em Potencial de Aquecimento Global (GWP), através do inventário de componentes conforme a Tabela 2.

4.1.2 Análise de emissões de CO_2

Seguindo a abordagem baseada em dados secundários, para a caracterização da bateria LFP foi realizado um inventário de massa dos componentes fundamentado pelo estudo de Cai et al (2024) que estima, a partir da simulação de Monte Carlo, a participação, em porcentagem, de cada material constitutivo em células LFP.

Em complemento, o estudo de Porzio et al (2021) contribuiu para o ajuste de proporção de eletrólito e separador. Para informações sobre a composição elementar das baterias LFP em fim de vida, também referida como *black mass*, o estudo de Rumpf et al (2023) foi utilizado.

A adequação do fator aplicado se deu pelo fator de correção que considera a razão da intensidade média ponderada de emissões da matriz energética brasileira com a global, conforme dados obtidos no relatório (BEN, 2025).

Através da coleta dos dados, explicitada anteriormente, foram extraídos os dados de emissões diretas e indiretas, sendo fornecidos valores médios de emissão apresentados em quilogramas de CO₂ equivalente por unidade.

Para encontrar os valores utilizados para o fator de emissão de cada componente, foram considerados dados de estudos internacionais e adaptados para o cenário da Matriz Energética Brasileira. A adequação do fator aplicado se deu pelo fator de correção que considera a razão da intensidade média ponderada de emissões da matriz energética brasileira com a global. A partir desse cálculo foi encontrado um fator de correção que, quando aplicado aos dados coletados, obtém-se os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Inventário de componentes

Componente	% em massa na célula	Massa (kg)	Fator de emissão (kg CO₂e/kg)	GWP (kg CO₂e/kg)
Pasta do cátodo (LiFePO ₄ + ligante + condutor)	17,50%	46,41	6	324,87
Coletor do cátodo (Al)	2,20%	5,9	5	35,4
Pasta do ânodo (grafite + ligante + aditivo)	7,60%	20,15	8	201,5
Coletor do ânodo (Cu)	10,20%	27,08	4	108,32
Separador	1%	2,65	2	5,3
Eletrólito (LiPF ₆ + solventes)	7,30%	19,34	12	232,08
Outros materiais	30,60%	81,22	5	406,1
Sistema térmico	8,20%	21,72	6	130,32
Estrutura da bateria	12,30%	32,57	5	162,85
BMS + Chicotes	3,10%	8,14	12	97,68
Total do pack (38kWh)	100%	265,18		1704,42

Fonte: Adaptado de Cai et al. (2024); Porzio et al. (2021); Rumpf et al. (2023).

Para a pasta do cátodo são reportadas emissões entre 6 e 9kg CO₂e/kg (Dunn et al., 2014). Para o coletor do cátodo estudos apontam emissões de 14 a 16kg CO₂/kg no cenário global, enquanto no nacional a estimativa é de 5kg CO₂/kg devido ao uso de energia hidroelétrica e reciclagem do Al (IEA, 2021).

Tanto para o separador, BMS e chicotes, quanto para o eletrólito, os dados utilizados foram os expostos por Porzio et al (2021) e Majeu-Bettez et al (2021). Todavia, por se tratar de componentes importados, não sofreram influência da Matriz Energética Nacional.

Com a adequação de dados realizada, realizou-se o cálculo do produto da massa com o fator de emissões, originando os dados de GWP.

Com os dados de emissões tabelados acima, foi possível identificar que, dentro da delimitação deste estudo, os componentes que apresentam maior índice GWP são: a Pasta do Cátodo (LiFePO_4) e o Eletrólito (LiFP_6), ambos os componentes que apresentaram lítio em sua composição. Estes componentes juntos representam cerca de 33,6% das emissões totais da bateria apesar de apresentarem apenas 24,8% da massa total da bateria.

4.2 SIPOC

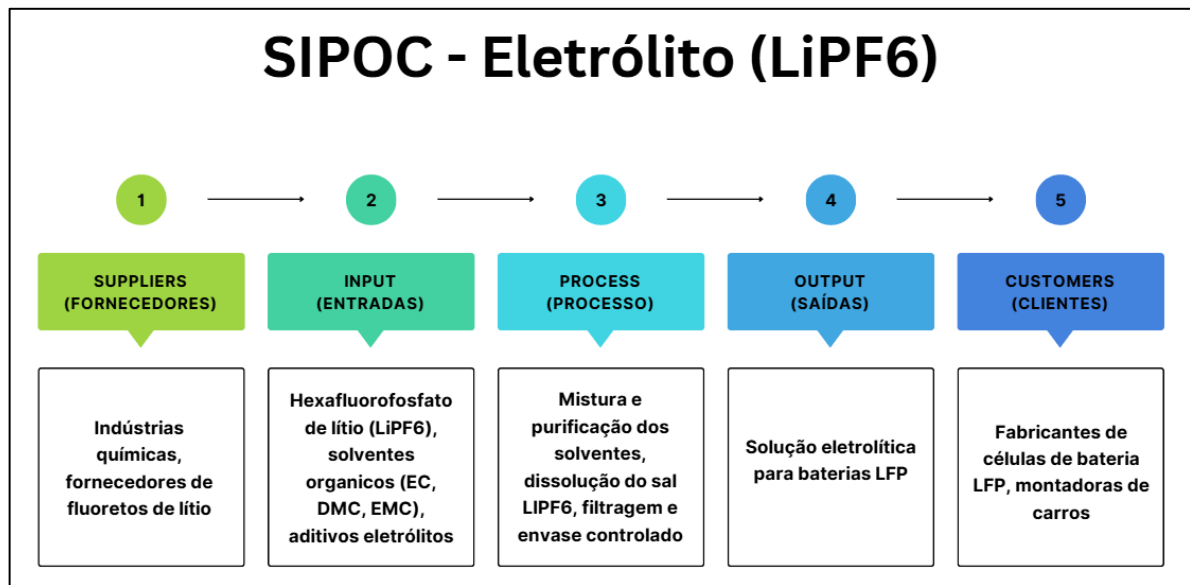
A identificação dos componentes da bateria LFP viabilizou a separação dos sistemas em seus principais elementos, cátodo, ânodo e eletrólito, permitindo compreender suas funções e constituição. No entanto, apenas essa compreensão da composição não é suficiente para analisar os impactos ambientais associados a cada componente, sendo necessário compreender como e quais são os processos de fabricação, transformação e descarte destes materiais. Por isso, a ferramenta SIPOC foi aplicada como uma forma de analisar estes processos.

Através dos conceitos da engenharia reversa, o SIPOC foi estruturado mapeando os principais fornecedores, insumos, processos, produtos e clientes de cada etapa do ciclo de vida do componente, com ênfase nos componentes que apresentam lítio em sua composição e exercem maior influência sobre as emissões de poluentes.

