

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

IGOR TEBALDI MIRANDA DA SILVA

**RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO: PROPOSTA DE MODELO
SUSTENTÁVEL PARA O CONTEXTO BRASILEIRO**

**Bagé
2025**

IGOR TEBALDI MIRANDA DA SILVA

**RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO: PROPOSTA DE MODELO
SUSTENTÁVEL PARA O CONTEXTO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S586r Silva, Igor Tebaldi Miranda da
Reciclagem de baterias de íon-lítio: proposta de
modelo sustentável para o contexto brasileiro / Igor
Tebaldi Miranda da Silva.
139 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA,
2025.
"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Reciclagem de baterias de íon-lítio. 2.
Mobilidade elétrica. 3. Economia circular. 4. Logística
reversa. 5. Recuperação de metais críticos. I. Título.

18/12/2025, 14:43

SEI/UNIPAMPA - 1921739 - SISBI/Folha de Aprovação



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

IGOR TEBALDI MIRANDA DA SILVA

RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO: PROPOSTA DE MODELO SUSTENTÁVEL PARA O CONTEXTO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 18 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Dra. Débora Simone Figueredo Gay
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA**, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR em 18/12/2025, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA**, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR em 18/12/2025, às 14:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DEBORA SIMONE FIGUEREDO GARCIA**, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR em 18/12/2025, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_documento=1021739, informando o código verificador **1021739** e o código CR **07615009**.

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio incondicional, pela força nos momentos difíceis e por acreditarem em mim em todas as etapas desta jornada.

AGRADECIMENTO

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais e ao meu irmão, que sempre acreditaram em mim. Cada conversa, cada palavra de incentivo e cada gesto de apoio fizeram diferença para que eu chegasse até aqui. Este trabalho também é resultado do esforço deles.

Meu agradecimento especial à minha orientadora, Sabrina Neves da Silva, pela paciência, pela confiança e por toda a ajuda que ela me ofereceu. Sua orientação foi fundamental para que este TCC ganhasse forma.

Agradeço também às pessoas que estiveram presentes ao longo do curso, meus amigos, colegas e professores que tornaram essa jornada mais leve.

A todos que contribuíram de alguma forma, meu muito obrigado.

“A maior vitória é vencer a si mesmo.”

Miyamoto Musashi

RESUMO

O trabalho analisa o atual cenário onde a mobilidade elétrica vem apresentando um crescimento rápido em todo o mundo, isso destaca a necessidade do Brasil se antecipar e estruturar uma cadeia de reciclagem para baterias de íon-lítio, a produção, o uso e o descarte das baterias vão gerar novos desafios ambientais, econômicos e regulatórios para o Brasil. O Brasil atualmente carece de centros especializados na reciclagem de baterias de íon-lítio, falta uma regulamentação específica e infraestrutura adequada no setor, isto torna o Brasil dependente da exportação dos resíduos provenientes das baterias. A revisão de literatura feita neste trabalho abrangeu a evolução das baterias, o seu ciclo de vida, os impactos ambientais relacionados, as principais rotas tecnológicas de reciclagem e os modelos de reciclagem utilizados pelos países União Europeia, Estados Unidos e China, eles adotam políticas robustas de responsabilidade estendida do produtor, rastreabilidade digital e definem metas obrigatórias de conteúdo reciclado. A partir da análise dos dados, este trabalho propõe o modelo conceitual brasileiro estruturado em quatro pilares: governança e marco regulatório, infraestrutura e logística reversa, rotas tecnológicas híbridas e mecanismos econômicos de incentivo. A análise mostra que rotas híbridas podem alcançar taxas de recuperação de metais críticos próximas de 90%, reduzir em até 60% as emissões de CO₂ no processo de reciclagem, além de gerar milhares de empregos, criando um novo mercado econômico capaz de movimentar bilhões de reais até 2035. Os principais desafios identificados neste trabalho foram a ausência de dados nacionais, as limitações institucionais, os custos elevados de implantação e a necessidade de validação empírica do modelo proposto. Conclui-se que o Brasil possui a capacidade científica e o potencial industrial necessário para implementar uma cadeia de reciclagem competitiva, alinhada aos princípios da economia circular, ajudando o país na transição energética e garantindo o desenvolvimento sustentável do país.

Palavras-Chave: reciclagem baterias; íon-lítio; mobilidade elétrica; economia circular; metais críticos.

ABSTRACT

The study analyzes the current scenario in which electric mobility has been experiencing rapid growth worldwide, highlighting the need for Brazil to anticipate this trend and structure a recycling chain for lithium-ion batteries. The production, use, and disposal of these batteries will generate new environmental, economic, and regulatory challenges for the country. Brazil currently lacks specialized centers for lithium-ion battery recycling, as well as specific regulations and adequate infrastructure in the sector, which makes the country dependent on exporting battery waste. The literature review conducted in this work covered the evolution of batteries, their life cycle, related environmental impacts, the main technological recycling routes, and the recycling models adopted by the European Union, the United States, and China. These countries employ robust policies of extended producer responsibility, digital traceability, and mandatory targets for recycled content. Based on the data analysis, this study proposes a Brazilian conceptual model structured around four pillars: governance and regulatory framework, infrastructure and reverse logistics, hybrid technological routes, and economic incentive mechanisms. The analysis shows that hybrid routes can achieve recovery rates of critical metals close to 90%, reduce CO₂ emissions by up to 60% during the recycling process, and generate thousands of jobs, creating a new economic market capable of moving billions of reais by 2035. The main challenges identified in this study include the absence of national data, institutional limitations, high implementation costs, and the need for empirical validation of the proposed model. It is concluded that Brazil has the scientific capacity and industrial potential needed to implement a competitive recycling chain aligned with the principles of the circular economy, supporting the country in its energy transition and ensuring sustainable national development.

Keywords: battery recycling; lithium-ion; electric Mobility; circular economy; critical metals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Crescimento da frota de veículos elétricos	24
Figura 2- Esquema Bateria de Lítio	26
Figura 3- Ciclo de vida das Baterias.....	28
Figura 4- Rotas de reciclagem	37
Figura 5- Fluxograma Pirometalurgia	39
Figura 6- Fluxograma Hidrometalurgia	42
Figura 7- Fluxograma Reciclagem direta	45
Figura 8- Fluxograma Metodologia.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição média de baterias EV	30
Tabela 2- Emissões de CO ₂ por rota de reciclagem	34
Tabela 3- Consumo energético por rota de reciclagem.....	35
Tabela 4- Comparação dos métodos de reciclagem de baterias de íon-Lítio.....	46
Tabela 5 - Aspectos Econômicos e Ambientais	47
Tabela 6- Eficiência de recuperação por método de reciclagem.....	48
Tabela 7- Técnicas de Inspeção Não Destrutiva.....	52
Tabela 8- Técnicas Avançadas	53
Tabela 9- Capacidade e empresas líderes em reciclagem de baterias.....	61
Tabela 10- Comparação internacional de modelos de reciclagem de baterias	87
Tabela 11- Modelos de incentivo e indicadores econômicos	92
Tabela 12- Etapas e tecnologias da reciclagem de baterias de íon-Lítio	97

LISTA DE ABREVIATURAS

aprox.	Aproximadamente
etc.	Et cetera
e.g.	Exempli gratia (por exemplo)
i.e.	Id est (isto é)
kWh	Quilowatt-hora
mil.	Milhões
p.	Página
séc.	Século
t	Tonelada
vs.	Versus
%	Porcentagem

LISTA DE SIGLAS

ABVT	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ABatRe-Sim	Advanced Battery Recycling Simulation Model
AI	Artificial Intelligence
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BMS	Battery Management System
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CO ₂	Dióxido de Carbono
DOE	Department of Energy (EUA)
EPR	Extended Producer Responsibility
EV	Electric Vehicle
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IoT	Internet of Things
Kg	Quilograma
LCA	Life Cycle Assessment
LCO	Lithium Cobalt Oxide (LiCoO ₂)
LFP	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄)
LfD	Learning from Demonstration
LIB	Lithium-Ion Battery
Li-S	Lítio-Enxofre
MWh	Megawatt-hora
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO ₂)
NIR	Near Infrared

NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO ₂)
OCV	Open Circuit Voltage
ONU	Organização das Nações Unidas
PPPs	Parcerias Público-Privadas
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema de pesquisa	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Justificativa.....	16
1.4 Metodologia da pesquisa.....	17
1.5 Organização do trabalho	17
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Evolução histórica e papel das baterias na transição energética	19
2.2 Panorama da mobilidade elétrica e demanda por baterias	23
2.3 Composição e ciclo de vida das baterias de íon-lítio.....	25
2.4 Impactos ambientais e econômicos do descarte inadequado de baterias ..	31
2.5 Tecnologias de reciclagem de baterias de íon-lítio.....	36
2.5.1 Pirometalurgia	37
2.5.2 Hidrometalurgia	40
2.5.3 Reciclagem direta.....	43
2.5.4 Tecnologias emergentes e automação.....	49
2.6 Segunda vida e reuso de baterias de veículos elétricos	53
2.7 Modelos internacionais de reciclagem de baterias	56
2.7.1 União Europeia	56
2.7.2 China	57
2.7.3 Estados Unidos	58
2.7.4 Análise comparativa entre os modelos internacionais.....	59
2.7.5 Lições aplicáveis ao contexto brasileiro.....	62
3 METODOLOGIA	63
3.1 Tipo e abordagem da pesquisa	65
3.1.1 Justificativa epistemológica e ontológica.....	66

3.1.2	Caracterização do tipo de pesquisa	66
3.1.3	Nível de análise e unidade de observação	67
3.1.4	Racional para a escolha metodológica	68
3.1.5	Rigor, validade e confiabilidade.....	68
3.1.6	Ética e responsabilidade acadêmica	69
3.2	Procedimentos metodológicos	69
3.2.1	Etapa 1 – Levantamento e revisão sistemática da literatura	70
3.2.2	Etapa 2 – Organização e tratamento das fontes	71
3.2.3	Etapa 3 – Análise comparativa internacional.....	72
3.2.4	Etapa 4 – Síntese e modelagem conceitual	72
3.2.5	Etapa 5 – Validação teórica e consistência interna.....	73
3.3	Fontes de dados	73
3.3.1	Classificação e natureza das fontes	74
3.3.2	Critérios de credibilidade e seleção	76
3.3.3	Forma de utilização das fontes no estudo	77
3.3.4	Registro, catalogação e rastreabilidade.....	77
3.3.5	Justificativa para o uso exclusivo de fontes secundárias.....	78
3.4	Critérios de seleção e análise dos dados	78
3.5	Limitações da pesquisa	78
3.5.1	Limitações quanto à natureza dos dados	79
3.5.2	Limitações geográficas e contextuais.....	79
3.5.3	Limitações temporais.....	80
3.5.4	Limitações metodológicas e de validação empírica	80
3.5.5	Mitigação das limitações	80
4	APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4.1	Panorama comparativo internacional dos sistemas de reciclagem	83
4.1.1	União Europeia: economia circular e rastreabilidade digital	83

4.1.2 Estados Unidos: incentivos econômicos e industrialização verde	84
4.1.3 China: integração vertical e controle estatal	85
4.1.4 Síntese comparativa dos modelos internacionais	86
4.2 Diretrizes estruturais para o modelo brasileiro	88
4.2.1 Dimensão regulatória e institucional.....	88
4.2.2 Dimensão tecnológica e operacional	89
4.2.3 Dimensão econômica e financeira.....	90
4.2.4 Dimensão socioambiental	93
4.3 Proposta de modelo conceitual de reciclagem para o Brasil.....	93
4.3.1 Estrutura geral do modelo.....	94
4.3.2 Camada regulatória e institucional.....	95
4.3.3 Camada tecnológica e operacional	96
4.3.4 Camada econômica e financeira.....	97
4.3.5 Camada socioambiental	99
4.3.6 Potenciais benefícios do modelo.....	100
4.4 Avaliação técnico-econômica e ambiental do modelo.....	100
4.4.1 Avaliação técnica	101
4.4.2 Avaliação econômica.....	102
4.4.3 Avaliação ambiental.....	103
4.4.4 Avaliação integrada de sustentabilidade	104
4.5 Discussão crítica e perspectivas futuras	104
4.5.1 Reflexões sobre a viabilidade e integração institucional	105
4.5.2 Desafios tecnológicos e oportunidades de inovação.....	105
4.5.3 Viabilidade econômica e expansão de mercado	106
4.5.4 Sustentabilidade ambiental e impacto social	107
4.5.5 Perspectivas futuras e recomendações para estudos posteriores	107
4.5.6 Considerações finais do capítulo	108

5 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	109
5.1 Modelos internacionais.....	109
5.2 Contribuições científicas e práticas	110
5.2.1 Contribuições científicas.....	111
5.2.2 Contribuições práticas e aplicadas	111
5.3 Discussão crítica sobre os resultados	112
5.3.1 Governança e institucional.....	112
5.3.2 Desafios tecnológicos e necessidade de inovação	113
5.3.3 Sustentabilidade econômica e escalabilidade.....	113
5.3.4 Sustentabilidade ambiental e inclusão social	114
5.3.5 Integração das dimensões avaliadas	114
5.4 Limitações do estudo e implicações futuras	114
5.5 Perspectivas estratégicas para o Brasil.....	115
5.5.1 Inserção do Brasil na cadeia global de reciclagem.....	116
5.5.2 Inovação e desenvolvimento tecnológico nacional	116
5.5.3 Potenciais econômicos e competitividade	116
5.5.4 Integração com iniciativas globais e visão de longo prazo.....	117
5.5.5 Síntese das perspectivas estratégicas	117
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
REFERÊNCIAS.....	120
APÊNDICES	128
ANEXOS	129

1 INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos surgiram como uma das propostas para mitigar a dependência de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa pelo setor de transporte. A eletrificação tem sido incentivada por compromissos internacionais de descarbonização e vem ganhando forças devido ao avanço nas tecnologias de armazenamento de energia (IEA, 2024; Biswal *et al.*, 2024).

Segundo o *Global EV Outlook 2024*, há 40 milhões de veículos elétricos em circulação pelo planeta, isso representa um aumento na taxa de adesão de veículos elétricos de 35% quando comparada ao ano de 2022 (IEA, 2024). A expansão é reflexo dos incentivos oferecidos por políticas públicas e também pela expansão da infraestrutura dos pontos de recarga.

No Brasil a frota de veículos elétricos está se expandindo em um ritmo acelerado. A Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) registrou um aumento de 60% nas vendas de veículos elétricos entre os anos de 2022 à 2024, isso dá um total de 200 mil unidades (ABVE, 2024).

Contudo, no cenário brasileiro, a coleta, a triagem e a reciclagem de baterias de íon-lítio dos veículos elétricos ainda não foi estruturada. O Brasil sofre com o descarte indevido e é dependente de processos de exportação para tratar os resíduos de baterias. Essa lacuna mostra a necessidade de políticas públicas, incentivos econômicos e desenvolvimento tecnológico local no país (Kraemer *et al.*, 2023).

A crescente eletrificação do transporte global é sustentada principalmente pelas baterias de íon-lítio, que apresentam alta densidade energética, longa vida útil e eficiência de carga superior em relação a tecnologias anteriores, como chumbo-ácido e níquel-cádmio (Zanoletti, 2024; Furlanetto *et al.*, 2025). O aumento rápido da produção e comercialização destas baterias gera novos desafios ambientais e econômicos que estão relacionados ao fim da sua vida útil e consequentemente ao seu descarte.