4.2.1 SIPOC Eletrólito

A cadeia produtiva do eletrólito é altamente dependente de processos químicos e importação de insumos, causando diversos impactos ambientais que foram explorados mais detalhadamente através do SIPOC do componente demonstrado na Figura 10:

Figura 10 – SIPOC do Eletrólito



Fonte: adaptado de Bawankar et al. (2023).

De acordo com Dunn et al. (2014), a maioria dos fornecedores de insumos para a produção possuem localidade no continente asiático, destacando países como China, Japão e Coreia do Sul. Em decorrência disso, as atividades correspondentes à primeira etapa do SIPOC são compostas por emissões indiretas, relacionadas ao transporte do material.

Na etapa seguinte, destacam-se a utilização de fluoretos e solventes orgânicos, como carbonato de etileno e dimetil carbonato, derivados do petróleo que apresentam alto potencial de toxicidade. Esses derivados são responsáveis por emissões chamadas de fugitivas, aumentando a geração de resíduos perigosos que devem ser controlados adequadamente a fim de evitar incidentes (Llamas-Orozco et al., 2023).

Durante o processo de componentes, que ocorre na terceira fase, há a síntese do LiPF6 pelo processo de fluoração, com posterior dissolução nos solventes orgânicos. É caracterizada por ser energeticamente intensiva, exigindo o controle de condições, como baixa umidade e atmosfera controlada, impactando diretamente o consumo energético.

A penúltima etapa, denominada “Output”, demonstra a obtenção do eletrólito para montagem na célula da bateria. Porém, no decorrer do processo, há a saída de efluentes químicos que exigem tratamento especializado, uma vez que facilmente se decompõem em

ácido fluorídrico. Tal composto químico se torna altamente reativo e solúvel em água, formando névoas ácidas associadas a chuva ácida e corrosão de materiais. Ainda, apresenta altos riscos à saúde humana, podendo reagir com os minerais disponíveis no corpo humano, como o cálcio e o magnésio, causando necrose e hipocalcemia (Jorges et al., 2023).

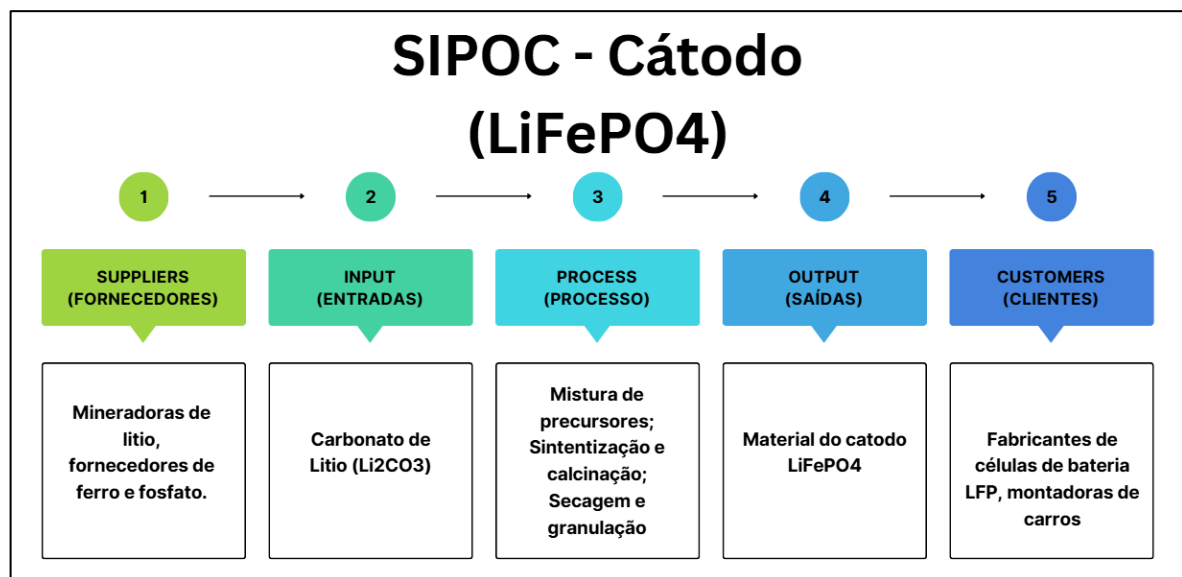
A última parte do SIPOC se assemelha à primeira, as fábricas de células e montadoras não se encontram dentro da cadeia nacional. Com isso, o fornecimento do componente final é submetido ao processo de importação de forma quase integral, caracterizando-se pelas emissões indiretas de GEE e poluentes dentro da logística de transporte (Massali et al., 2020).

De acordo com Franzoni (2022), em termos ambientais, a origem fóssil e complexidade do processo químico envolvido, demonstram que o eletrólito é um componente crítico dentro da bateria de LFP, entrando em atrito com o que é pautado dentro das ODS 12 e 15.

4.2.2 SIPOC Cátodo

O SIPOC do cátodo, apresentado na Figura 11, mostra uma cadeia produtiva mais consolidada, evidenciando um potencial maior de internalização do processo nacionalmente.

Figura 11 – SIPOC do Cátodo



Fonte: adaptado de Bawankar et al. (2023).

Na primeira etapa do processo estão as mineradoras e empresas responsáveis pela extração e refino dos minerais, sendo eles o lítio, ferro e fosfato, utilizados como matéria prima do composto. No cenário nacional, estudos apontam que o Brasil possui cerca de 45 mil toneladas de lítio, sendo capaz de suprir boa parte da demanda interna. (Sousa, 2023).

A etapa seguinte inclui o carbonato de lítio (Li_2CO_3) como principal componente, apresentando alta necessidade de energia elétrica e térmica para sintetização do material. Este processo exige altas temperaturas, acima de 650°C , sendo uma etapa intensiva em energia e emissões de CO_2 associadas. A entrada desse componente é compartilhada com a fase de processo devido a sintetização (Botejara-Antúnez et al., 2024).

O “*Process*” envolve a mistura dos precursores químicos que formam o composto cristalino LiFePO_4 , seguindo para moagem e adição de condutores de carbono para melhor desempenho do cátodo. Os resíduos gerados nessa etapa, tanto sólidos quanto pós-metálicos, apresentam riscos à saúde humana e ao solo caso o tratamento adequado não seja realizado.

A fase de “*Output*” há a emissão da pasta de cátodo, já pronta para utilização nos coletores de alumínio, além de alguns subprodutos e emissões de CO_2 . Estes subprodutos apresentam grande potencial de reciclagem, podendo reduzir, por meio dos créditos, em até 40% as emissões provindas dessa etapa como um todo.