A previsão é de que até o ano de 2030 cerca de 12 milhões de toneladas de baterias de íon-lítio se tornem inúteis (CSIRO, 2024; Cabral-Neto *et al.*, 2023). Diante deste cenário, a reciclagem deixa de ser apenas uma alternativa voltada para a questão ambiental e passa a ter um papel de destaque na segurança do suprimento de metais críticos, como lítio, cobalto, níquel e manganês, estes metais possuem

mercados geograficamente concentrados que estão sujeitos a flutuações (EPA, 2023; Rezaei *et al.*, 2025).

A composição das baterias de íon-lítio apresenta eletrólitos orgânicos e sais de lítio, ambos são extremamente reativos e tóxicos. Eles representam um risco ambiental, caso esses componentes não sejam descartados corretamente. A degradação dos mesmos pode resultar na contaminação do solo e de lençóis freáticos, o descarte indevido pode produzir gases inflamáveis e metais pesados. Isso mostra a necessidade do cuidado durante a reciclagem, quando bem realizada a reciclagem reduz os danos ao meio ambiente enquanto recupera materiais valiosos, isso é caracterizado como um dos princípios da economia circular (Biswal *et al.*, 2024; Rezaei *et al.*, 2025).

Os principais métodos de reciclagem são agrupados em três rotas tecnológicas: pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta.

A pirometalurgia consiste na fundição a altas temperaturas, ela é robusta, demanda muita energia e perde parte do lítio.

A hidrometalurgia utiliza lixiviação química para recuperar metais de forma mais eficiente, porém envolve o uso de reagentes químicos nocivos.

A reciclagem direta reaproveita materiais catódicos que não tiveram a decomposição completa, ela é considerada a alternativa mais sustentável (Premathilake *et al.*, 2025). Porém, todos estes processos ainda precisam passar por uma adaptação tecnológica e econômica devido às condições do mercado brasileiro (ANEEL, 2022; Wang *et al.*, 2023).

1.1 Problema de pesquisa

O rápido desenvolvimento do setor de mobilidade elétrica no Brasil não tem sido acompanhado pela implementação de políticas e infraestrutura de reciclagem de baterias.

O Brasil não possui centros industriais especializados no tratamento de resíduos de íon-lítio, a legislação atual da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) não estabelece diretrizes específicas para o tratamento de baterias veiculares (Brasil, 2010; Conama, 2008). Com isso identificamos a seguinte questão: Qual modelo de reciclagem é tecnicamente viável, economicamente sustentável e ambientalmente adequado para o cenário brasileiro?

1.2 Objetivos

Objetivo geral

Propor um modelo para a reciclagem de baterias íon-lítio que se adapta ao cenário brasileiro, o modelo vai ser baseado em experiências internacionais, ele deve se adaptar à legislação nacional atual e aos desafios de infraestrutura, econômicos e ambientais do Brasil.

Objetivos específicos

- Realizar uma revisão crítica dos principais modelos internacionais de reciclagem de baterias.
- Mapear e analisar a legislação brasileira relacionada sobre o tratamento dos resíduos de baterias.
Identificar os desafios técnicos, econômicos e regulatórios no cenário nacional.
- Propor diretrizes para a implementação de políticas públicas de incentivo à reciclagem.

1.3 Justificativa

Para a criação de um modelo energético sustentável é preciso a implementação da reciclagem de baterias de íon-lítio no modelo energético atual, isso vai permitir fechar o ciclo produtivo, reduzindo a dependência de matérias-primas importadas.

Alguns estudos mais recentes indicam que a taxa de recuperação de metais críticos a partir de baterias usadas pode reduzir em até 50% as emissões de CO₂ provenientes da produção e extração primária desses metais (Tarpeh *et al.*, 2025; Stanford, 2025).

O desenvolvimento de um sistema de reciclagem nacional vai gerar novas oportunidades econômicas, incentivar a inovação tecnológica e fortalecer a soberania energética do Brasil (CSIRO, 2024; EPA, 2023).

No Brasil existe uma urgência regulatória para se adaptar a crescente demanda por veículos elétricos, visto que em países como Alemanha, Noruega e China já

existem normativas específicas que obrigam os fabricantes e importadores a implementarem sistemas de logística reversa de baterias veiculares (Comissão Europeia, 2023).

No Brasil ainda não existe um marco regulatório do segmento, isso compromete o aproveitamento de resíduos e aumenta o risco de problemas ambientais.

Logo, é necessário propor um modelo de reciclagem adaptado ao cenário nacional, este modelo será uma contribuição estratégica no avanço do país e vai ajudar na implementação de uma economia circular.

1.4 Metodologia da pesquisa

Esta pesquisa teve a sua abordagem estruturada em três eixos:

- Um estudo comparativo entre o cenário nacional e internacional, com o objetivo de identificar as melhores práticas utilizadas nos países líderes de reciclagem de baterias.
- Uma análise documental e normativa das leis, regulamentos e relatórios técnicos nacionais.
- Propor um modelo conceitual adequado para o cenário brasileiro.

Serão feitas revisões de literatura, dados secundários e representações gráficas (fluxogramas) para descrever os fluxos logísticos e processos tecnológicos envolvidos em todo o processo de reciclagem (Wang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024).

1.5 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco principais capítulos, conforme o modelo institucional fornecido pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, 2025):

- **Capítulo 1 – Introdução:** contextualização, problema, objetivos, justificativa e metodologia.
- **Capítulo 2 – Conceitos gerais e revisão da literatura:** base teórica sobre a reciclagem de baterias, tecnologias e experiências internacionais.
- **Capítulo 3 – Metodologia:** procedimentos adotados e critérios de análise.
- **Capítulo 4 – Apresentação da pesquisa e análise dos resultados:** análise crítica e proposta do modelo conceitual.
- **Capítulo 5 – Considerações finais:** síntese dos resultados e perspectivas futuras.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura deste trabalho tem como objetivo analisar o tema de reciclagem de baterias de íon-lítio provenientes de veículos elétricos, através dessa revisão será estabelecido os conceitos para desenvolver este trabalho.

A revisão será dividida em sub itens, no item 2.1 é dado um breve panorama histórico sobre baterias de Íon-Lítio.

No item 2.2, é dada uma visão geral sobre o que são as baterias de íon-lítio, explicando qual é a sua composição, o seu funcionamento e a importância das mesmas para os veículos elétricos.

No item 2.3 abordamos a evolução histórica das baterias e destacamos a importância delas na transição energética global, destacando os principais marcos de desenvolvimento tecnológico que foram chaves para a expansão comercial.

No item 2.4 é feita uma classificação dos tipos de baterias, comparando diretamente as suas características técnicas e eficiências entre si.

No item 2.5 discute-se os impactos econômicos e ambientais envolvidos no ciclo de vida das baterias, é dada ênfase nos desafios envolvendo o descarte e a criação de sistemas de gestão de resíduos sustentáveis.

No item 2.6 analisa e explica quais são os principais processos e técnicas de reciclagem utilizados, os processos abordados são a pirometalúrgica, a hidrometalúrgica e a reciclagem direta, são destacadas as vantagens e limitações de cada processo.

No item 2.7 são exploradas as perspectivas globais e nacionais para a reciclagem de baterias de íon-lítio, as políticas públicas, as estratégias industriais e as possíveis oportunidades que podem surgir no nesse setor em desenvolvimento.

2.1 Evolução histórica e papel das baterias na transição energética

As primeiras baterias de íon-lítio foram desenvolvidas na década de 1980, as primeiras formulações elaboradas foram feitas por John B. Goodenough e Akira Yoshino.

Suas descobertas permitiram o desenvolvimento de sistemas de baterias recarregáveis com alta estabilidade, no ano de 1991 a Sony deu início a comercialização em larga escala.

Desde a comercialização no início da década de 1990, as baterias de íon-lítio evoluíram constantemente e tiveram várias gerações tecnológicas, o desenvolvimento das baterias foi impulsionado pela necessidade de reduzir os custos, aumentar a eficiência energética e melhorar a segurança operacional das baterias.

As primeiras gerações de baterias usavam óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2) como material catódico e grafite como ânodo, essas baterias possuem eletrólitos líquidos à base de carbonatos orgânicos, elas serviam para aplicações portáteis, mas apresentavam um alto custo de produção e risco de instabilidade térmica, seu uso em larga escala era limitado (Biswal *et al.*, 2024).

O avanço gradual das pesquisas fez surgir novas combinações de materiais para os eletrodos e eletrólitos, as novas combinações resultaram no aumento de desempenho.

A substituição total ou parcial do cobalto por outros metais como o níquel, o manganês e o alumínio resultaram no desenvolvimento das químicas NMC (LiNiMnCoO_2) e NCA (LiNiCoAlO_2), essas oferecem uma densidade energética maior por um custo menor do quilowatt-hora (kWh).

O uso do fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4) melhorou a estabilidade térmica e a vida útil nos ciclos de carga e descarga, essas características tornaram essa composição popular em veículos elétricos (IEA, 2024).

Todas essas inovações fizeram com que as baterias obtivessem um aumento expressivo na densidade de energia, elas passaram de cerca de 90 Wh/kg na década de 1990 para mais de 250 Wh/kg nas tecnologias mais atuais, o custo médio por kWh sofreu uma redução de 85% entre 2010 e 2023 (IEA, 2024; CSIRO, 2024).

As melhorias nos sistemas de gerenciamento térmico, controle eletrônico e encapsulamento contribuíram bastante no aumento do nível de segurança operacional dessas baterias.

A tendência atual é desenvolver baterias de estado sólido, elas substituem o eletrólito líquido por materiais cerâmicos ou poliméricos sólidos.

A mudança no eletrólito promete uma densidade energética maior (acima de 400 Wh/kg), menos risco de incêndio e uma vida útil maior, essa mudança tem sido considerada a próxima grande revolução do armazenamento eletroquímico (Rezaei *et al.*, 2025).

Outra tendência atual tem sido o desenvolvimento de químicas sustentáveis, como lítio-enxofre (Li-S), sódio-íon (Na-ion) e baterias híbridas, o objetivo delas é reduzir a dependência de metais críticos (como cobalto e níquel), minimizando os impactos ambientais causados pela extração desses metais.

As tecnologias de armazenamento energético geraram grandes mudanças econômicas e geopolíticas na cadeia produtiva global.

O aumento na demanda por veículos elétricos, sistemas de armazenamento e eletrônicos portáteis fez surgir as grandes cadeias de produção atuais, a cadeia de produção envolve desde a extração de matérias-primas críticas até a produção de células e componentes eletrônicos (IEA, 2024).

Atualmente a produção de lítio, cobalto e níquel se concentra em poucos países, isso cria uma vulnerabilidade nas cadeias de suprimentos. As principais reservas de lítio estão localizadas no chamado “Triângulo do Lítio” (Chile, Argentina e Bolívia), sozinhos eles respondem por aproximadamente 55% da produção mundial total.

A maior parcela do cobalto extraído vem da República Democrática do Congo, ela é responsável por aproximadamente 70% da produção global. Os maiores produtores de níquel são a Indonésia, Filipinas e Rússia (CSIRO, 2024). A concentração geográfica desses recursos proporciona um peso estratégico a poucos países, o que torna o seu fornecimento suscetível a instabilidades políticas, comerciais e ambientais.

Na etapa de produção das baterias existe uma forte dependência tecnológica dos países Asiáticos, em especial da China, Coreia do Sul e Japão, esses países dominam as etapas de refino, produção de cátodos, montagem de células e fabricação de veículos elétricos.

A China possui mais de 75% da capacidade global de refino de lítio e cobalto, ela controla aproximadamente dois terços da produção global de baterias (IEA, 2024).

A China se consolidou como líder absoluta na cadeia produtiva de baterias, gerando desafios para as economias ocidentais que pretendem reduzir as suas dependências do mercado asiático.

Em resposta à China, os Estados Unidos e União Europeia vem implementando novas políticas de reindustrialização verde e diversificação nas suas cadeias produtivas.

A resposta veio através de programas de incentivo à mineração responsável, o aumento do processamento local dos materiais e à instalação de gigafábricas de baterias em seus territórios.

O *Inflation Reduction Act* (IRA), nos EUA, e o *European Green Deal Industrial Plan*, na Europa, são exemplos de programas que visam o reposicionamento competitivo das cadeias produtivas, o objetivo desses programas é garantir segurança energética e autonomia tecnológica (Comissão Europeia, 2023).

A estimativa atual é de que o mercado global de baterias de íon-lítio ultrapasse US\$120 bilhões até o ano de 2030, boa parte desse crescimento de mercado é dado pelo crescimento da frota de veículos elétricos e pela expansão de sistemas de armazenamento estacionário (Biswal *et al.*, 2024).

As baterias vão desempenhar um papel importante na transição energética, pois elas viabilizam a integração de fontes renováveis intermitentes (solar e eólica), elas também contribuem para a redução das emissões de CO₂ no setor de transporte, dois setores fundamentais para alcançar as metas climáticas impostas no Acordo de Paris.

O Acordo de Paris foi firmado no ano de 2015 na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), sendo atualmente o principal marco internacional no combate às mudanças climáticas.

O seu principal objetivo é limitar o aumento da temperatura média global, diminuir para menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, buscando restringir o aumento a 1,5 °C por ano.

Buscando atingir essa meta, o acordo estabeleceu alguns compromissos voluntários, periodicamente cada país define e atualiza suas metas de emissões de gases de efeito estufa (GEE), para reduzir a emissão de gases os países devem se adaptar e financiar ações sustentáveis. Os compromissos foram denominados como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs).

O acordo baseia-se na transparência e revisão periódica, ele incentiva o aprimoramento contínuo das metas estabelecidas e a cooperação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, sendo a cooperação tecnológica ou financeira.

O Brasil assinou o Acordo de Paris em 2016 e se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025, e em 43% até 2030, quando comparadas com as emissões de 2005.

As metas estabelecidas no Brasil influenciam nos setores de energia, transportes, uso da terra e gestão de resíduos, as metas ajudam o Brasil na transição para se tornar uma economia de baixo carbono.

Dessa forma, a evolução das baterias de íon-lítio, desde suas formulações pioneiras propostas por Goodenough e Yoshino, estabeleceu-se como um pilar fundamental e irreversível da transição energética global, viabilizando a eletrificação dos transportes e a integração eficaz de fontes renováveis intermitentes.