A última fase do SIPOC tem como “*Customers*” as fabricas de células e montadoras dos carros, que realizam os processos de montagem dos módulos. Essa fase, embora seja a última, é a de maior influência no ciclo de vida da bateria, uma vez que é onde se define a demanda necessária, eficiência energética e estratégia de descarte/reciclagem. No cenário nacional, como a estrutura ainda está em crescimento, o destaque dessa fase são as montagens de *packs* e integração dos sistemas, sendo o principal desafio a ausência de fornecedores nacionais de cátodo, implicando na importação do LiFePO_4 (BEN, 2024).

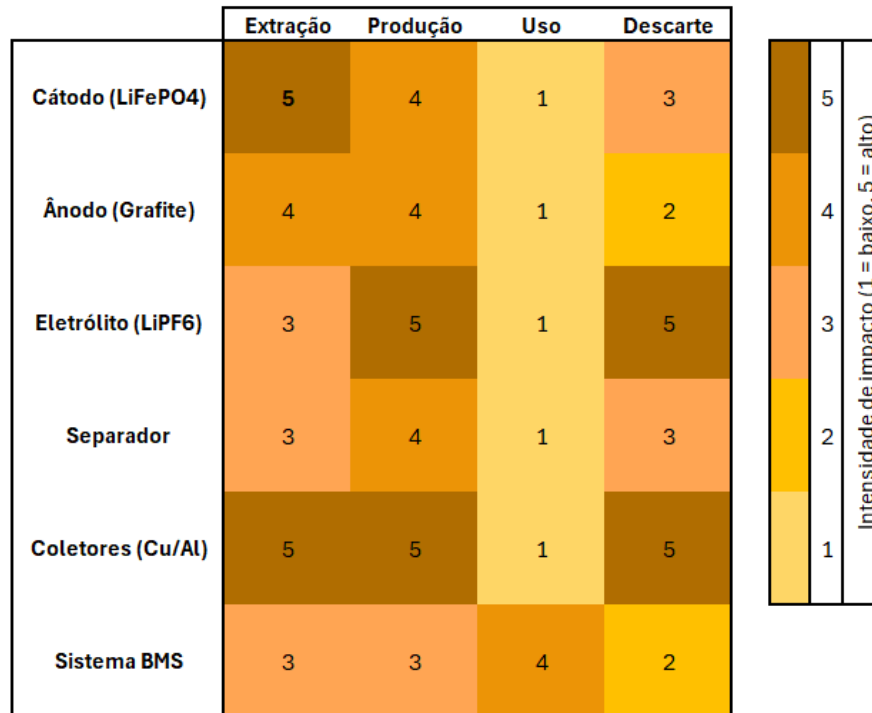
4.3 ACV

4.3.1 Emissões de Extração e Fabricação

A abordagem interpretativa da ACV permite, através da identificação dos componentes, presente no tópico 4.1.1, analisar como cada componente se relaciona com as fases do ciclo de vida e quais os pontos críticos de impacto ambiental.

Para tal análise a matriz de intensidade dos impactos por fase da ACV, apresentada na Figura 12, mostra que os pontos críticos de impacto são na fase de extração e fabricação dos componentes.

Figura 12 – Matriz Visual de Impactos Ambientais



Fonte: Adaptado de Porzio et al. (2023); Dai et al. (2022); BEN (2025).

A matriz de intensidade auxilia a verificação de forma integrada da conexão entre os elementos da bateria e as etapas do seu ciclo de vida, sendo perceptível que os maiores impactos ocorrem nas fases de extração e fabricação. É possível destacar o cátodo (LiFePO₄), o eletrólito (LiPF₆) e os coletores (Cu/Al) como os componentes mais relevantes na fase de extração e produção, justamente por conta da mineração e do processamento que requerem um consumo elevado de energia e índices elevados de emissões de CO₂.

Estes dados encontrados são compatíveis com pesquisas de ACV em contextos globais, que destacam as fases iniciais como as mais críticas para o desempenho ambiental das baterias. Desse modo, de acordo com o SIPOC, tem-se como fase inicial os “*Suppliers*”, onde ambos componentes, cátodo e eletrólito, possuem lítio em sua composição.

No âmbito global, a mineração do lítio vem sendo tratada como uma solução estratégica para a substituição dos combustíveis fósseis, todavia a extração do minério causa diversos outros impactos ambientais que não são tão amplamente comentados (Santana, 2025).

Essa extração pode resultar na degradação do solo, escassez de água, perda de biodiversidade, danos aos ecossistemas locais além do aumento do aquecimento global (Augusto, 2023). No Brasil, já é possível observar os impactos sociais e ambientais da mineração do lítio no Vale do Jequitinhonha, localizado no Estado de Minas Gerais. Dentre as implicações observadas tem-se: destruição da paisagem, consumo excessivo de água,

desmatamento, desaparecimento de fauna e flora local, ressecamento de nascentes, entre outras problemáticas (Oliveira, 2024).

Uma das principais questões relacionadas ao lítio é o alto consumo de água, sua extração requer grandes quantidades desse recurso, fato que pode sobrecarregar os recursos hídricos além de afetar negativamente os ecossistemas aquáticos (Santana, 2025). Ainda, a mineração e o processamento do lítio apresentam liberações de químicos tóxicos, como ácidos e solventes, que podem contaminar tanto o solo e a água, quanto a saúde dos trabalhadores da indústria.

Tais problemáticas entram em conflito com o que é proposto dentro das ODS 12 e 15, uma vez que esses objetivos têm como foco o manejo correto de produtos químicos e a proteção do solo, respectivamente. A extração do lítio causa impactos significativos no local em que atua, tendo em vista que, ainda, não há um tipo de mineração sustentável, dessa forma, com o aumento da demanda do lítio, há a possibilidade dessas ODS serem cada vez menos atendidas.

4.3.2 Emissões durante o uso

Conforme fundamentado no item 2.8 do capítulo 2, a Matriz Energética Brasileira apresenta características mais renováveis, portanto as emissões geradas durante o uso dos carros são calculadas de acordo com a participação de cada fonte, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Participação de cada fonte na Matriz Energética Brasileira

Fonte	Participação (%)	Fator de Emissão (kg CO₂/kWh)	Contribuição (kg CO₂/kWh)
Hidrelétrica	56,20%	0,004	0,00224
Eólica	14,70%	0,005	0,000735
Solar	9%	0,005	0,00045
Outros renováveis ¹	8,40%	0	0
Gás natural	6%	0,49	0,0294
Carvão / Óleo combustível	3%	1,3	0,0255
Total	97,10%		0,058325

1: Biomassa e pequenas centrais

Fonte: BEN (2025).

Essa média de intensidade média ponderada, de aproximadamente 0,058kg CO₂/kWh, é quase 8 vezes menor que a média global, considerando a Tabela 4 pode-se observar que, apesar das perdas de cargas na rede, as emissões durante o uso são consideradas baixas e bem menores que no restante do mundo.

Tabela 4 – Emissões durante o uso de LIB de 38kWh

Métrica (85% de eficiência)	Energia Utilizada (kWh)	Emissões BR (kg CO2)	Emissões Global (kg CO2)
Carga completa (38kWh)	44,71	2,59	20,12
140W/h por 100km	16,47	0,96	7,41
160W/h por 100km	18,82	1,11	8,47
180W/h por 100km	21,18	1,23	9,53

Fonte: BEN (2025); IEA (2025); NREL (2024).

Levando em consideração que carros que utilizam uma bateria de 38kWh apresentam autonomia de 280km por carga, predominantemente uso urbano e com limitação de infraestrutura de recarga, com uma média de rodagem de 12.000km a 15.000km por ano e uma vida útil de 10 a 12 anos, tem-se ao final uma média de 120.000km a 180.000km de rodagem (Nguyen-Tien, 2024).

A fim de contemplar as emissões de vida útil, utiliza-se como métricas a média do caso “160Wh/km, 85% de eficiência de carga”, obtendo os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Emissões estimadas durante o uso

Rodagem do veículo	Emissões Nacionais Estimadas	Emissões Globais Estimadas
1km	0,011kg CO2e	0,085kg CO2e
10.000km	111kg CO2e	850kg CO2e
150.000km	1.650kg CO2e	12.750kg CO2e

Fonte: BEN (2025); IEA (2025); NREL (2024).

Dessa forma é possível observar que, durante a vida útil, um carro elétrico emite cerca de 1.650kg de CO2e considerando o cenário nacional contra 12.750kg de CO2e emitidos no cenário global. Resumindo, um mesmo modelo de VE quando transitando no Brasil gera, em média, cerca de 13% das emissões estimadas no cenário global.

Dessa maneira, fazendo um paralelo com o Acordo de Paris e as metas internacionais de descarbonização, dentro da Matriz Energética Brasileira, os carros elétricos se apresentam como uma opção sustentável durante sua utilização. Contudo, apesar do cenário brasileiro se mostrar mais sustentável que o cenário global, problemáticas envolvendo a estrutura do país para gerenciar uma maior demanda de VEs precisam ser consideradas.

4.3.3 Emissões de Descarte e Reciclagem

Para melhor entendimento, esta seção foi baseada em 2 diferentes cenários de fim de vida que ocorrem dentro do Brasil atualmente. O primeiro cenário contempla o descarte inadequado em aterros uma vez que a reciclagem nacional de íons lítio ainda é experimental. Neste cenário, não há recuperação de metais e a estimativa é de que as emissões atinjam mais de 570kg CO₂ por bateria devido aos riscos de lixiviação do lítio, fósforo e manganês. Além disso, os potenciais de incêndio ou explosão aumentam devido ao armazenamento incorreto.

Para o segundo cenário considera-se a exportação para reciclagem, através de logística reversa, onde ocorre cerca de 40 a 50% de recuperação de materiais (Jiang et al., 2022; Moreira et al., 2024). Como visto no tópico 2.7.1, a reciclagem das baterias pelo processo de pirolise envolvem etapas de pré-tratamento, sendo elas: a descarga das baterias, desmontagem e separação (Kim et al., 2021).

A etapa de descarga das baterias é crucial para evitar incêndios ou explosões com a energia residual e, para isso, existem alguns métodos que podem ser utilizados para essa descarga, como soluções salinas, curtos-circuitos, descargas ácidas e alcalinas e criogenia (Yu et al., 2021). Os métodos de solução salina, bem como as descargas ácidas e alcalinas, têm potencial para danificar a embalagem da bateria, trazendo um risco ambiental e contaminação da solução com a possibilidade do vazamento do eletrólito. A descarga via curto-circuito gera gases tóxicos, além da necessidade de um sistema de resfriamento para a grande energia liberada. Por fim, o método mais seguro é a criogenia, que consiste na desativação das baterias ao imergi-las em soluções como nitrogênio líquido, porém se trata de um método caro que requer equipamentos específicos (Yu et al., 2021).

Em seguida ocorre a desmontagem da bateria, geralmente feita de forma manual. Durante esse processo há riscos ambientais, como o processo de fuga térmica, onde há a geração de subprodutos gasosos tóxicos, como o gás HF (Harper et al., 2019; Nedjalkov et al., 2016).

Por fim, com a separação do material metálico do não-metálico, é possível seguir para o tratamento de pirolise, todavia, esse tipo de reciclagem dá prioridade para os componentes metálicos, os componentes plásticos, assim como o eletrólito, ainda precisam ser descartados.

Todo o processo de gerenciamento, seja do descarte ou da reciclagem, é avaliado dentro das exigências do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) que solicita, para baterias, o Cadastro Técnico Federal (CTF) e o Relatório Anual de Atividades (RAPP). Tal solicitação é baseada nos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010, que obriga a logística reversa de baterias por parte dos fabricantes

e distribuidores, e na resolução CONAMA 401/2008, que regula o gerenciamento da destinação ambientalmente correta.

Resumindo, dentro dos dois cenários apresentados, descarte ou reciclagem, há problemáticas ambientais envolvendo as baterias. Seja em um descarte incorreto que pode contaminar o solo ou na reciclagem que apresenta processos que emitem CO₂ e outros poluentes, além de não ser um processo que abrange todos os componentes da bateria.

4.4 Discussão

Com o visto anteriormente, o crescimento da frota de carros elétricos no cenário brasileiro representa uma oportunidade sustentável em determinado momento, uma vez que a matriz energética nacional apresenta elevada participação de fontes renováveis. Todavia, conforme citado no tópico 4.3.2, apesar dessa sustentabilidade ser demonstrada, há outros aspectos que precisam ser analisados, como a estruturação interna do país.

Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), o Brasil possui atualmente cerca de 5.500 pontos de recarga públicos que se localizam principalmente nas regiões Sul e Sudeste, valendo-se do dado de que existem aproximadamente 59 veículos para cada ponto de recarga, o que atualmente exigiria uma expansão de 5 vezes o número de pontos de recarga para adequar-se ao padrão sugerido pela IEA, sendo um ponto de recarga para cada 10 VE em circulação.

Outro ponto é a gestão da demanda, o carregamento concentrado em horários de pico, das 18h às 21h, gera um maior uso de usinas térmicas a gás, elevando o custo da energia e o nível de emissões emitidas em até 30%. Tal fato já se pode ser observado em regiões residenciais de maior concentração de carros elétricos, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) há uma sobrecarga dos transformadores devido aos picos localizados.

Ainda, os órgãos que gerenciam a matriz elétrica apontam a necessidade de futuros reforços na rede de transmissão a fim de evitar gargalos com a crescente demanda. Com a concentração da geração eólica nas regiões Nordeste e Centro-Oeste e a concentração de carros elétricos na região Sudeste, há a possibilidade de ser necessário subestações adicionais, além da atualização tecnológica de transformadores para atender a demanda localizada (ONS, 2024).