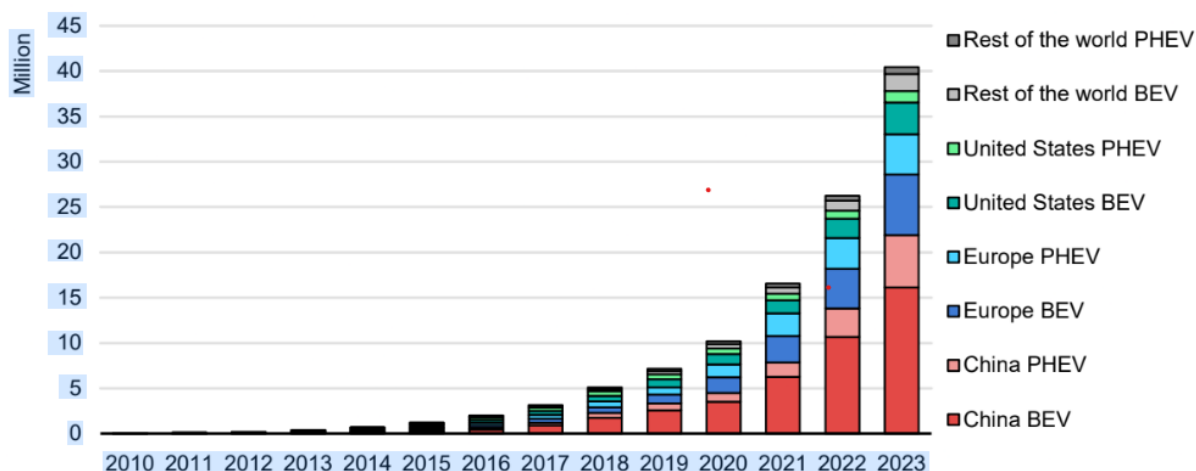
No entanto, a expansão acelerada deste mercado, projetada para ultrapassar US\$120 bilhões até 2030, levanta desafios que precisam ser abordados. A demanda crescente por densidade de energia impulsiona a utilização de minerais (como lítio, cobalto e níquel), expondo vulnerabilidades na cadeia de suprimentos e preocupações com o impacto socioambiental da mineração primária. Consequentemente, para garantir que as baterias cumpram seu papel na descarbonização de forma verdadeiramente sustentável, a indústria deve focar não apenas na melhoria contínua de suas formulações químicas e no conceito de "segunda vida", ao reaproveitar células de VE em aplicações estacionárias, mas de maneira essencial, no desenvolvimento e massificação da reciclagem, estabelecendo uma economia circular para esses componentes.

2.2 Panorama da mobilidade elétrica e demanda por baterias

Nos últimos anos, o uso de veículos elétricos tem sido uma das principais estratégias globais adotadas com o intuito de reduzir o total de emissões de carbono, a estratégia tenta mitigar os efeitos das mudanças climáticas. A transição para veículos elétricos (VEs) está sendo impulsionada por incentivos governamentais, avanços tecnológicos no setor produtivo de baterias e pela necessidade de diversificação das matrizes energéticas globais (IEA, 2024; Biswal *et al.*, 2024). Segundo o *Global EV Outlook* (IEA, 2024), o número de VEs em circulação ultrapassou 40 milhões de unidades pelo mundo em 2024, as projeções apontam 100 milhões até 2030, isso reflete um grande aumento na demanda por VEs.

A Figura 1 mostra a taxa de crescimento da frota de veículos elétricos pelo mundo no período entre 2010 até 2023.

Figura 1- Crescimento da frota de veículos elétricos

Global electric car stock trends, 2010-2023

IEA. CC BY 4.0.

Notes: BEV = battery electric vehicle; PHEV = plug-in hybrid vehicle. Includes passenger cars only.

Sources: IEA analysis based on country submissions and data from ACEA, EAFO, EV Volumes and Marklines.

Fonte: IEA, 2024.

A tecnologia de íon-lítio se consolidou no mercado de baterias recarregáveis por conta da sua alta densidade energética, peso reduzido e durabilidade (Zanoletti, 2024; Furlanetto *et al.*, 2025). O crescimento rápido do setor está gerando desafios relacionados ao abastecimento de matérias-primas, como o lítio, o níquel e o cobalto, elementos críticos cuja produção global está concentrada em poucos países (EPA, 2023; CSIRO, 2024). Tendo em vista estes desafios, o cenário mundial tem tomado iniciativas no desenvolvimento de cadeias de reciclagem, as iniciativas devem ser capazes de reduzir a dependência da mineração e os impactos associados à extração de metais (Rezaei *et al.*, 2025).

No Brasil, apesar do crescimento da frota elétrica, ela ainda representa uma pequena fração da frota total. Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), as vendas de VEs aumentaram em mais de 60% entre os anos de 2022 à 2024, chegando na marca de 200 mil unidades em circulação pelo país (ABVE, 2024).

O avanço da frota não está sendo acompanhado pelo avanço da infraestrutura de reciclagem e logística reversa, isso vai criar uma lacuna estrutural na cadeia de gestão de resíduos de baterias automotivas (Cabral-Neto *et al.*, 2023; Kraemer *et al.*, 2023).

Está previsto que até 2030, o Brasil produza em torno de 10 à 15 mil toneladas anuais de baterias em fim de vida (Cabral-Neto *et al.*, 2023). A ausência de uma

estrutura de reaproveitamento de materiais vai representar não só uma ameaça ambiental, mas também uma perda econômica. A reciclagem dos materiais vai reduzir custos totais de importação e ainda gera oportunidades de emprego especializadas no setor de energia sustentável (Brasil, 2010; ANEEL, 2022).

Existe uma tendência global crescente pela integração de políticas de mobilidade elétrica e programas de economia circular. Na União Europeia foi aprovado em 2023 o *EU Battery Regulation*, ficando estabelecido metas obrigatórias para quantidades mínimas de conteúdo reciclado e responsabilidades estendidas para os fabricantes de baterias (Comissão Europeia, 2023). Os países asiáticos Japão e China vêm liderando a implantação de sistemas de recuperação e rastreabilidade de materiais provenientes do descarte de baterias, com isso eles estão criando ecossistemas industriais fechados de produção, reuso e reciclagem (Biswal *et al.*, 2024; Premathilake *et al.*, 2025).

Inicialmente os países que tiverem cadeias de reciclagem vão estar melhor posicionados para garantir autonomia tecnológica, segurança de suprimento e vantagens competitivas na economia verde global (Rezaei *et al.*, 2025; CSIRO, 2024). Tendo em vista esse contexto, é necessário compreender as dinâmicas globais e regionais da crescente demanda da frota elétrica, isso será fundamental para elaborar modelos de reciclagem eficientes e adaptados à realidade brasileira.

2.3 Composição e ciclo de vida das baterias de íon-lítio

Baterias de íon-lítio são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica através da movimentação de íons de lítio entre dois eletrodos, esse processo é reversível, logo as baterias podem ser recarregadas. Sua estrutura interna é composta por um ânodo (geralmente de grafite), um cátodo (composto de óxidos metálicos de lítio), um eletrólito líquido e um separador microporoso, possuem também invólucros e circuitos de gerenciamento eletrônico, conforme mostra a Figura 2 (Dobies, 2022). Essa estrutura permite uma grande capacidade de armazenamento energético, têm uma alta eficiência e durabilidade quando comparadas com outros modelos de baterias, essas características explicam a predominância delas em aplicações de mobilidade elétrica. Ainda na Figura 2, vê-se a movimentação dos íons de lítio e elétrons durante os processos de carga e descarga. Durante a descarga, quando há corrente elétrica nos polos, os íons de lítio

se movem através do eletrólito do ânodo para o cátodo. Esse processo continua até que o ânodo esteja sem íons de lítio, indicando que a célula foi totalmente descarregada. Quando uma fonte de alimentação externa é conectada à célula, inicia-se o processo de carga, com os íons de lítio se movendo do cátodo para o ânodo. A célula é considerada completamente carregada quando não há mais íons de lítio no cátodo.

Figura 2- Esquema Bateria de Lítio



Fonte: Dobies, 2022.

O que determina o desempenho e a segurança das baterias é a estabilidade eletroquímica e a pureza dos materiais ativos utilizados nos eletrodos. As baterias de íon-lítio utilizadas em veículos elétricos possuem densidade energética de 150 a 250 Wh/kg, sua eficiência de carga-descarga é superior a 90% e a vida útil fica entre 1.500 a 3.000 ciclos (IEA, 2024). O ânodo de grafite segundo estudos recentes pode ser substituído pelo de silício e o de titanato de lítio, estes apresentam maior capacidade de armazenamento (CSIRO, 2024; Biswal *et al.*, 2024). Já o cátodo geralmente é formado por diferentes composições químicas, como o LiCoO_2 (LCO), o LiNiMnCoO_2 (NMC), o LiNiCoAlO_2 (NCA) e LiFePO_4 (LFP), cada composição possui vantagens específicas em termos de custo, estabilidade térmica e densidade energética (Zanoletti, 2024; Rezaei *et al.*, 2025).

A função do eletrólito é auxiliar e permitir o transporte de íons de lítio entre os eletrodos durante a carga e descarga da bateria. Geralmente ele é composto por sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos, como carbonatos, isto exige cuidados especiais, pois esse composto possui alta inflamabilidade e toxicidade (CSIRO, 2024).

O separador é constituído de polietileno (PE) ou polipropileno (PP), sua função é impedir o contato direto entre os eletrodos, ele evita curtos-circuitos internos (Premathilake *et al.*, 2025).

O desempenho da bateria depende da integridade dos seus componentes internos e das reações interfaciais que ocorrem durante o seu uso. Conforme elas são utilizadas, as baterias sofrem degradação eletroquímica, essa degradação é o resultado de fenômenos como a formação da camada de interfase sólido-eletrólito (SEI), pode ocorrer o crescimento de dendritos metálicos, oxidação dos eletrólitos e o colapso estrutural dos materiais no cátodo (Wang *et al.*, 2023). A degradação reduz a capacidade de armazenamento e a eficiência energética, com o tempo isso leva à perda gradual de desempenho.

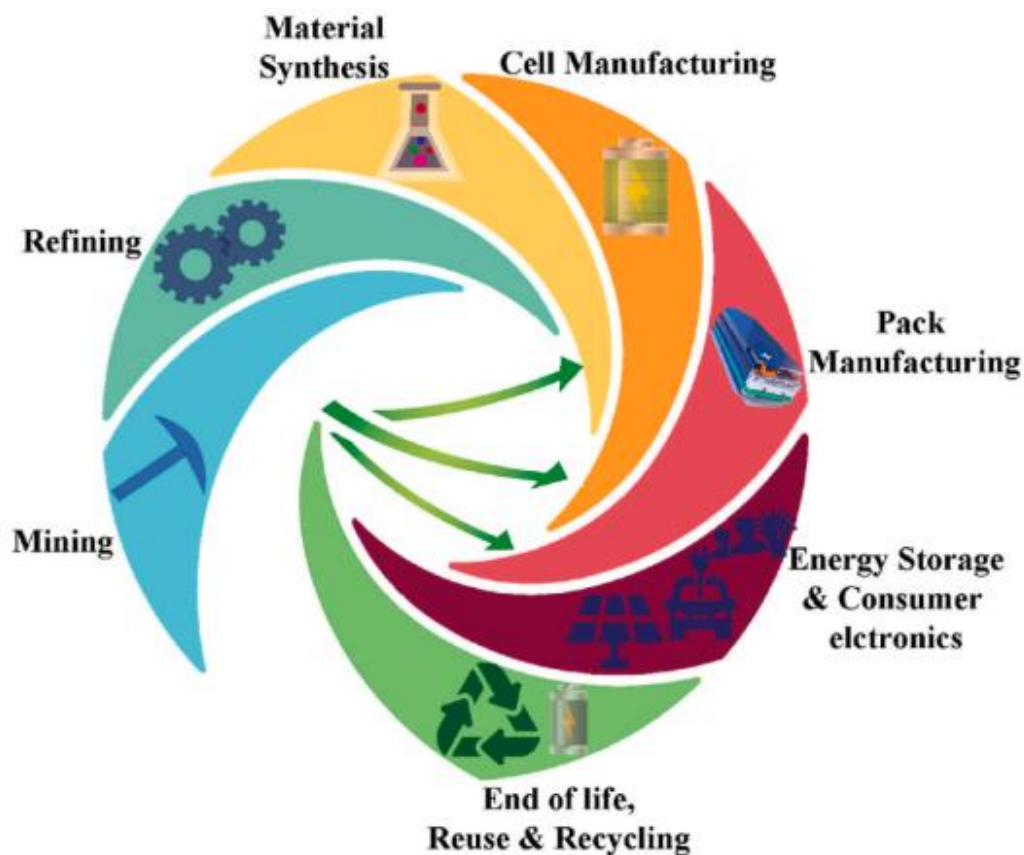
A degradação pode ser influenciada por fatores externos que acabam acelerando a degradação, os principais fatores são a temperatura, profundidade de descarga, taxa de corrente e número de ciclos. A vida útil das baterias automotivas de íon-lítio varia entre 8 e 15 anos, dependendo apenas do tipo de química e das condições de uso (Biswal *et al.*, 2024; Tarpeh *et al.*, 2025). A capacidade tende a cair abaixo de 80% do valor nominal após esse período, nesse ponto as baterias são consideradas ineficientes para propulsão veicular, mas podem ser reaproveitadas em aplicações de menor demanda, como em sistemas de armazenamento de energia (Rezaei *et al.*, 2025; Jiaying *et al.*, 2023).

O ciclo de vida de uma bateria de íon-lítio é constituído por quatro fases (Cabral-Neto *et al.*, 2023; Rezaei *et al.*, 2025):

- **Produção e montagem:** onde ocorre a extração das matérias-primas, a fabricação e montagem dos eletrodos;
- **Uso veicular:** onde elas são postas em fase de operação;
- **Segunda vida:** onde elas são reaproveitadas em sistemas estacionários ou micromobilidade;
- **Reciclagem e disposição final:** onde ocorre o processo de desmontagem, recuperação de materiais e reintegração à cadeia produtiva.

A Figura 3 mostra o Ciclo de vida completo de uma bateria de íon-lítio dividido nas etapas de mineração, refino, produção, uso, segunda vida, reciclagem e reaproveitamento de materiais.

Figura 3- Ciclo de vida das Baterias



Fonte: Rezaei *et al.*, 2025

As fases possuem oportunidades de otimização relacionadas aos impactos ambientais causados. Durante a produção existe uma alta taxa de emissão de carbono, devido à mineração e ao refino de metais (CSIRO, 2024). A fase de uso é relativamente limpa, sua sustentabilidade está atrelada a origem da energia elétrica utilizada durante a recarga.

As fases de segunda vida e reciclagem possuem o maior potencial de mitigação dos impactos ambientais, elas reduzem a necessidade de extração mineral, o que reduz as emissões de CO₂ associadas à produção de novas baterias (Rezaei *et al.*, 2025; CSIRO, 2024).

Por conta da complexidade na composição das baterias é necessário pré-tratamento físico e químico, isso é essencial para que a reciclagem seja mais eficiente e segura.

O processo de pré-tratamento é composto por descarga elétrica, desmonte automatizado, trituração, separação de frações metálicas e extração de eletrólitos (Wang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024). Existem tecnologias emergentes que visam otimizar este processo, sendo uma delas os sistemas ultrassônicos para identificação de degradação e a tele-robótica para desmontagem de módulos, elas pretendem reduzir os riscos e aumentar a eficiência no reaproveitamento de materiais.

A Tabela 1 mostra a quantidade média dos principais materiais utilizados em baterias de veículos elétricos (EV), as quantidades de material são apresentadas em quilogramas por bateria e quilogramas por MWh.

Os valores da tabela foram calculados utilizando como base uma bateria padrão de 400 kg de modelos automotivos com química NMC (níquel-mangânese-cobalto), o modelo escolhido possui capacidade média entre 60 e 70 kWh, o que corresponde a aproximadamente 6,0 a 6,5 kg/kWh.

O modelo escolhido representa uma das configurações de bateria mais utilizada em veículos elétricos comerciais atualmente. A proporção dos materiais respeita às médias encontradas em estudos internacionais, considerando algumas variações entre fabricantes, arquitetura dos módulos, densidade energética e características específicas de cada pack. Essa tabela determina a quantidade de cada material presente nas baterias dos veículos elétricos.