Ademais, apesar da matriz energética ser considerada majoritariamente renovável, com a maior contribuinte sendo a energia hidrelétrica, a dependência hidrológica, bem como o risco de sobrecarga em horários de pico e a ausência de política atuais e consolidadas de integração tecnológica, como o *Vehicle to Grid* (V2G), podem acarretar maiores impactos, tanto ambientais quanto econômicos, durante a transição dos VE.

Além das questões envolvendo a estrutura do país para atender a crescente demanda, o capítulo de resultados exhibe que cada etapa dentro do ciclo de vida apresenta seu impacto de forma significativa a longo prazo, sucedendo as fases de fabricação e descarte as mais críticas por apresentarem altos índices de emissões e poucos estudos aplicados a fim de mitigar ou evoluir estes processos, ou seja, são as etapas com maior oportunidade de melhoria.

As etapas de fabricação e descarte das baterias evidenciam impactos ambientais relevantes, os quais entram em conflito com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e com as diretrizes estabelecidas pelo Acordo de Paris. A mineração do lítio, por exemplo, apresenta elevados índices de poluição e degradação do solo, contrapondo-se ao ODS 15, além de gerar expressivas emissões de CO₂, o que se mostra incompatível com as metas globais de descarbonização.

No que se refere à reciclagem, quando realizada de forma inadequada, essa etapa pode ocasionar prejuízos significativos aos ecossistemas locais, contrariando o que é proposto dentro do ODS 12 e 15. Contudo, mesmo quando conduzida de maneira adequada, conforme analisado no tópico 4.3.3, o processo de pirólise resulta na emissão de CO₂, o que, a longo prazo, compromete os avanços esperados no âmbito do Acordo de Paris.

Dessa forma, para que a utilização dos carros elétricos seja vista como realmente sustentável, algumas medidas públicas devem ser tomadas, como por exemplo: a adoção de matrizes de energia renováveis para o abastecimento dos veículos, incentivos a pesquisas de reciclagem de LIB afim de que mais componentes consigam entrar no conceito de economia circular, além de formas de mitigar e/ou compensar os impactos causados pela mineração dos componentes utilizados nas baterias.

5 CONCLUSÃO

Através da abordagem adotada foi possível explicitar diversos desafios ambientais que devem ser superados para que a transição veicular seja realizada com menor impacto possível. A utilização em conjunto de ferramentas como o SIPOC e a ACV permitem que se tenha uma visão mais ampla de todo o ciclo de vida do produto, sendo possível analisar e discutir os impactos ambientais causados em cada etapa do processo.

A identificação dos componentes da bateria permitiu uma melhor compreensão sobre a complexidade do sistema, que cerca a interação entre diversos materiais como o lítio, ferro e fósforo. Esta etapa possibilitou a caracterização dos impactos ambientais associados ao longo do ciclo de vida da bateria, facilitando o mapeamento dos processos através do SIPOC.

Dessa forma, torna-se possível conceber uma análise crítica acerca da viabilidade ambiental dos carros elétricos, considerando o conceito de sustentabilidade alinhado com as metas internacionais. Conforme discutido no capítulo 4, analisa-se que a cadeia produtiva das baterias envolve uma série de implicações ambientais, abrangendo desde a logística de transporte e a extração de matérias-primas até o processamento e reciclagem dos componentes. Tais fatores demonstram que, embora os carros elétricos apresentem reduções significativas nas emissões de poluentes durante o uso, a transição para essa tecnologia ainda não é plenamente sustentável, tendo em vista os diversos impactos ambientais associados às etapas de produção e descarte.

Finalmente, a análise da influência da matriz energética brasileira destacou que a grande participação de fontes renováveis reduz de forma significativa as emissões associadas ao uso e produção dos carros elétricos. Porém alguns desafios estruturais também foram evidenciados em relação a inconstância e a ampliação da geração de energia renovável. No cenário nacional, o desempenho ambiental das baterias LFP durante o uso demonstrou ser favorável, contribuindo com as metas de descarbonização previstas no Acordo de Paris e nas ODS.

Com isso, considerar os carros elétricos como “zero emissões” se torna uma falácia, uma vez que tal afirmativa só envolve uma etapa de todo o ciclo de vida do produto. A sustentabilidade proposta pelos carros elétricos abrange somente um aspecto, sua utilização, com isso, apesar de ainda serem uma possibilidade para a descarbonização do setor automotivo, precisam passar por processos de reestruturação dentro do seu ciclo de vida a fim de se tornarem realmente sustentáveis dentro de um aspecto geral.

5.1 Limitações de Pesquisa

No decorrer do desenvolvimento deste estudo, alguns desafios foram enfrentados, contudo, algumas limitações mostraram-se mais expressivas que outras. Observou-se que a maioria das pesquisas relacionadas às emissões concentra-se no cenário europeu, tornando-se necessária a conversão e adequação dos dados para o cenário brasileiro, destacando a ausência de dados primários para compor o projeto.

Além disso, identificou-se uma carência acadêmica de produções que estabeleçam uma correlação entre os carros elétricos e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Soma-se isso a escassez de informações acerca dos processos de reciclagem de alguns componentes da bateria, como os eletrólitos.

Dessa maneira, algumas seções deste trabalho apresentaram limitações mais expressivas, principalmente em termos de disponibilidade de fontes e disponibilização de dados, restringindo a amplitude de determinadas análises.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados apresentados, algumas sugestões podem ser consideradas para trabalhos futuros. Recomenda-se a ampliação da análise incluindo a matriz energética de outros países, possibilitando comparações entre diferentes realidades e contexto socioeconômico, além de ser possível identificar como uma matriz que não é composta por energias renováveis se comporta dentro da transição veicular.

Também seria relevante aprofundar o estudo sobre os impactos ambientais dentro da reciclagem dos componentes, além de abranger outros métodos e tecnologias de reciclagem. Sugere-se, ainda, a expansão da ACV para todos os demais componentes de um veículo elétrico, como as partes estruturais e eletrônicas.

Por fim, destaca-se a importância de avaliar os possíveis efeitos de um aumento da demanda global de carros elétricos, considerando a disponibilidade de recursos naturais e estrutura global para atender o aumento de volume.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL UWAIMRI, A. *Measuring the Impact of Apply Reverse Engineering Approach to Production Cost Reduction on The Economic Growth*. *International Journal of Economics Development Research (IJEDR)*, v. 6, n. 2, p. 608–625, 2025. DOI: 10.37385/ijedr.v6i2.4595. Disponível em: <https://journal.yrpiipku.com/index.php/ijedr/article/view/4595>. Acesso em: 13 oct. 2025.