Tabela 1- Composição média de baterias EV

Material	Quantidade média por bateria (kg)	Quantidade por MWh (kg/MWh)
Lítio (Li)	8–12 kg	90–110 kg/MWh
Níquel (Ni)	30–60 kg	320–500 kg/MWh
Manganês (Mn)	15–25 kg	180–260 kg/MWh
Cobalto (Co)	6–15 kg	70–140 kg/MWh
Alumínio (Al)	20–30 kg	220–320 kg/MWh
Cobre (Cu)	20–40 kg	250–350 kg/MWh
Grafite (C)	60–70 kg	650–750 kg/MWh
Eletrólito	10–20 kg	120–180 kg/MWh
Aço / Carcaça	15–25 kg	180–260 kg/MWh
Plásticos e outros	20–35 kg	220–350 kg/MWh

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

É necessário compreender a composição e o ciclo de vida das baterias para gerar modelos de reciclagem sustentáveis, esses modelos devem considerar tanto os aspectos químicos e tecnológicos quanto os logísticos e econômicos. Essa visão integrada vai servir para fornecer uma boa base teórica de desenvolvimento para políticas públicas de qualidade, melhores regulamentações e rotas tecnológicas adaptadas à realidade brasileira.

2.4 Impactos ambientais e econômicos do descarte inadequado de baterias

Cada uma das etapas do ciclo de vida das baterias apresenta algum tipo de impacto ambiental.

A mineração de lítio, cobalto e níquel, está concentrada principalmente nos países do Chile, China e República Democrática do Congo, ela sozinha é responsável por 5 a 15 toneladas de CO₂ em emissões diretas por tonelada de metal produzido (CSIRO, 2024).

O consumo de água na extração de lítio em salmoura ultrapassa 500 mil litros por tonelada extraída, essa água se não for tratada pode afetar ecossistemas frágeis.

Os custos para produzir baterias de íon-lítio caíram 89% entre 2010 e 2023, passando de US\$1.200/kWh para menos de US\$135/kWh, o motivo dessa redução foi pelos ganhos de escala de produção e pelos avanços tecnológicos dos últimos anos (IEA, 2024).

O descarte indevido de baterias de íon-lítio gera impactos não só ambientais, mas também sociais e econômicos extremamente relevantes, o que justifica a adoção de sistemas de reciclagem e de logística reversa bem estruturadas.

Os principais riscos para o ambiente decorrem da liberação de metais pesados (cobalto, níquel, manganês), solventes orgânicos e sais de lítio, estes compostos quando entram em contato com o solo e a água, contaminam os lençóis freáticos, sedimentos e a biota local, impactando ecossistemas terrestres e aquáticos. (Tarpeh *et al.*, 2025).

Em caso de acidentes durante o armazenamento ou o transporte, elas podem liberar gases inflamáveis e compostos tóxicos, que elevam o risco de incêndios e contaminação atmosférica em áreas urbanas ou industriais (Premathilake *et al.*, 2025; Biswal *et al.*, 2024).

A exposição aos metais pesados presentes nas baterias pode acarretar em problemas de saúde, os principais efeitos prejudiciais são efeitos neurológicos, renais e reprodutivos.

Os efeitos negativos podem contaminar a população humana e a fauna, a contaminação pode impactar nas cadeias alimentares locais, quando a contaminação atinge a agricultura e recursos hídricos (Rezaei *et al.*, 2025).

A ausência de medidas de segurança na manipulação e na descontaminação em centros informais de reciclagem aumenta o risco e a vulnerabilidade dos trabalhadores, além de prejudicar a comunidade próxima do centro de reciclagem, um problema observado em cenários onde a manipulação dos resíduos é precária (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

Do ponto de vista econômico, o descarte sem reaproveitamento dos materiais representa uma perda direta de valor.

Os metais (lítio, níquel, cobalto, cobre) utilizados na composição das baterias são extremamente valiosos, a sua recuperação pode trazer um ótimo retorno financeiro.

A escolha do método adequado viabiliza o retorno financeiro, através de técnicas hidrometalúrgicas ou pirometalúrgicas transforma-se o resíduo em insumo econômico. A não recuperação dos materiais gera dependência de importações e custos associados à extração primária.

O aumento dos custos impacta a competitividade da cadeia de produção nacional de baterias e de veículos elétricos (CSIRO, 2024; EPA, 2023).

Os principais fatores que determinam a viabilidade econômica da reciclagem são:

- Concentração e logística dos resíduos (economias de escala), é necessário recolher e agrupar grandes quantidades de resíduos para que faça sentido a reciclagem;
- O preço dos metais no mercado internacional influencia diretamente no lucro resultante da reciclagem;
- A taxa de recuperação de materiais, ela incentiva o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas, porém exige alto investimento em pesquisa e desenvolvimento;
- Todos os custos logísticos que são o pré-tratamento, transporte e segurança dos resíduos;
- Os subsídios e incentivos fiscais (subvenções, metas de conteúdo reciclado, responsabilidade estendida do produtor) por parte do governo, a criação de

novas políticas regulatórias pode tornar o processo mais economicamente viável (Rezaei *et al.*, 2025; Premathilake *et al.*, 2025).

Nos países onde o volume de baterias descartadas ainda é baixo e disperso, os custos de coleta e transporte podem inviabilizar instalações centralizadas, uma forma de mitigar esse problema seria introduzir mecanismos de agregação ou subsídio inicial (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

Quando consideramos a segunda vida das baterias e as utilizamos em aplicações estacionárias (armazenamento energético em rede ou em *micro-grids*) podemos postergar o envio das mesmas para a reciclagem, aumentando a rentabilidade total do ciclo de vida do ativo e reduzindo a necessidade imediata do processamento de sucata.

A adoção de segunda vida também gera desafios e custos, as baterias devem passar por testes, reengenharia de módulos (quando necessário) e devem ser emitidas garantias contratuais, esses processos são necessários para estabelecer modelos de negócio claros e protocolos técnicos padronizados (Jiaying *et al.*, 2023; Rezaei *et al.*, 2025).

A análise comparativa dos principais métodos de reciclagem (piro vs. hidro vs. direta) mostra que a pirometalurgia é a menos sensível à heterogeneidade do resíduo, ela possui o maior custo energético e apresenta perda parcial de lítio;

A hidrometalurgia possui uma taxa maior de recuperação dos metais, todo o processo ocorre com uma temperatura menor, logo o seu consumo energético é mais baixo, ela demanda o manejo adequado de efluentes químicos;

A reciclagem direta recupera os compostos ativos do cátodo através da separação direta, ela minimiza as emissões de resíduos no ambiente e a perda de materiais (Premathilake *et al.*, 2025; Biswal *et al.*, 2024). A escolha da tecnologia utilizada deve ser orientada por avaliações LCA e estudos de viabilidade econômica locais.

A Tabela 2 mostra a comparação das emissões de CO₂ para às principais rotas de reciclagem de baterias de íon-lítio. Os valores servem como referência para avaliar o impacto ambiental relativo entre os processos de reciclagem, o que permite identificar qual método oferece a menor pegada de carbono por tonelada de bateria processada.

Tabela 2- Emissões de CO₂ por rota de reciclagem

Rota Tecnológica	Emissões de CO₂ (kg/t)	Principais Fontes de Emissão
Pirometalurgia	2.000 – 3.500	Uso intensivo de energia térmica, fusão metálica e combustão direta.
Hidrometalurgia	800 – 1.600	Reagentes químicos, bombeamento, aquecimento moderado.
Reciclagem Direta	300 – 700	Moagem, reclassificação, reativação de materiais catódicos.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

A Tabela 3 mostra a comparação do consumo energético entre as três principais rotas de reciclagem de baterias de íon-lítio. Os valores aplicados são valores consolidados na literatura recente, os dados permitem a leitura clara da eficiência energética relativa de cada rota.

Tabela 3- Consumo energético por rota de reciclagem

Processo	Etapas com Maior Consumo	Consumo Médio (kWh/t)	Variação Típica (kWh/t)	Observações Técnicas
Pirometalurgia	Aquecimento do forno; fusão; tratamento de escórias	7.000– 12.000	5.000– 15.000	Alto consumo energético devido às temperaturas elevadas ($\geq 1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$).
Hidrometalurgia	Lixiviação; precipitação; purificação	1.800– 3.500	1.500– 4.000	Redução significativa do consumo por operar entre $60\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Reciclagem Direta	Desmontagem; re-litigação; reprocessamento de eletrodos	900–1.800	700– 2.200	Menor consumo por evitar etapas metalúrgicas completas.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

Lacunas na legislação e na fiscalização aumentam os impactos socioambientais e econômicos do descarte inadequado. Atualmente no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece princípios de logística reversa, porém faltam normas específicas para baterias de veículos elétricos.

A falta de regulamentação gera insegurança jurídica para investimentos em reciclagem, o que limita a ação de mecanismos de responsabilização dos fabricantes (Brasil, 2010; Kraemer *et al.*, 2023). Outros marcos regulatórios recentes em outras jurisdições (por exemplo, a regulação europeia que define metas de conteúdo

reciclado) têm desencadeado um efeito catalisador sobre a implementação de infraestrutura e inovação tecnológica (Comissão Europeia, 2023).

É importante destacar a complexidade institucional do Brasil, os impactos e custos do descarte inadequado devem ser repartidos entre os fabricantes, os consumidores, os operadores logísticos, as empresas de reciclagem e o poder público.

Serão necessários arranjos contratuais e instrumentos econômicos (taxas, incentivos, contratos de compra de material reciclado) para viabilizar investimentos (Rezaei *et al.*, 2025; EPA, 2023). Propostas de modelos de financiamento misto (público-privado), contratos de *offtake* para materiais reciclados e programas pilotos regionais são os passos iniciais para reduzir riscos e gerar avanços no setor dentro do Brasil.

2.5 Tecnologias de reciclagem de baterias de íon-lítio

O processo de reciclagem de baterias de íon-lítio é composto por várias etapas, essas etapas envolvem operações químicas, físicas e termoquímicas.

Cada etapa tem o objetivo de maximizar a recuperação de metais e compostos ativos. A escolha do método de reciclagem vai depender da composição do material, do nível de contaminação, da escala de operação e do valor econômico dos elementos a serem recuperados (Biswal *et al.*, 2024; Premathilake *et al.*, 2025). As principais tecnologias empregadas atualmente, Figura 4, podem ser classificadas em três tipos, a pirometalurgia, a hidrometalurgia e a reciclagem direta, existem estudos para desenvolver novas técnicas, porém estas ainda se encontram em fase de desenvolvimento laboratorial e pré-industrial.

A Figura 4 mostra o fluxo de processos de reciclagem de baterias de íon-lítio, envolvidas nas rotas pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta.

Figura 4- Rotas de reciclagem



Fonte: Wang *et al.*, 2022.

2.5.1 Pirometalurgia

A pirometalurgia é um dos métodos mais antigos e consolidados no processo de reciclagem de baterias de íon-lítio. Este método é amplamente utilizado devido à sua robustez e eficiência na recuperação de metais valiosos, como níquel, cobalto, cobre e ferro, a partir dos resíduos de baterias. A técnica baseia-se no princípio de fusão térmica, que envolve a aplicação de altas temperaturas, geralmente entre 800 e 1.500 °C, para fundir os materiais da bateria. Durante este processo, fornos elétricos ou fornos a arco são empregados para converter os resíduos em ligas metálicas e escórias. A fusão térmica provoca a queima de materiais orgânicos presentes nos eletrólitos e nos polímeros da bateria, resultando na redução dos metais à sua forma metálica, que, posteriormente, pode ser refinada através de processos hidrometalúrgicos para purificação e recuperação adicional (Wang *et al.*, 2022; Biswal *et al.*, 2024; CSIRO, 2024).

Uma das grandes vantagens da pirometalurgia é sua alta tolerância a impurezas, o que significa que o processo pode lidar eficazmente com baterias contendo materiais contaminantes, reduzindo a necessidade de etapas de pré-tratamento, como descarga e trituração. Esse aspecto torna o processo mais direto e

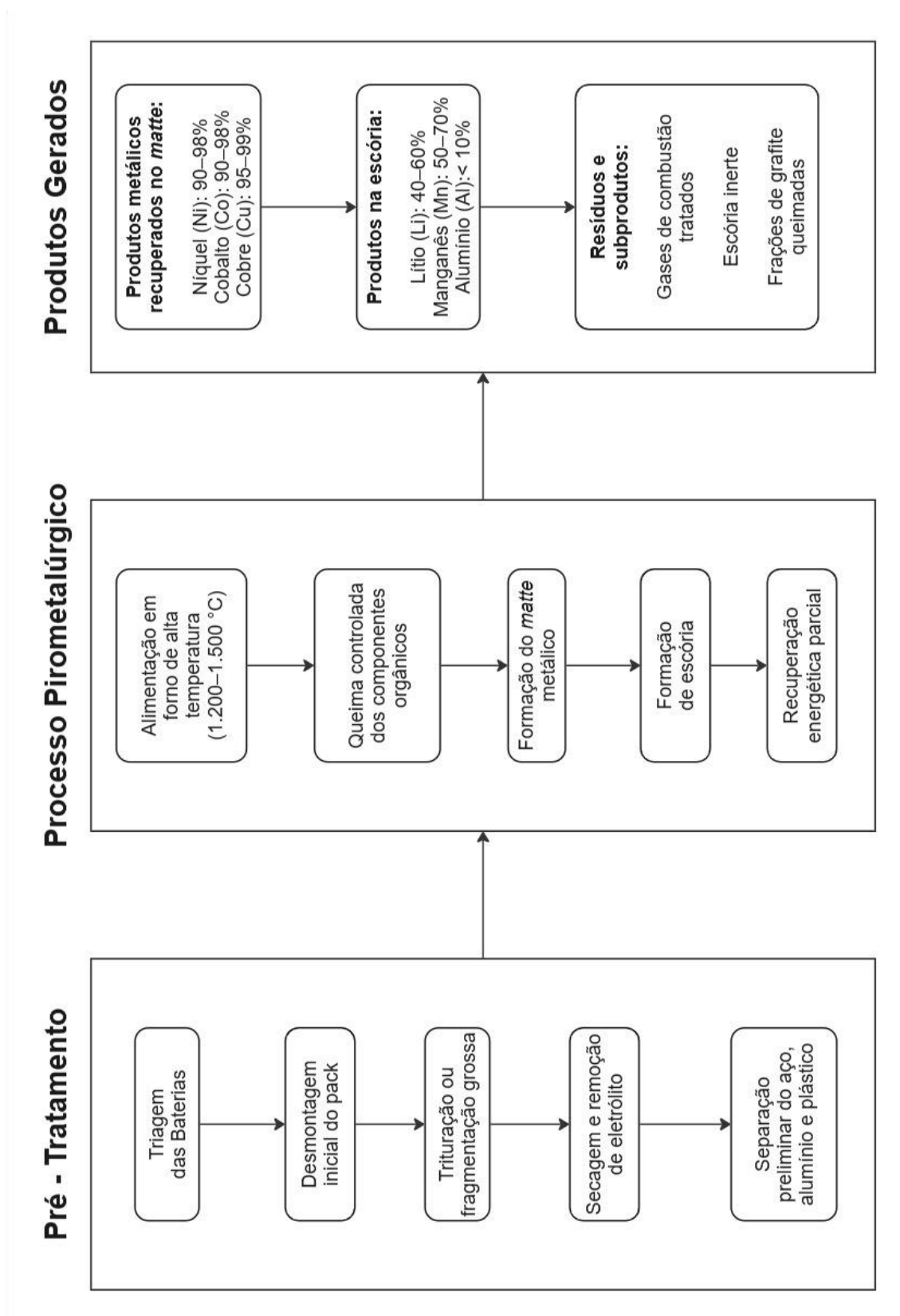
de baixo custo, especialmente quando comparado a outras técnicas de reciclagem mais complexas (Biswal *et al.*, 2024).