AQEEL, Anas Bin; AZIZ, Muhammad Irfan; ZAMAN, Uzair Khaleeq Uz; AAFAQ, Nayyer. *Reverse Engineering: Past, Present, and Future Prospects*. *Handbook of Manufacturing Systems and Design: An Industry 4.0 Perspective*. Taylor & Francis, p. 34, 2023. DOI:10.1201/9781003327523-19. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372787054_Reverse_Engineering_Past_Present_and_Future_Prospects. Acesso em: 12 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2641>. Acesso em: 12 out. 2025.

AUGUSTO, M. **Planeta Cultura: uma janela para o mundo. Cientistas alertam para impactos ambientais causados pela extração de lítio. Principal componente das baterias usadas em carros elétricos, o lítio é outro vilão do meio ambiente**. 2023. Disponível em: <https://portalplanetacultura.com.br/artigos/cientistas-alertam-para-impactos-ambientais-causados-pela-extracao-de-litio/>. Acesso em: 17 out. 2025

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

BERMÚDEZ-RODRÍGUEZ, Tatiana; CONSONI, Flávia Luciane. **Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos**. *Revista Brasileira de Inovação*, V.19, p.1-33, 2020. DOI:10.20396/rbi.v19i0.8658394. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8658394>. Acesso em: 12 out. 2025.

BJERRE-CHRISTENSEN, Nanna ; ERIKSEN, Caroline Nirkso; SYLVESTER-HVID, Kristian Oluf; RAVNSBAEK, Dorthe Bomholdt. *Characterization of Industrial Black Mass from End-of-Life LiFePO₄-Graphite Batteries*. *Batteries*, 2025. DOI: 10.3390/batteries11060210. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/6/210>. Acesso em: 12 out. 2025.

BOTEJARA-ANTÚNEZ, Manuel; PRIETO-FERNÁNDEZ, Alejandro; DOMÍNGUEZ, Jaime González; BARROSO, Gonzalo Sánchez; CALCEDO, Justo García Sanz. *Life cycle assessment of a LiFePO₄ cylindrical Battery*. *Environmental Science and Pollution Research*, v.31, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-32543-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-32543-3>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Fontes renováveis atingem 49,1% na matriz energética brasileira**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.htm>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Efeito estufa e aquecimento global**. Disponível em: [https://antigo.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global.html#:~:text=Gases%20de%20efeito%20estufa,-H%C3%A1%20quatro%20principais&text=%2D%20O%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20\(CO,mudan%C3%A7a%20no%20uso%20da%20terra](https://antigo.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global.html#:~:text=Gases%20de%20efeito%20estufa,-H%C3%A1%20quatro%20principais&text=%2D%20O%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO,mudan%C3%A7a%20no%20uso%20da%20terra). Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. **Pilhas e baterias**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/pilhas-e-baterias>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto302/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Presidente Lula sanciona lei que cria o Programa de Aceleração da Transição Energética**, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2025/01/presidente-lula-sanciona-lei-que-cria-o-programa-de-aceleracao-da-transicao-energetica>. Acesso em: 12 out. 2025.

BROADBENT, Gail Helen; DROZDZEWSKI, Danielle; METTERNICHT, Graciela. *Electric vehicle adoption: an analysis of best practice and pitfalls for policy making from experiences of europe and the us: An analysis of best practice and pitfalls for policy making from experiences of europe and the US*. *Geography Compass*, v. 12, n. 2, p. 146, 2017. DOI:10.1111/gec3.12358. Disponível em: <https://compass.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gec3.12358>. Acesso em: 12 out. 2025.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, n. 1606, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2011. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

CETESB. **Emissão veicular. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>. Acesso em: 12 out. 2025.

CLARO, Priscila Borin de Oliveira; CLARO, Danny Pimentel; AMÂNCIO, Robson. **Entendendo o conceito de sustentabilidade nas organizações**. *Revista de Administração*, [S. l.], v. 43, n. 4, p. 289–300, 2008. DOI: 10.1590/S0080-21072008000400001. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rausp/article/view/44483>. Acesso em: 12 out. 2025.

COELHO FILHO, Osmar; SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; LUEDENNEM, Gustavo. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Texto para Discussão, n. 2205, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/cb87f233-07df-4ba6-8658-47e623ac5616/content>. Acesso em: 12 out. 2025.

CONVEÇÃO-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima. **Artigo 3**, 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/ccsites/zimbab/conven/text/art03.htm>. Acesso em: 12 out. 2025.

CONVEÇÃO-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima. **Artigo 4**, 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/ccsites/zimbab/conven/text/art04.htm>. Acesso em: 12 out. 2025.

DELGADO, Fernanda; COSTA, José Evaldo Geraldo; FEBRARO, Júlia; SILVA, Tatiana Bruce da. **CARROS ELÉTRICOS**. Cadernos FGV Energia, n. 7, 2017. ISSN 2358-5277. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/46244531-8932-42e2-8bf7-91caccfccc7e/content>. Acesso em: 12 out. 2025.

DOAN, Nguyen; DOAN, Huong; NGUYEN, Canh Phuc; NGUYEN, Binh Quang. ***From Kyoto to Paris and beyond: A deep dive into the green shift***. *Renewable Energy*, v. 228, 2024. DOI:10.1016/j.renene.2024.120675. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148124007432>. Acesso em: 12 out. 2025.

DUNN, Jennifer; JAMES, Christine; GAINES, Linda ; GALLAGHER, Kevin. ***Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries***. *Argonne National Laboratory*, 2014. Disponível em: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/11/108520.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

NGUYEN-TIEN, Viet; ELLIOT, Robert. ***A novel way to estimate car longevity shows that electric vehicles' life mileage is increasing fast***. Acesso em: 12 nov. 2025.

ETXANDI-SANTOLAYA, Maite; CASALS, Lluc Canals; MONTES, Tomás; CORCHERO, Cristina. ***Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity***. *Journal of Environmental Management*, v. 338, 2023. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.117814. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723006023?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=98dadf65bb63311f. Acesso em: 12 out. 2025.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **Situação atual: a energia está na base das ambições da Europa em matéria de clima**. 2023. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2022/artigos/situacao-atual-a-energia-esta>. Acesso em: 12 out. 2025.

FRANZONI, Marisa. **A reciclagem de baterias íon-lítio aliada aos ODS**. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cti/pt-br/publicacoes/producao-cientifica/seminario-pci/xii_seminario_pci-2022/pdf/seminario-2022_paper_18.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

FREITAS, Felipe Tomaz; MARCHESINI, Márcia Maria Penteado. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos**. PRODUTO & PRODUÇÃO, v. 23, n. 3, p. 1-20, 2022. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ProdutoProducao/article/view/121904/87321>. Acesso em: 12 out. 2025.

GANDRA, Alana. **Destino errado de bateria de carro elétrico põe em risco meio ambiente**. Agencia Brasil, 2023 Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-05/destino-errado-de-bateria-de-carro-eletrico-poe-em-risco-meio-ambiente>. Acesso em: 12 out. 2025.