No entanto, a pirometalurgia apresenta algumas limitações. Wang *et al.* (2022) destacam que o principal desafio é o alto consumo energético, dado que as temperaturas envolvidas são muito elevadas, o que contribui para um alto custo operacional. Além disso, o método é conhecido por seu baixo rendimento na recuperação de lítio, com uma taxa de recuperação inferior a 50%. Grande parte do lítio e alumínio presentes nas baterias é perdida na escória, o que resulta em uma recuperação total reduzida desses materiais cruciais para a produção de novas baterias (Wang *et al.*, 2022; Rezaei *et al.*, 2025).

Outro ponto crítico é a emissão de gases e partículas durante o processo de fusão. O aquecimento das baterias pode liberar substâncias tóxicas, como compostos orgânicos voláteis e metais pesados, representando riscos tanto para os trabalhadores quanto para o meio ambiente. Para mitigar esses impactos, o processo pirometalúrgico exige a implementação de sistemas avançados de controle ambiental e filtragem de gases, como precipitadores eletrostáticos e sistemas de captura de emissões, a fim de garantir que as emissões sejam tratadas adequadamente antes de serem liberadas na atmosfera (Wang *et al.*, 2022).

O fluxograma na figura 5 mostra de forma sequencial as etapas que compõem a rota pirometalúrgica de reciclagem, desde o pré-tratamento até a obtenção dos produtos finais. É mostrado os subprodutos resultantes do processo, como escórias e rejeitos, destacando a eficiência média desta rota quando aplicada em escala industrial.

Figura 5- Fluxograma Pirometalurgia



Fonte: Autor, 2025.

2.5.2 Hidrometalurgia

A hidrometalurgia é considerada um dos métodos mais promissores no processo de reciclagem de baterias de íon-lítio, principalmente pela sua alta eficiência e sustentabilidade. Esse método se baseia na lixiviação química dos metais presentes nos eletrodos das baterias. A lixiviação pode ser realizada utilizando soluções ácidas ou básicas, como ácido sulfúrico (H_2SO_4), clorídrico (HCl) ou hidróxido de amônio (NH_4OH). Após a lixiviação, a solução passa por processos de precipitação seletiva, extração por solventes e eletrodeposição, para separar e purificar os metais valiosos presentes (Premathilake *et al.*, 2025).

Uma das principais vantagens da hidrometalurgia é sua capacidade de recuperar até 95% dos metais valiosos, incluindo lítio, níquel e cobalto. Isso ocorre devido à operação em temperaturas mais baixas, geralmente entre 60 e 90 °C, o que torna o processo mais seguro e energeticamente eficiente em comparação com a pirometalurgia, que requer temperaturas extremamente altas (Rezaei *et al.*, 2025). Além disso, a hidrometalurgia permite uma taxa de recuperação superior a 90% de lítio, o que é uma grande vantagem em relação à pirometalurgia, que possui um rendimento significativamente menor na recuperação desse metal (Biswal *et al.*, 2024).

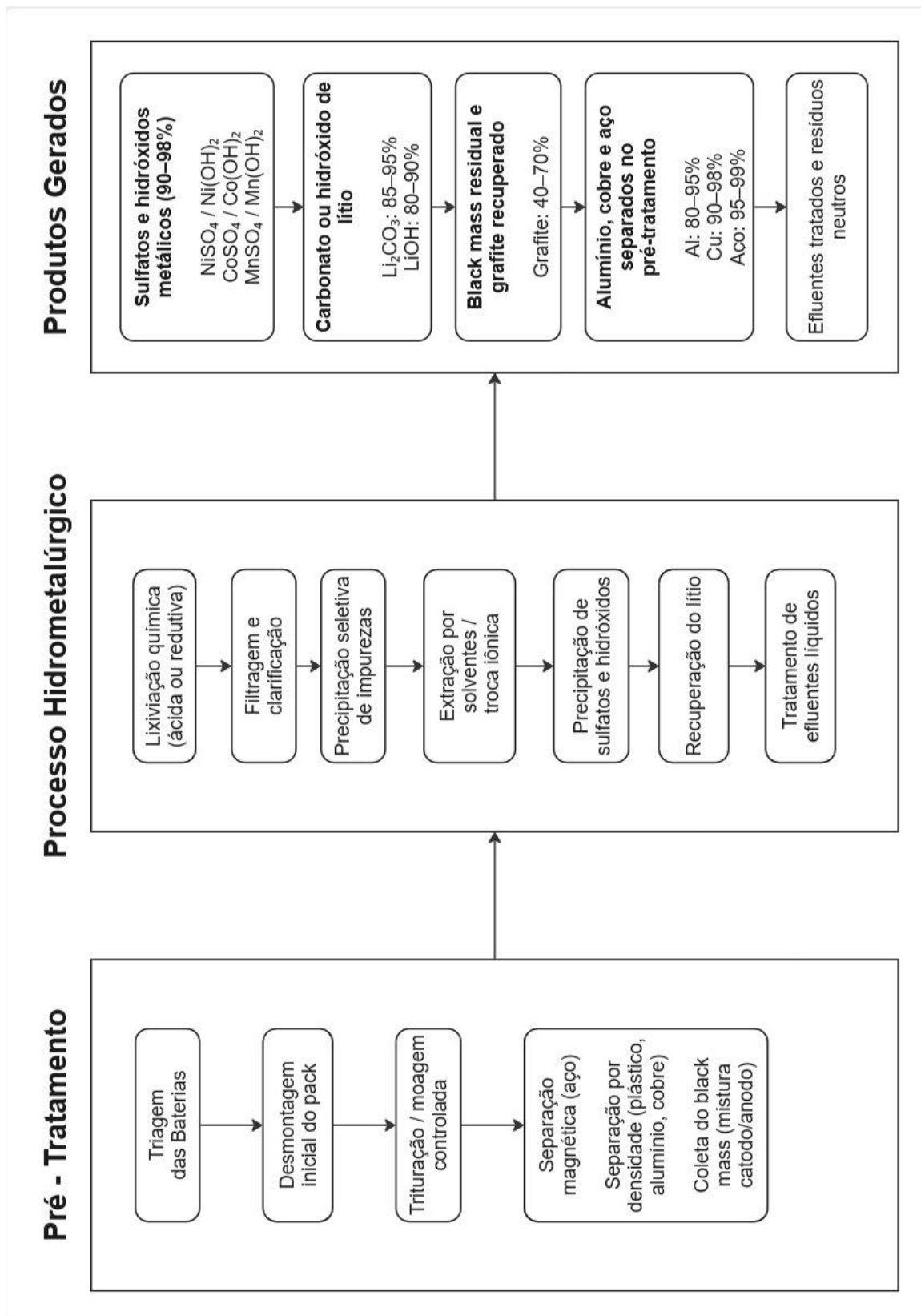
Outro ponto positivo da hidrometalurgia é sua flexibilidade industrial. O processo pode ser ajustado para diferentes composições químicas, permitindo que seja adaptado para lidar com uma variedade de baterias de íon-lítio com diferentes características. Isso proporciona uma flexibilidade significativa para a indústria, que pode adaptar suas operações de reciclagem conforme as características dos materiais disponíveis (Wang *et al.*, 2022).

No entanto, um dos problemas significativos desse processo é a geração de efluentes líquidos. Esses efluentes, provenientes dos reagentes usados durante a lixiviação, necessitam de um tratamento cuidadoso antes de serem descartados, o que adiciona complexidade ao processo de reciclagem. Além disso, a hidrometalurgia depende de reagentes químicos, cujo custo e impacto ambiental também devem ser levados em consideração. Embora o uso de ácidos e bases seja eficaz na dissolução dos metais, ele pode resultar na formação de resíduos químicos que precisam ser tratados de forma adequada para evitar impactos ambientais negativos (CSIRO, 2024).

Em resumo, a hidrometalurgia oferece uma abordagem mais sustentável e eficiente para a reciclagem de baterias de íon-lítio, com uma taxa de recuperação significativamente superior à do método pirometalúrgico. No entanto, desafios como a geração de efluentes líquidos e o custo dos reagentes ainda precisam ser gerenciados adequadamente para que o processo se torne mais amplamente viável e econômico (Wang *et al.*, 2022; Premathilake *et al.*, 2025).

O fluxograma na figura 6 mostra de forma sequencial as etapas envolvidas na rota hidrometalúrgica, desde o pré-tratamento e desmonte até a purificação final dos compostos metálicos, destacando a eficiência na recuperação de cobalto, níquel e lítio.

Figura 6- Fluxograma Hidrometalurgia



Fonte: Autor, 2025.

2.5.3 Reciclagem direta

O método de reciclagem direta procura reativar e recondicionar os materiais ativos através de tratamentos térmicos e químicos suaves (Wang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024), o que reduz o consumo de energia em até 60% quando comparado com os outros métodos.

A reciclagem direta preserva a estrutura cristalina dos materiais catódicos (como o LCO, o NMC e o NCA), durante o processo não ocorre a decomposição completa dos materiais. O processo também não faz a separação completa dos materiais reduzindo-os ao ponto de metais puros.

O objetivo é recondicionar e reintegrar estes materiais diretamente em células novas, esse processo economiza energia e diminui a quantidade de resíduos gerados.

Além dos tratamentos térmicos e químicos suaves, a reciclagem direta também possui algumas etapas adicionais de reativação estrutural dos cátodos, sendo elas a etapa de relitinhamento, a de reestruturação morfológica das partículas catódicas e a de remoção de camadas superficiais degradadas.

Os procedimentos restauram as propriedades do material ativo como a capacidade específica, a condutividade iônica e a estabilidade cristalina, isto permite que o desempenho eletroquímico dos componentes recuperados seja próximo do desempenho de componentes novos (Wang *et al.*, 2023).

A principal vantagem deste método é que ela mantém o valor agregado do material catódico, pois não existe a necessidade de refinar e sintetizar novamente os compostos.

Sua principal desvantagem está na sua aplicação industrial, ela é muito limitada devido à complexidade de separar de forma precisa os diferentes tipos de materiais catódicos, o processo exige uma triagem eficiente e uma identificação precisa do estado de saúde das baterias (Rezaei *et al.*, 2025).

As principais técnicas de auxílio usadas no diagnóstico das baterias são o ultrassom, espectroscopia Raman e o aprendizado de máquina, essas técnicas têm sido exploradas para automatizar a identificação e selecionar os módulos com o maior potencial de reaproveitamento (Zhao *et al.*, 2024).

A rota de reciclagem direta apresenta vantagens econômicas expressivas, ela elimina etapas presentes nas rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas que possuem um alto custo, as principais etapas eliminadas são o refino químico, a purificação

intensiva e ressíntese de compostos catódicos. O gasto energético evitado nessas etapas gera reduções de custo que ultrapassam 40% quando a rota é aplicada em escala industrial (Zhao *et al.*, 2024).

O processo possui um impacto ambiental reduzido, pois demanda um consumo de energia menor e quase não possui necessidade de reagentes químicos.

Apesar dessas vantagens, a reciclagem direta possui alguns desafios que devem ser levados em consideração antes da sua implantação industrial em larga escala.

Atualmente existe uma baixa padronização das substâncias químicas utilizadas nas baterias comerciais, como as variações entre NMC 111, 532, 622 e 811, além das diferenças entre NCA e LCO, o que gera a necessidade de sistemas de identificação e separação mais avançados.

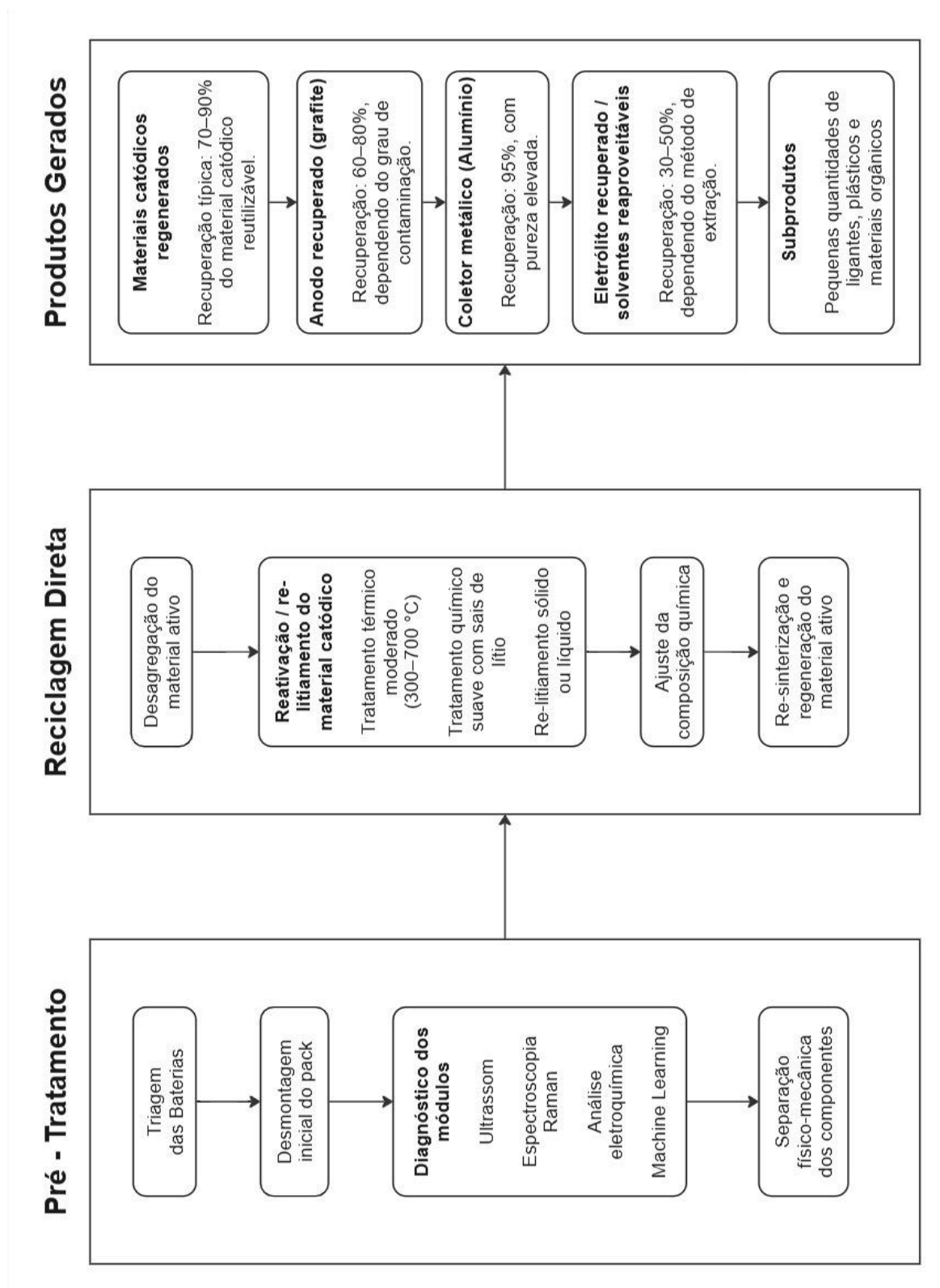
Estas pequenas variações, sendo químicas ou morfológicas, comprometem o desempenho do componente reconicionado, para solucionar esse problema é necessário plantas industriais equipadas com robótica e sensores com alta precisão, o processo de triagem seria feito de forma automatizada nessas plantas (Rezaei *et al.*, 2025). Embora o processo demonstre vantagens no setor ambiental, ele depende de uma infraestrutura tecnológica que ainda está em desenvolvimento.

Em relação aos impactos ambientais, ela não elimina totalmente a geração de resíduos, ainda são produzidos resquícios de eletrólitos, resíduos poliméricos e solventes orgânicos. Os solventes presentes nas misturas de eletrodos precisam ser tratados antes do descarte. Quando comparada com a rota hidrometalúrgica, a reciclagem direta produz uma quantidade muito menor de efluentes e resíduos (Biswal *et al.*, 2024).

A reciclagem direta se apresenta como uma rota promissora, embora a sua difusão ainda seja limitada pelos desafios relacionados à triagem dos materiais, a padronização e a integração tecnológica, o seu potencial econômico e a sua eficiência ambiental tornam esta rota uma das principais alternativas no futuro da reciclagem de baterias de íon-lítio (Zhao *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2023).

O fluxograma da figura 7 mostra as etapas do processo de reciclagem direta, desde a triagem e desmontagem até os tratamentos térmicos e a seleção assistida por diagnóstico tecnológico.

Figura 7- Fluxograma Reciclagem direta



Fonte: Autor, 2025.

As Tabelas 4 e 5 mostra um comparativo completo entre as principais rotas de reciclagem de baterias de íon-lítio, a tabela auxilia na compreensão das vantagens e limitações de cada método, servindo de base para a avaliação das rotas.

Tabela 4- Comparação dos métodos de reciclagem de baterias de íon-lítio

Característica	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Reciclagem Direta
Temperatura de operação	1.200–1.500 °C	25–80 °C	60–200 °C
Etapas principais	Fusão, redução, escória	Lixiviação, precipitação, purificação	Recondicionamento de cátodos
Metais recuperados	Co, Ni, Cu (alto rendimento); Li (baixo)	Co, Ni, Mn, Li (alto rendimento)	Material catódico ativo (LCO, NMC, NCA)
Eficiência de recuperação	50–70% (com perdas de Li e Al).	85–95% (altas taxas para Li, Ni, Co, Mn).	70–95%
Consumo energético	Alto	Médio	Baixo
Complexidade operacional	Baixa	Média	Alta (exige triagem precisa)

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

Tabela 5 - Aspectos Econômicos e Ambientais

Característica	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Reciclagem Direta
Custo estimado por tonelada	> US\$ 4.000/t (\approx > US\$ 4,00/kg) – alto custo energético e de tratamento de gases.	US\$ 1.500 a 1.800/t (\approx 1,50–1,80/kg) – custos moderados, dependem dos reagentes.	US\$ 3.000 a 4.000/t (\approx 3,00–4,00/kg) – depende da triagem e reativação do material catódico.
Preservação do valor do material	Baixa – destrói a estrutura catódica.	Média – recupera metais, não o material ativo.	Alta – preserva estrutura cristalina (LCO, NMC, NCA).
Geração de resíduos	Alta – escórias, poeiras e gases.	Média – efluentes líquidos que exigem tratamento.	Baixa – resíduos significativamente menores.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

A Tabela 6 mostra as taxas médias de recuperação de metais críticos obtidas através das principais rotas de reciclagem de baterias de íon-lítio. Estes valores, permitem comparar o desempenho metalúrgico de cada rota, a tabela deixa evidente as diferenças de rendimento e seletividade de cada rota.

Tabela 6- Eficiência de recuperação por método de reciclagem

Metal crítico	Hidrometalurgia (%)	Pirometalurgia (%)	Reciclagem direta (%)	Observações
Lítio (Li)	80–95	30–55	80–95	Alta perda na pirometalurgia
Níquel (Ni)	90–98	90–97	90–98	Taxas elevadas em todos os métodos.
Cobalto (Co)	90–98	95–99	90–98	Cobalto é altamente recuperável por todas as rotas.
Manganês (Mn)	80–95	< 40	85–95	Manganês é pouco recuperado por processos térmicos.
Alumínio (Al)	85–95	Perda total	85–95	Alumínio é queimado/perdido na pirometalurgia.
Grafite	70–90	Perda total	80–95	Apenas hidrometalurgia e direta conseguem recuperar grafite.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

2.5.4 Tecnologias emergentes e automação

Os avanços tecnológicos recentes estão explorando a integração de robótica, inteligência artificial e automatização das etapas de desmontagem e pré-tratamento das baterias (Wang *et al.*, 2023).

A técnica de tele-robótica e o aprendizado de máquina vão permitir o reconhecimento automático de módulos, a identificação de possíveis riscos térmicos e a separação seletiva dos componentes de forma precisa e segura.

Com o desenvolvimento dessas tecnologias podemos reduzir o contato humano direto com materiais reativos, aumentando o nível de segurança dos trabalhadores, além de diminuir os custos operacionais elas também vão aumentar a taxa de recuperação e a rastreabilidade de materiais.

Outro tipo de pesquisa que se mostra promissor é no campo do uso de simulações integradas de processos de reciclagem, um exemplo é o modelo ABatRe-Sim (Wang *et al.*, 2023), este modelo utiliza algoritmos de otimização para avaliar os fluxos de materiais, energia e emissões, criando e analisando diferentes cenários de reciclagem. As simulações integradas vão ajudar na tomada de decisão de forma estratégica, podendo determinar quais rotas são mais adequadas a determinado volume e composição de resíduos.

A combinação dos métodos consolidados com as diferentes tecnologias emergentes pode gerar cadeias híbridas de reciclagem, essas cadeias vão estar mais adaptadas à realidade econômica e ao volume de resíduos de cada país.

A rota híbrida já está sendo utilizada por empresas como a Umicore (Bélgica), a Li-Cycle (Canadá) e a Redwood Materials (EUA), no Brasil temos projetos piloto que estão em desenvolvimento pela USP, CEMIG e CBMM, o sucesso dessas plantas sinaliza o início de promissor de uma nova cadeia industrial.

Como no Brasil a quantidade de baterias em fim de vida ainda é baixa, o recomendado é uma abordagem modular regionalizada, no Brasil esse modelo com unidades locais de pré-tratamento e envio para plantas centrais de refino ou reativação é o mais viável economicamente (Cabral-Neto *et al.*, 2023; ANEEL, 2022).

Em complemento às rotas alternativas, pesquisas recentes estão desenvolvendo a utilização de robôs autônomos no processo de desmontagem, eles estão sendo treinados utilizando técnicas de *Learning from Demonstration* (LfD).

Neste método, o robô é ensinado a replicar movimentos previamente executados por um operador humano, o que reduz significativamente o tempo de programação, isso permite que o robô se adapte mais rápido a diferentes modelos de baterias, podendo lidar melhor em cenários de forte heterogeneidade entre fabricantes.

Outra vantagem deste método de aprendizagem é que ele aprimora a capacidade dos robôs ao lidar com módulos danificados, conectores deformados e padrões de fixação que ainda não estão padronizados.

Outro avanço importante é o uso de modelos com visão integrados a sistemas de detecção de risco térmico, esses modelos são capazes de encontrar e identificar hotspots, indícios de curto-circuito interno e padrões anômalos de impedância elétrica durante a etapa de pré-tratamento.

A detecção antecipada permite a remoção dos módulos que apresentem alguma instabilidade, o que reduz a probabilidade de acidentes envolvendo fuga térmica e aumenta a segurança operacional do processo (Kay *et al.*, 2022). Nas linhas automatizadas, os algoritmos de detecção térmica utilizam imagens infravermelhas e espectrometria para reduzir o número de incidentes em até 35% (Tong *et al.*, 2024).

A utilização dos métodos de aprendizado profundo em robôs para predição da vida útil restante em baterias torna o processo de triagem mais eficiente, permitindo ao sistema identificar quais células e módulos possuem o maior potencial de uso na segunda vida ou maior rendimento na reciclagem.

Para fazer a seleção os modelos de inteligência analisam dados elétricos, térmicos e estruturais, através deles as inteligências artificiais aprendem a prever a degradação futura e classificam automaticamente os módulos de acordo com a sua viabilidade para reuso ou reciclagem direta.

Estão crescendo os investimentos na criação e desenvolvimento dos sistemas de gêmeos digitais voltados para o setor de reciclagem, nestes sistemas toda a planta industrial é representada digitalmente em tempo real, são representadas todas as etapas, desde a desmontagem até as etapas finais de reativação ou refino.

Com essa tecnologia é possível testar diferentes condições de operação, prever gargalos, identificar desperdícios e simular vários cenários de produção onde

ocorre o aumento de volume ou a composição dos resíduos é variável. O conjunto entre o gêmeo digital, sensores IoT, modelos termoquímicos e dados de rendimento será importante para a otimização contínua dos sistemas de reciclagem (Tong *et al.*, 2024).

A combinação das tecnologias de robótica avançada e inteligência artificial para fazer o diagnóstico, a detecção de riscos térmicos, a previsão de vida útil em conjunto com o sistema de gêmeos digitais se mostra como o futuro operacional na reciclagem de baterias de íon-lítio, a junção destes mecanismos caracteriza processos mais seguros, previsíveis, eficientes e escaláveis.

Com o aumento do volume de baterias descartadas globalmente, a empregabilidade dessas tecnologias se torna indispensável para garantir a competitividade e a sustentabilidade das futuras cadeias industriais de reciclagem. As Tabelas 7 e 8 mostram as principais tecnologias utilizadas na triagem e no diagnóstico do estado de saúde de baterias de íon-lítio. Estes métodos são essenciais para identificar módulos reutilizáveis, detectar riscos térmicos e otimizar a separação dos componentes. A comparação entre as tecnologias permite compreender quais são as melhores soluções para atender as demandas de segurança e eficiência das plantas de reciclagem.

Tabela 7- Técnicas de Inspeção Não Destrutiva

Tecnologia	Descrição	Precisão média	Aplicações
Inspeção por Imagem RGB Automatizada	Uso de câmeras industriais e algoritmos de visão computacional para identificar danos.	80–90%	Pré-triagem visual, identificação de módulos danificados, classificação inicial para desmonte.
Termografia Infravermelha (IR)	Sensores IR detectam anomalias térmicas em módulos ou células.	85–95%	Diagnóstico de segurança, identificação de hotspots, triagem de módulos instáveis.
Teste Elétrico Automatizado (OCV / EIS)	Medição de tensão de circuito aberto, impedância e resposta AC para avaliar o estado de saúde (SOH).	92–98%	Determinação de SOH, decisão sobre segunda vida ou reciclagem metalúrgica.
Inteligência Artificial Aplicada	Algoritmos treinados para prever falhas, classificar módulos, interpretar sensores e otimizar decisões de triagem.	90–99% (dependendo da base de dados)	Previsão de vida útil, automação de triagem, otimização da linha de desmontagem.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

Tabela 8- Técnicas Avançadas

Tecnologia	Descrição	Precisão média	Aplicações
Espectroscopia (NIR / Raman)	Emissão e leitura de espectros para identificar composição química e possíveis degradações internas.	90–97%	Avaliação de composição, identificação de degradação química, classificação para reciclagem direta.
Tomografia Computadorizada (CT Scan)	Imagens internas tridimensionais sem desmontagem, revelando falhas estruturais e separação de camadas.	> 98%	Diagnóstico avançado, identificação de falhas internas, pesquisa e validação de modelos industriais.

Fonte: Adaptado de Biswal *et al.* (2024), Premathilake *et al.* (2025), CSIRO (2024) e Wang *et al.* (2023).

2.6 Segunda vida e reuso de baterias de veículos elétricos

As baterias de íon-lítio possuem um conceito chamado de segunda vida (second life), ele consiste no reaproveitamento de baterias que já não atendam os requisitos de desempenho para o uso automotivo, mas ainda possuem uma capacidade residual significativa, geralmente elas ainda mantêm a capacidade de 70% à 80% de sua carga original (Jiaying *et al.*, 2023; Rezaei *et al.*, 2025). Ao reutilizar essas baterias, estende-se o ciclo de vida dos materiais e retarda-se a geração de resíduos, isso otimiza o retorno energético e econômico de toda a cadeia produtiva.

Para garantir a segurança e a confiabilidade as baterias são submetidas a processos de triagem, testes de desempenho e reconfiguração. As células e módulos que mantiverem parâmetros elétricos aceitáveis serão reorganizadas em novas aplicações estacionárias, como por exemplo em sistemas de armazenamento de energia, microrredes elétricas (*microgrids*) e suporte de rede (*grid balancing*) (CSIRO, 2024; Cabral-Neto *et al.*, 2023).

O uso dessa estratégia reduz os custos de investimento em novas baterias e aumenta a estabilidade de sistemas que utilizam fontes de energia renováveis

intermitentes, como a solar e a eólica (ANEEL, 2022; Tarpeh *et al.*, 2025). A segunda vida também agrega valor ambiental, pois minimiza a necessidade de mineração e refino de novos metais, além de adiar o descarte final das baterias (Biswal *et al.*, 2024). Um estudo feito por Jiaying *et al.* (2023) mostrou que a reutilização de baterias automotivas em sistemas estacionários é capaz de diminuir as emissões totais de CO₂ do ciclo de vida em até 30%, quando comparada com a substituição por baterias novas.

O custo nivelado de armazenamento de energia (LCOE) passa a ser inferior, já que os módulos reaproveitados representam uma economia de até 40% em relação a novos sistemas de módulos (Rezaei *et al.*, 2025; Cabral-Neto *et al.*, 2023). No uso residencial elas estão sendo usadas no armazenamento de energia solar fotovoltaica em projetos-piloto feitos por empresas e instituições de pesquisa.

No Brasil desta-se o projeto “*CPFL Second Life*”, esse projeto integra baterias de veículos elétricos que foram desativadas em sistemas estacionários conectados à rede (*on-grid*), ele está servindo como fonte de estudos sobre o desempenho e segurança desse tipo de projeto (ANEEL, 2022). Algumas iniciativas semelhantes têm surgido em países como o Japão, a Alemanha e a China, porém o seu foco é na expansão da infraestrutura de armazenamento distribuído e na redução de picos de demanda elétrica da rede (Kraemer *et al.*, 2023; CSIRO, 2024).

Para que o reuso de baterias seja viável em larga escala, é necessária uma padronização do processo de avaliação e certificação das baterias usadas. Devem ser feitas medições de capacidade, resistência interna, degradação térmica e segurança estrutural (Zhao *et al.*, 2024).

Algumas ferramentas baseadas em inteligência artificial estão sendo desenvolvidas para analisar o histórico de uso (ciclagem, temperatura, tensão), através dessas análises é possível prever o desempenho residual, no futuro essas ferramentas vão garantir a confiabilidade das baterias reaproveitadas (Wang *et al.*, 2023).

Outras aplicações são o setor de micromobilidade elétrica e sistemas *off-grid* para comunidades isoladas, o setor de micromobilidade inclui bicicletas, patinetes e veículos urbanos leves, essa categoria de veículos demanda uma potência e uma densidade energética pequena, os sistemas *off-grid* de comunidades isoladas tem sido uma alternativa eficiente de democratização energética, principalmente em regiões sem acesso à rede elétrica (Cabral-Neto *et al.*, 2023). Essas aplicações

reduzem o custo de produção e ampliam o acesso a soluções elétricas sustentáveis em mercados emergentes (Rezaei *et al.*, 2025).