GAO, Baoyun; YANG, Shoulan; PENG, Shitong. *Bayesian Monte Carlo-assisted life cycle assessment of lithium iron phosphate batteries production for electric vehicles under uncertainty*. *Green Manuf Open*, 2024. DOI: 10.20517/gmo.2024.092201. Disponível em: <https://www.oaepublish.com/articles/gmo.2024.092201>. Acesso em: 12 out. 2025.

GAO, Yun; GAO, Xiang; ZHANG, Xiaohua. *The 2 °C Global Temperature Target and the Evolution of the Long-Term Goal of Addressing Climate Change – From the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement*. *Engineering*, v. 3, p. 272-278, 2017. DOI: DOI:10.1016/J.ENG.2017.01.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917303077>. Acesso em: 12 out. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Editora Atlas, 4ª Edição, 2002. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf. Acesso em: 16 de out. 2025.

GLOBO. **Reino Unido antecipa proibição de carros a gasolina e diesel para 2030**. G1, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2020/11/18/reino-unido-antecipa-proibicao-de-carros-a-gasolina-e-diesel-para-2030.ghtml>. Acesso em: 12 out. 2025.

HARPER, G., SOMMERVILLE, R., KENDRICK, E., DRISCOLL, L., SLATER, P., STOLKIN, R., WALTON, A., CHRISTENSEN, P., HEIDRICH, O., LAMBERT, S., ABBOTT, A., RYDER, K., GAINES, L., & ANDERSON, P. (2019). ***Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles***. *Nature*, v. 575, p. 75–86, 2019. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5. Disponível em : <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 16 out. 2025.

IEA. ***Electricity 2025, Analysis and forecast to 2027***. IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>. Acesso em: 12 out. 2025.

IEA. ***The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions***. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 12 out. 2025.

INCA. **Ambiente, trabalho e câncer: aspectos epidemiológicos, toxicológicos e regulatórios**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva, 2021. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/publicacoes/livros/ambiente-trabalho-e-cancer-aspectos-epidemiologicos-toxicologicos-e-regulatorios>. Acesso em: 12 out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibict/pt-br/assuntos/informacao-cientifica/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>. Acesso em: 12 out. 2025.

IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate*. **IPCC Press Release**. IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/resources/press/press-release/>. Acesso em: 12 out. 2025.

JIANG, Songyan; HUA, Hui; ZHANG, Ling; LIU, Xuwei; WU, Huijun; YUAN, Zengwei. ***Environmental impacts of hydrometallurgical recycling and reusing for manufacturing of lithium-ion traction batteries in China***. *Science of The Total Environment*, v. 811, 2022. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.152224. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721073009?via%3Dihub>. Acesso em: 12 out. 2025.

JORGES, Eduardo Enrique Martinez; QUINTINO, António M. N.; SANTOS, Diogo. ***Economic analysis of lithium-ion battery recycling***. *AIMS Energy*, v. 11, p. 960-973, 2023. DOI:10.3934/energy.2023045. Disponível em: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/energy.2023045>. Acesso em: 12 out. 2025.

KILAVUZ, Esra. *Sustainable Lithium-Ion Battery Recycling: Challenges, Innovations, And Pathways to a Circular Economy*. *ACS Sustainable Resource Management*, 2025. DOI: 10.1021/acssusresmgt.5c00408. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssusresmgt.5c00408?ref=article_openPDF. Acesso em: 12 out. 2025.

KIM, S.; BANG, J.; YOO, J.; SHIN, Y.; BAE, J.; JEONG, J.; KIM, K.; DONG, P.; KWON, Kwoan. *A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling*. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126329. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621005497?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2025.

LEITE, Paulo André de Souza. **SCM (Gestão da Cadeia de Suprimentos) e Indústria 4.0**. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 6, p. 49639–49656, 2022. DOI:10.34117/bjdv8n6-335. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/49639/pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

LLAMAS-OROZCO, Jorge; MENG, Fanran; WALKER, Gavin; ABDUL-MANAN, Amir; MACLEAN, Heather; POSEN, Daniel; MCKECHNIE, Jon. *Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: A temporal, geographical, and technological perspective*. *PNAS Nexus*, v. 2, p. 361. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad361. Disponível em: <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/2/11/pgad361/7451193>. Acesso em: 12 out. 2025.

MAJEAU-BETTEZ, Guillaume ; HAWKINS, Troy R. ; STROMMAN, Anders Hammer. *Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles*. *Environmental Science & Technology*, v. 45, 2011. DOI:10.1021/es103607c. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es103607c>. Acesso em: 12 out. 2025.

MAKUZA, Brian; TIAN, Qinghua; GUO, Xueyi; CHATTOPADHYAY, Dawei Yu. *Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review*. *Journal of Power Sources*, v. 491, 2021. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229622. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775321001671>. Acesso em: 16 out. 2025.

MARCHI DE ALMEIDA, Ilton; MACHADO GERVASIO TELES, Glauca; DE BARROS GONSALEZ TAVARES, Thiago; MUNIZ JUNIOR, Jorge. **Cadeia de suprimentos sustentável, economia circular, indústria 4.0 e gestão do conhecimento: uma visão integrada de funcionamento.** *Exacta*, v. 22, n. 1, p. 144–173, 2022. DOI: 10.5585/exactaep.2022.21293. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/21293>. Acesso em: 12 out. 2025.

MONTEIRO, Robson. **Novas químicas de materiais para as baterias de lítio impulsionam o mercado de veículos elétricos.** *MIT Technology Review*. Disponível em: <https://mittechreview.com.br/novas-quimicas-de-materiais-para-as-baterias-de-litio-impulsionam-o-mercado-de-veiculos-eletricos/?srsrltid=AfmBOoppHLmnsFYiyLeXsgEozzmRQv0Tvx6cDEe6NvweTnvXzJHklcrx>. Acesso em: 12 out. 2025.

MOREIRA, Yago Henrique Barbosa; MANTEGAZINI, Diunay Zuliani; ANDRADE, George Ricardo Santana; BACELOS, Marcelo Silveira. **Reciclagem de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas.** *Brazilian Journal of Production Engineering*, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 10, n. 1, p. 36–52, 2024. DOI: 10.47456/bjpe.v10i1.42817. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42817>. Acesso em: 13 out. 2025.

MOSSALI, Elena; PICONE; Nicoletta, GENTILINI; Luca, RODRÍGUEZ, Olga; PÉREZ, Juan Manuel; COLLEDANI, Marcello. ***Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments.*** *Journal of Environmental Management*, v. 264, 2020. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110500. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720304345>. Acesso em: 12 out. 2025.

NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 12 out. 2025.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. ***Annual Technology Baseline, Battery Electric.*** NREL, 2024. Disponível em: https://atb.nrel.gov/transportation/2024/battery_electric. Acesso em: 12 out. 2025.

NEDJALKOV, Antonio; MEYER, Jan; KÖHRING, Michael; DOERING, Alexander; ANGELMAHR, Martin; DAHLE, Sebastian; SANDER, Andreas; FISCHER, Axel; SCHADE, Wolfgang. *Toxic gas emissions from damaged lithium ion batteries-analysis and safety enhancement solution*. *Batteries*, v. 2, p. 1–10, 2016. DOI: 10.3390/batteries2010005. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/1/5>. Acesso em: 12 out. 2025.

NTOMBELA, Mlungisi; MUSASA, Kabeya; MOLOI, Katleho. *A Comprehensive Review for Battery Electric Vehicles (BEV) Drive Circuits Technology, Operations, and Challenges*. *World Electric Vehicle Journal*, 2023. DOI: 10.3390/wevj14070195. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/7/195>. Acesso em: 12 out. 2025.

OLIVEIRA, Marina Paula. **O avanço da exploração do lítio no Vale do Jequitinhonha (MG) e a reprodução das desigualdades e dependências internacionais**. *Carta Internacional*, v. 19, n. 1, p. e1416, 2024. DOI: 10.21530/ci.v19n1.2024.1416. Disponível em: <https://www.cartainternacional.abri.org.br/Carta/article/view/1416>. Acesso em: 17 out. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Anual 2024**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relat%C3%B3rio%20Anual%20ONS%202024.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

PARLAMENTO EUROPEU. **Redução das emissões de carbono: objetivos e políticas da União Europeia**. 2024. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180305STO99003/reducao-das-emissoes-de-carbono-metas-e-politicas-da-ue#reduzir-as-emisses-dos-transportes-na-europa-3>. Acesso em: 17 out. 2025.

PEREIRA, Michele Morais O.; HENDRY, Linda C.; SILVA, Minelle E.; BOSSLE, Marília Bonzanini; ANTONIALLI, Luiz Marcelo. *Sustainable supply chain management in a global context: the perspective of emerging economy suppliers*. DOI:10.1108/RAUSP-05-2022-0141. Disponível em: <https://www.emerald.com/rausp/article/58/3/197/369372/Sustainable-supply-chain-management-in-a-global>. Acesso em: 12 out. 2025.

PONTES, Oziel de Medeiros; FIGUEIREDO, Fábio Fonseca. **CONFERÊNCIAS INTERNACIONAIS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: OUTRO MUNDO É POSSÍVEL?** HOLOS, v. 1, n. 39, 2023. DOI:

10.15628/holos.2023.12036. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12036>. Acesso em: 12 out. 2025.

PORZIO, Jason; SCOWN, Corinne. *Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials*. *Advanced Energy Materials*, v. 12, 2022. DOI: 10.1002/aenm.202100771. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202200477>. Acesso em: 12 out. 2025.

QUINCOZES, Vagner Ereno. **Engenharia Reversa e Análise de Malware**. Disponível em: <https://www.uniasselvi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=628493>. Acesso em: 12 out. 2025.

SANTANA, L. F.; MOREIRA, M. R. **OS IMPACTOS JURÍDICOS E SOCIOAMBIENTAIS DA EXPLORAÇÃO DE LÍTIO NO BRASIL**. REVISTA FOCO, [S. l.], v. 18, n. 6, p. e8792, 2025. DOI: 10.54751/revistafoco.v18n6-045. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/8792>. Acesso em: 17 out. 2025.

SILVA, Tiago Hennemann-Hilario da; SEHNEM, Simone. *Circular supply chains and Industry 4.0: an analysis of interfaces in Brazilian foodtechs*. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 23, n. 5, 2022. DOI:10.1108/RAUSP-05-2023-0079. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmj/a/fxzkFqJbKPGpLpHKThMXVPJ/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

SOUSA, Mauro Henrique Moreira. **A EXPLORAÇÃO DO LÍTIO NO VALE DO JEQUITINHONHA/MG**. Agência Nacional de Mineração, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/representantes-da-anm-participaram-de-audiencia-publica-nesta-quarta-feira-10-4/apresentacao-litio-jequitinhonha.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

SOUZA, Thais Assis de; PINTO, Guilherme Alcântara; ANTUNES, Luiz Guilherme Rodrigues; GRUTZMANN, André. *SIPOC-OI: a proposal for open innovation in supply chains*. *Innovation & Management Review*, v. 20, p. 76-93, 2023. DOI: 10.1108/INMR-12-2020-0182. Disponível em: <https://www.emerald.com/inmr/article/20/1/76/182037/SIPOC-OI-a-proposal-for-open-innovation-in-supply>. Acesso em: 17 out. 2025.

TELES, Raul Ribeiro; CAMPANHOLI, Gabriel Aurélio Cláudio; GRANJEIA, Gustavo da Silva; YAMAMURA, Murilo Augusto Nunes. **O USO DA FERRAMENTA SIPOC PARA**

O MAPEAMENTO DE PROCESSOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA. XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2021. Disponível em: <https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2021P18720A36280O5687.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. The Paris Agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 12 out. 2025.

UNITED NATIONS NEWS. OMS: 99% da população mundial respira ar “tóxico”. 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/03/1828507>. Acesso em: 12 out. 2025.

VICENTE, André de Albuquerque. **Bateria de íons de lítio: tecnologia atual, inovações e desafios tecnológicos.** CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/ciencia_tecnologia/acumuladores_energia/cbmm.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

VONBUN, Christian. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura.** Texto para Discussão, n. 2123, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2015. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/a202035c-b178-474e-ae9d-e53d5c0d1435/content>. Acesso em: 12 out. 2025.

WASEEM, Mohammad; LAKSHMI, G. Sree; AHMAD, Mumtaz; SUHAIB, Mohd. **Energy storage technology and its impact in electric vehicle: Current progress and future outlook.** *Next Energy*, v. 6, 2025. DOI: 10.1016/j.nxener.2024.100202. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X24001078>. Acesso em: 12 out. 2025.

YU, Dawei; HUANG, Zhu; MAKUZA, Brian; GUO, Xueyi; TIAN, Qinghua. **Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review.** *Minerals Engineering*, v. 173, 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107218. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687521004477?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2025.

BAWANKAR, Swapnil; DWIVEDI, Gaurav; NANDA, Ipseeta MACEDO, Victor Daniel Jiménez; KESHARVANI, Sujeet; MESHARAM, Kundan; JAIN, Siddharth; MISHA, Sachin;

SINGH, Varun Pratap; VERMA, Puneet. *Environmental impact assessment of lithium ion battery employing cradle to grave*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 60, 2023. DOI: 10.1016/j.seta.2023.103530. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138823005234>. Acesso em: 17 out. 2025.