O reuso de baterias apresenta desafios técnicos e regulatórios, a heterogeneidade das baterias em fim de vida muda dependendo do fabricante, da química, do histórico de uso e do estado de degradação, todos esses fatores tornam complexa a padronização de módulos reaproveitados (Biswal *et al.*, 2024). A ausência de normas técnicas específicas para baterias recondicionadas que regulem a segurança e a rastreabilidade ainda é um problema (Brasil, 2010; Comissão Europeia, 2023). Em muitos países, incluindo o Brasil, a ausência de um marco regulatório faz com que baterias recondicionadas ainda sejam tratadas legalmente apenas como resíduos, o que dificulta sua comercialização (Kraemer *et al.*, 2023).

Outras questões como as logísticas e econômicas também geram problemas para a implementação do reuso de baterias, o transporte, armazenamento e reconfiguração das baterias necessita de uma infraestrutura especializada, esse tipo de estrutura não é tão viável ou não está disponível em países onde existe uma baixa densidade de veículos elétricos.

Como não existe um mercado secundário formal com garantias técnicas o interesse de investidores privados acaba sendo reduzido, para superar esse tipo de desafio é necessário o incentivo de políticas públicas e de parcerias público-privadas com o objetivo de desenvolver centros regionais de recondicionamento e testes (ANEEL, 2022; Cabral-Neto *et al.*, 2023).

O reuso de baterias em segunda vida é essencial para estender o ciclo entre o uso automotivo e a reciclagem final, essa etapa estende a utilidade dos materiais e reduz os custos de energia armazenada, ela é excelente para a consolidar um modelo de economia circular no setor elétrico.

No Brasil é necessário estabelecer normas de segurança, padrões de desempenho, infraestrutura de testes e incentivos econômicos adequados, a integração entre o governo, universidades, institutos de pesquisa e indústrias vai determinar se o reuso é uma solução concreta e sustentável para o Brasil.

2.7 Modelos internacionais de reciclagem de baterias

É importante fazer um estudo comparativo sobre as políticas e as estratégias internacionais de reciclagem de baterias de íon-lítio, esse estudo servirá como base para compreender os possíveis caminhos de estruturação desta cadeia no Brasil. As 3 maiores referências mundiais no setor são a União Europeia, a China e os Estados Unidos, cada um deles adotou uma estratégia distinta, mas que se complementam no desenvolvimento de marcos regulatórios, infraestrutura industrial e mecanismos econômicos visando a criação de uma economia circular (Rezaei *et al.*, 2025; Biswal *et al.*, 2024).

2.7.1 União Europeia

A União Europeia (UE) se destaca pelo seu marco regulatório, ele é o mais abrangente sobre baterias em fim de vida. O marco regulatório EU 2023/1542, conhecido como *EU Battery Regulation*, substituiu a antiga Diretiva 2006/66/EC, foram introduzidas metas obrigatórias de reciclagem de baterias, taxas mínimas de conteúdo reciclado e rastreabilidade completa via *battery passport* (Comissão Europeia, 2023).

As novas metas incluem taxas mínimas de recuperação para o lítio (50%), níquel (90%), cobalto (90%) e cobre (90%) até o ano de 2030, também é exigido que as novas baterias comercializadas contenham em sua composição uma fração de material reciclado (Rezaei *et al.*, 2025).

O *battery passport* é um sistema que determina um avanço importante, ele permite monitorar e acompanhar todo o ciclo de vida da bateria, nele ficam registradas informações sobre a origem, a composição, o histórico de uso, o transporte e os processos de reciclagem pelos quais a bateria passou (Zanoletti *et al.*, 2024).

A rastreabilidade é fundamental para o desenvolvimento de uma cadeia de reciclagem transparente e confiável, ela estimula o reaproveitamento, isto garante que os materiais recuperados retornem para o ciclo produtivo de maneira certificada.

Outras políticas implementadas pela UE são as políticas de responsabilidade estendida do produtor (*EPR*), estas determinam obrigações aos fabricantes e importadores de baterias, eles devem garantir o recolhimento e destino final

ambientalmente adequado dos produtos após o uso (Comissão Europeia, 2023). O objetivo desse mecanismo é gerar incentivos econômicos no desenvolvimento de designs sustentáveis de baterias e o investimento em infraestruturas de reciclagem. Contudo a UE ainda enfrenta alguns desafios, como o alto custo energético dos processos metalúrgicos e a falta de plantas industriais de refino químico em determinados países, isto limita a autossuficiência europeia na recuperação de materiais críticos (CSIRO, 2024; Tarpeh *et al.*, 2025).

A experiência europeia mostra que um marco regulatório bem estabelecido em conjunto com a rastreabilidade digital é ótimo para incentivar o desenvolvimento de cadeias sustentáveis, porém ainda são dependentes de apoio financeiro para a garantir a viabilidade prática da consolidação industrial (Premathilake *et al.*, 2025).

2.7.2 China

A China adotou uma estratégia diferente da UE, a estratégia chinesa é caracterizada pela coordenação centralizada entre governo, fabricantes e empresas de reciclagem. A China adotou essa estratégia no ano de 2018, foi implementado uma série de políticas nacionais que estabelecem a responsabilidade direta dos fabricantes (OEMs) no rastreamento, na coleta e na reciclagem das baterias dos veículos elétricos (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

A política adotada estabeleceu uma cadeia vertical integrada, essa cadeia conecta montadoras, empresas de logística e recicladores licenciados através de sistemas digitais de rastreabilidade (Rezaei *et al.*, 2025). O resultado disto foi a China se tornando líder global em capacidade instalada de reciclagem, atualmente ela possui os maiores complexos industriais operando rotas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas combinadas, elas são capazes de processar centenas de milhares de toneladas de resíduos anualmente (Biswal *et al.*, 2024).

As empresas GEM, Brunp Recycling e a CATL operam utilizando o modelo de ciclo fechado (*closed-loop*), neste modelo os materiais recuperados retornam para à fabricação de novas baterias (Zhao *et al.*, 2024). A cadeia produtiva Chinesa é sustentada por subsídios governamentais, incentivos fiscais e planos quinquenais de desenvolvimento tecnológico, os planos determinam os valores investidos em inovação e na criação de polos regionais de reciclagem (Wang *et al.*, 2023).

A China obteve sucesso nos quesitos de escala e produtividade, segundo especialistas os desafios a serem enfrentados pela China serão a rastreabilidade e a padronização de dados e os riscos de práticas ambientais desiguais entre as províncias (Rezaei *et al.*, 2025). O modelo chinês demonstra o valor da coordenação estatal na integração industrial e o incentivo à escala, a postura adotada pelo governo chinês tem sido determinante para a viabilidade econômica da reciclagem chinesa, a China serve como referência para países em desenvolvimento que ainda estão estabelecendo suas cadeias de reciclagem.

2.7.3 Estados Unidos

A estratégia adotada pelos Estados Unidos para o avanço da reciclagem de baterias é considerada uma estratégia mista entre o mercado e a regulação ambiental, o governo oferece um grande apoio à inovação tecnológica e à industrialização verde.

A *Environmental Protection Agency (EPA)* define as diretrizes do manuseio, transporte e tratamento de baterias dentro do marco estabelecido pela *Resource Conservation and Recovery Act (EPA, 2023)*, o Departamento de Energia (*DOE*) atua financiando e coordenando os projetos de reciclagem em larga escala por todo o país (CSIRO, 2024).

O governo norte-americano inaugurou em 2022 o programa *Lithium-Ion Battery Recycling Prize*, este programa incentiva o desenvolvimento de soluções inovadoras nos setores de desmontagem, reprocessamento e reuso de baterias (Wang *et al.*, 2023). Parte dos recursos do *Inflation Reduction Act (IRA)* foi redirecionada para a construção de plantas de reciclagem no país, o intuito desse programa é reduzir a dependência externa de lítio e cobalto (Premathilake *et al.*, 2025).

As empresas privadas Redwood Materials, Li-Cycle e Ascend Elements estão liderando a hidrometalurgia em larga escala nos Estados Unidos, estabeleceram contratos com as montadoras Tesla, Ford e BMW, as montadoras se comprometeram com o fornecimento de sucata e recompra dos materiais refinados (Rezaei *et al.*, 2025).

As parcerias público-privadas estabelecidas nos Estados Unidos criaram um modelo eficaz integrando inovação tecnológica e instrumentos financeiros de

estímulo, o mercado de reciclagem americano se consolidou como um mercado competitivo e tecnologicamente avançado.

O que diferencia o modelo estadunidense é a priorização da autossuficiência tecnológica, a valorização da inovação privada e o apoio estatal, esse modelo tem acelerado a criação de uma infraestrutura nacional extremamente competitiva (Biswal *et al.*, 2024; Rezaei *et al.*, 2025).

2.7.4 Análise comparativa entre os modelos internacionais

Cada modelo possui as suas vantagens e desvantagens, a comparação entre os três modelos de referência serve de embasamento para as possíveis abordagens a serem implementadas no Brasil, o objetivo deste estudo é encontrar lições valiosas para o contexto brasileiro.

Em síntese podemos resumir as abordagens dos três da seguinte forma:

- União Europeia: Tem como foco o normativo e ambiental, com ênfase em rastreabilidade e estabelece metas de conteúdo reciclado;
- China: Possui a maior cadeia produtiva em escala industrial, o estado coordena a cadeia produtiva completa e gera incentivos diretos à indústria;
- Estados Unidos: Investe bastante na inovação tecnológica e na competitividade tecnológica de empresas privadas, utiliza do financiamento público e parcerias público-privadas para sustentar a cadeia de produção.

A UE cria mercados de coleta e reciclagem de baterias, além de regular o comportamento de cada um dos agentes da cadeia completa, o governo Chinês procura garantir o volume e a viabilidade de recursos através da centralização dos pólos industriais e da escala dos mesmos, e os EUA desenvolvem avanços tecnológicos e promovem a autonomia produtiva.

O modelo europeu é eficiente do ponto de vista regulatório, mas o seu modelo é bastante custoso; o modelo chinês possui a maior capacidade e é o mais rápido, mas é extremamente dependente do Estado, o modelo americano é o mais dinâmico, porém está concentrado em poucas empresas privadas (Premathilake *et al.*, 2025; Rezaei *et al.*, 2025).

A integração de elementos de cada um dos modelos cria um caminho mais equilibrado, o que é o ideal para os países em desenvolvimento estruturarem suas cadeias de reciclagem.

A Tabela 9 mostra o panorama da capacidade instalada dos centros de reciclagem de baterias de íon-lítio em diferentes países, com destaque para as principais empresas operantes no setor de cada país. Estes parâmetros são essenciais para avaliar a competitividade e a maturidade industrial de cada país.

Tabela 9- Capacidade e empresas líderes em reciclagem de baterias

País / Região	Capacidade Instalada (t/ano)	Principais Empresas / Players	Tecnologia Predominante
China	500.000 – 700.000	CATL, Brunp Recycling (subsidiária da CATL), GEM Co., Huayou Cobalt	Hidrometalurgia + Pirometalurgia
União Europeia	120.000 – 180.000	Umicore (Bélgica), Northvolt (Suécia), Accurec (Alemanha)	Hidrometalurgia + Reciclagem Direta
Estados Unidos	80.000 – 120.000	Redwood Materials, Li- Cycle (parcialmente), Ascend Elements	Hidrometalurgia + Reciclagem Direta
Canadá	30.000 – 40.000	Li-Cycle, Electra Battery Materials	Hidrometalurgia
Japão	40.000 – 60.000	Nissan, Sumitomo Metal Mining	Pirometalurgia + Hidrometalurgia
Coreia do Sul	70.000 – 100.000	LG Energy Solution, SungEel HiTech	Hidrometalurgia
Brasil (em projeto / piloto)	2.000 – 5.000	USP (projeto piloto), CBMM, CEMIG, Institutos Senai	Pré-tratamento + Hidrometalurgia (piloto)

Fonte: Adaptado de Rezaei *et al.* (2025), CSIRO (2024), Comissão Europeia (2023), DOE (2024) e Cabral-Neto *et al.* (2023).

2.7.5 Lições aplicáveis ao contexto brasileiro

Utilizado como base os modelos internacionais e analisando as suas características, destacaram-se cinco recomendações pro desenvolvimento da cadeia de reciclagem de baterias no Brasil:

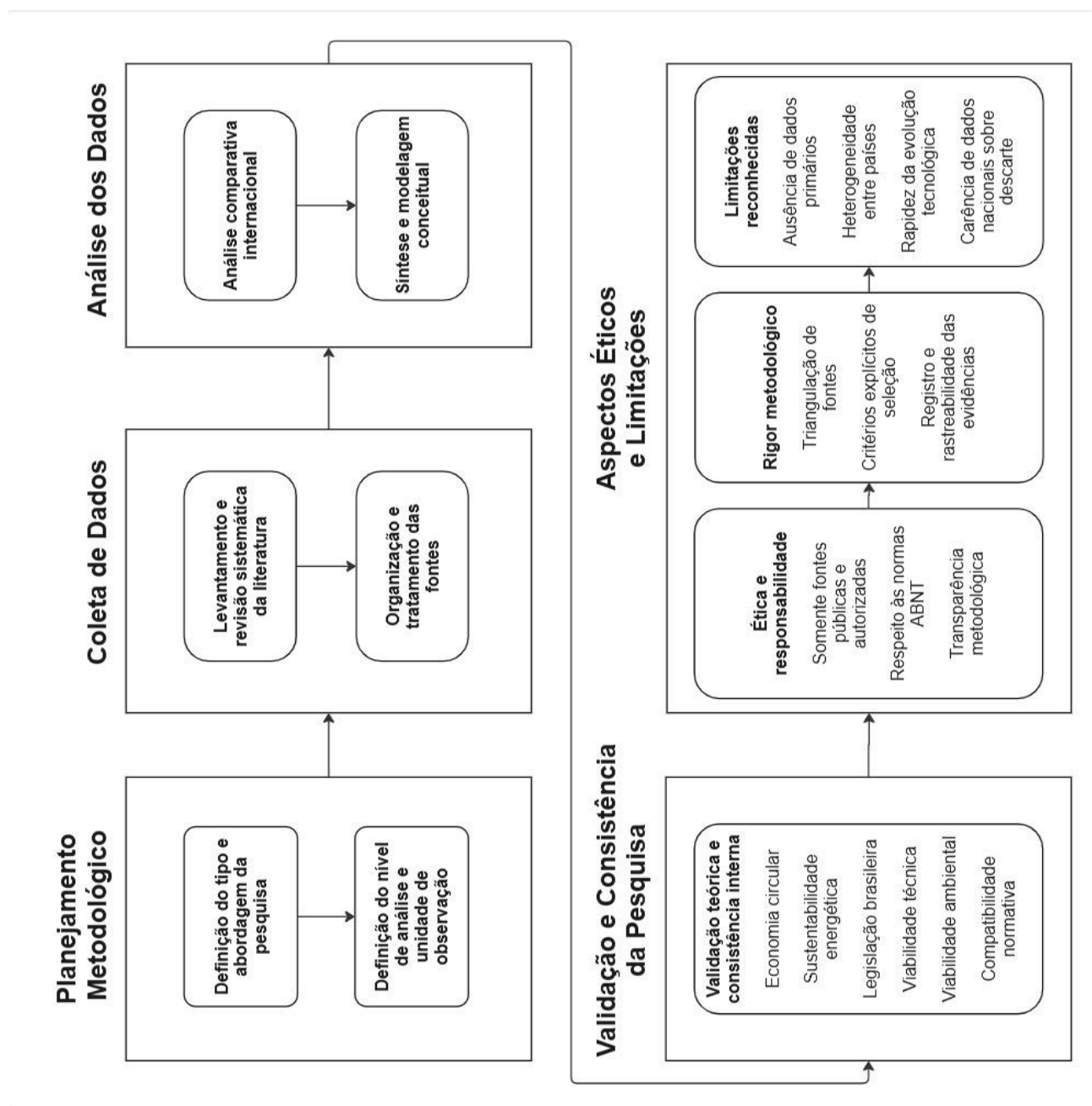
- Estabelecer um marco regulatório específico para a reciclagem de baterias, inspirado no modelo europeu, o marco deve possuir metas graduais de recuperação e exigir a implementação da rastreabilidade digital das baterias.
- Incentivar e apoiar a criação de polos regionais de reciclagem, seguindo o modelo chinês de integração entre as indústrias, as universidades e o governo.
- Criar e incentivar parcerias público-privadas e linhas de financiamento econômico específicas para novas plantas e projetos de desenvolvimento tecnológico, assim como o modelo norte-americano.
- Implementar a responsabilidade estendida do produtor (EPR), a EPR garante que fabricantes e importadores atuem ativamente na coleta e destinação final dos resíduos de baterias.
- Promover a criação de programas de capacitação técnica e inovação, criar centros de pesquisa especializados no desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento de materiais críticos.

Estas cinco ações vão alinhar o Brasil às boas práticas internacionais, vão fortalecer a economia circular interna e contribuir para o modelo de transição energética sustentável.

3 METODOLOGIA

O fluxograma mostrado na figura 8 sintetiza a metodologia utilizada neste trabalho, nele são apresentadas as etapas de planejamento, coleta de dados, análise dos dados, as validações da pesquisa e limitações. Essa representação visual auxilia na compreensão de como os dados foram coletados, interpretados e integrados até a construção final do modelo proposto, assegurando a transparência e a coerência dos resultados e a proposta desenvolvida neste trabalho.

Figura 8- Fluxograma Metodologia



Fonte: Autor, 2025.

A metodologia deste trabalho define os procedimentos técnicos, científicos e analíticos utilizados no desenvolvimento do mesmo para alcançar os objetivos propostos.

Neste capítulo serão descritas as etapas de estudo, os métodos de coleta e análise dos dados, as ferramentas utilizadas e os critérios de validação dos resultados. Adotou-se uma abordagem qualitativa e exploratória, foi feita uma revisão bibliográfica

sistemática e análises comparativas entre os cenários nacionais e internacionais de reciclagem de baterias de íon-Lítio.

O trabalho foi embasado no levantamento de dados provenientes de publicações científicas, relatórios técnicos e bases de dados de órgãos reconhecidos, como a Agência Internacional de Energia (*IEA*), a European Battery Alliance (*EBA*) e o Ministério de Minas e Energia (*MME*).

As fontes deste trabalho foram selecionadas com base nos critérios de relevância, atualidade (últimos cinco anos) e conformidade com o tema central do estudo.

O trabalho buscou integrar aspectos técnicos, econômicos e ambientais, foram feitas tabelas comparativas e análises quantitativas sobre a eficiência dos processos de reciclagem, custos energéticos, emissões evitadas e taxas de recuperação de materiais.

O Capítulo 3 está organizado da seguinte forma:

- No item 3.1, apresenta-se o enquadramento metodológico geral e a justificativa da abordagem científica adotada;
- O item 3.2 descreve o procedimento de levantamento e seleção das fontes bibliográficas;
- O item 3.3 detalha a estrutura de análise comparativa dos processos de reciclagem;
- No item 3.4, são apresentados os critérios de avaliação e indicadores de desempenho ambiental e econômico;
- O item 3.5 aborda as ferramentas e técnicas empregadas na organização e interpretação dos dados;
- Por fim, o item 3.6 discute as limitações do estudo e a validade metodológica dos resultados.

3.1 Tipo e abordagem da pesquisa

Este trabalho é um estudo exploratório e descritivo com o objetivo de elaborar um modelo conceitual de reciclagem de baterias de veículos elétricos adaptado ao contexto brasileiro. A escolha deste método de estudo decorre da necessidade de

integrar múltiplas camadas de conhecimento técnico-científico, normativa e organizacional, cada uma das camadas exige uma interpretação crítica e comparações institucionais e normativas (Gil, 2019; Minayo, 2016).

3.1.1 Justificativa epistemológica e ontológica

Epistemologicamente a pesquisa se apoia num paradigma criticista, onde o objetivo é compreender os significados, as práticas institucionais e as interações entre atores (p.ex.: fabricantes, recicladores, agências reguladoras) e estruturas (marcos legais, infraestrutura industrial, mercados).

Essa postura mais crítica permite identificar como as políticas e tecnologias se co-constroem dentro dos contextos institucionais e como elas condicionam a viabilidade técnica e econômica dos arranjos de reciclagem (Minayo, 2016).

Ontologicamente parte-se da premissa de que as realidades sociais e técnicas são construídas durante os períodos históricos, as soluções mais eficazes dependem da interação entre fatores técnicos e decisões políticas, sendo essa a razão pela qual se optou pela análise qualitativa e a síntese normativa.

3.1.2 Caracterização do tipo de pesquisa

Este trabalho de pesquisa adotou uma abordagem metodológica multifacetada que possui as seguintes características:

- **Exploratória:** para elucidar a compreensão de um problema relativamente novo (gestão e reciclagem de baterias de VE em larga escala no Brasil), identificando-se as variáveis mais relevantes e mapeando as alternativas tecnológicas e institucionais. Na fase exploratória fundamenta-se a hipóteses e delimita-se os recortes a serem analisados e comparados com os cenários internacionais. A literatura adota a pesquisa exploratória para analisar fenômenos complexos e emergentes, o que se encaixa com o tema de cadeias de reciclagem e modelos de economia circular (Gil, 2019).
- **Descritiva:** teve como objetivo caracterizar e sistematizar informações dos processos de reciclagem, dos arranjos regulatórios e dos modelos de negócio que são observados em diferentes jurisdições, o que produz um quadro comparativo, esse quadro permite a leitura crítica e é a base para proposições políticas. A pesquisa descritiva serve para organizar evidências e fundamentar o desenho do modelo proposto.
- **Qualitativa:** utilizou técnicas de análise textual (Bardin, 2016), faz interpretações de documentos normativos, relatórios técnicos e literatura científica, sendo necessária em função da complexidade conceitual do tema. A análise qualitativa identifica nuances, contradições e práticas institucionais que seriam desconsideradas por uma abordagem quantitativa.
- **Aplicada:** teve ênfase na aplicação prática, busca produzir conhecimento com aplicações diretas na elaboração de políticas públicas, orientação de investidores e desenvolvimento de projetos piloto no Brasil. Esse tipo de pesquisa busca integrar teoria e prática para gerar recomendações operacionais.

3.1.3 Nível de análise e unidade de observação

Este trabalho operou em dois níveis de análise interdependentes sendo eles:

- **Macro Institucional:** é a análise feita dos marcos legais, das políticas públicas, dos instrumentos econômicos (EPR, subsídios, metas de conteúdo reciclado) e dos programas de financiamento (nível nacional e regional).
- **Operacional:** foi feita análise de arranjos industriais, tecnologias de reciclagem (pirometalurgia, hidrometalurgia, reciclagem direta), modelos de negócio (*closed-loop*, *PPPs*, contratos de *offtake*) e fluxos logísticos (coleta, triagem, transporte, refino).

As unidades estudadas são documentos normativos, relatórios de agências (*IEA*, *EU Commission*, *EPA*), publicações e artigos científicos selecionados, estudos de caso corporativos e industriais (empresas e projetos piloto), assim como evidências de mercado (notícias de investimentos, comunicados de empresas).

3.1.4 Racional para a escolha metodológica

O que justificou a opção de uma abordagem qualitativa e exploratória foi a necessidade de:

- Integrar múltiplas fontes de evidência (literatura científica, documentos legais, relatórios técnicos e experiências de mercado) para construir uma visão holística do tema (Rezaei *et al.*, 2025; Premathilake *et al.*, 2025).
- Gerar recomendações contextualizadas, considerando os fatores nacionais socioeconômicos e territoriais (distribuição geográfica de demanda, infraestrutura logística, capacidade industrial disponível).
- Permitir uma flexibilidade analítica, visto que o campo de estudo está em uma rápida evolução tecnológica e regulatória, logo ele exige uma interpretação e revisão crítica contínua.

3.1.5 Rigor, validade e confiabilidade

A ênfase da pesquisa é qualitativa, porém é necessário utilizar procedimentos rigorosos que assegurem a credibilidade e confiabilidade, os procedimentos utilizados são:

- Triangulação de fontes: é feito o cruzamento sistemático entre artigos científicos, relatórios institucionais e documentos legais para validar afirmações contidas nos mesmos, esse procedimento reduz os vieses setoriais.
- Critérios explícitos de seleção de fontes: a inclusão de materiais publicados entre os anos de 2018 e 2025, priorização de *peer-review* quando disponível e uso de fontes institucionais reconhecidas (*IEA, EU, EPA, ANEEL*).
- Registro e rastreabilidade: a catalogação das fontes em uma planilha de referências e o registro das evidências que apoiaram cada proposição deste modelo (apêndice metodológico).
- Reflexividade: o reconhecimento e a declaração das limitações epistemológicas do acesso aos dados operacionais (custos e taxas efetivas de reciclagem), as limitações são discutidas na seção de limitações do Cap. 3.

3.1.6 Ética e responsabilidade acadêmica

Este trabalho de pesquisa utilizou apenas fontes secundárias públicas ou autorizadas, não envolvendo seres humanos em entrevistas diretas e nem dados pessoais. Ainda assim, foram respeitados os princípios éticos de citações, o uso responsável das informações e transparência metodológica.

3.2 Procedimentos metodológicos

A escrita deste trabalho foi elaborada de forma sistematizada e sequencial, o que permitiu a construção gradual de uma base teórica sólida e a formulação de um modelo adaptado ao cenário brasileiro. O processo de escrita foi dividido em cinco etapas, descritas nos próximos subcapítulos.

Cada fase foi seguida à risca para garantir o rigor científico, a coerência interna e a aplicabilidade prática dos resultados encontrados.

3.2.1 Etapa 1 – Levantamento e revisão sistemática da literatura

A primeira etapa da pesquisa consistiu em uma revisão de literatura sobre o tema de reciclagem de baterias de íon-lítio e todas as políticas públicas associadas à economia circular e modelos internacionais de gestão de resíduos eletroquímicos. A revisão foi sistemática e seguiu princípios metodológicos propostos por Kitchenham (2004) e Tranfield, Denyer e Smart (2003), os conceitos foram adaptados ao tipo de pesquisa qualitativa.

As principais fonte e base de dados utilizados foram seguintes:

- Bases científicas: ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, IEEE Xplore e ResearchGate;
- Repositórios institucionais e técnicos: *International Energy Agency* (IEA), *European Environment Agency* (EEA), *Environmental Protection Agency* (EPA), *World Economic Forum* (WEF) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL);
- Legislação e documentos normativos: Regulamentação Europeia de Baterias (EU 2023/1542), Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e diretrizes do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

Foram utilizadas palavras chaves (em português e inglês) para as buscas, as principais palavras chaves utilizadas foram as seguintes:

- “*lithium-ion battery recycling*”, “*battery second life*”, “*circular economy*”, “*EPR policy*”, “*battery waste management*”, “*electric vehicles Brazil*”, “reuso de baterias” e “reciclagem de íon-lítio”.

O uso das palavras chaves foi combinado com métodos de pesquisa envolvendo operadores booleanos, os termos foram combinados com operadores lógicos “AND” e “OR”, o que ampliou a abrangência da pesquisa. Os resultados encontrados foram filtrados pelos seguintes critérios de inclusão e exclusão:

- Inclusão: artigos publicados entre 2018 e 2025, revisados por pares, com relevância direta ao tema;
- Exclusão: estudos puramente laboratoriais, com foco apenas na síntese de materiais sem que houvesse relação com reciclagem industrial ou gestão de resíduos.

Cada artigo foi selecionado e classificado com relação ao seu tema (tecnologia, regulação, economia ou sustentabilidade), isso permitiu construir uma planilha de análise. A seleção de artigos resultou em um conjunto inicial de 40 referências, elas formaram a base da fundamentação teórica deste trabalho.

3.2.2 Etapa 2 – Organização e tratamento das fontes

Após a etapa de coleta das fontes de publicações, foi feita à organização das fontes em uma planilha estruturada, a planilha contém as seguintes informações:

- Autor(es) e ano de publicação;
- Título e periódico de origem;
- Tipo de estudo (revisão, estudo de caso, relatório técnico, legislação, etc.);
- Principais contribuições e palavras-chave;
- Classificação por categoria do TCC (introdução, revisão, metodologia, modelo proposto).

A categorização serviu para facilitar o cruzamento das informações sobre as tecnologias de reciclagem, marcos regulatórios e práticas industriais. As fontes foram armazenadas em uma pasta digital com subpastas, todas as fontes foram numeradas e indexadas de acordo com sua categoria (subpasta), isto garantiu a rastreabilidade total das informações (Minayo, 2016). Posteriormente, foi feita a leitura analítica dos documentos, registrando em fichamentos os pontos-chave, lacunas identificadas e possíveis relações entre as abordagens internacionais. Esta leitura serviu de embasamento para a elaboração das categorias de análise do item seguinte.

3.2.3 Etapa 3 – Análise comparativa internacional

A partir da literatura revisada, foi desenvolvida a análise comparativa entre os três principais modelos internacionais de reciclagem de baterias, os modelos escolhidos foram o da União Europeia, o da China e o dos Estados Unidos, conforme descrito no Capítulo 2. O método comparativo permite identificar semelhanças, divergências e padrões de sucesso entre os três modelos, cada um dos modelos se encontra em um grau diferente de maturidade institucional e tecnológica (Rezaei *et al.*, 2025; Biswal *et al.*, 2024).

A comparação dos modelos considerou quatro dimensões estruturais:

- Regulação e governança: marcos legais, metas de reciclagem, rastreabilidade e *EPR*;
- Tecnologia e infraestrutura: rotas de processamento (pirometalurgia, hidrometalurgia, direta), a capacidade instalada e a integração produtiva;
- Instrumentos econômicos e financeiros: subsídios, créditos, contratos de *offtake* e incentivos fiscais;
- Integração com a cadeia automotiva e energética: logística reversa, segunda vida e reindustrialização dos materiais recuperados.

Cada dimensão foi avaliada qualitativamente, todas levaram como base evidências documentais, o objetivo foi buscar identificar as boas práticas transferíveis e lacunas estruturais que podem inspirar a formulação de políticas no Brasil (Premathilake *et al.*, 2025; CSIRO, 2024).

3.2.4 Etapa 4 – Síntese e modelagem conceitual

Após a etapa comparativa, foi feita uma síntese interpretativa dos resultados, seguindo a metodologia de análise proposta por Bardin (2016). Foram identificados padrões recorrentes de operação e governança nas fontes analisadas, esses padrões serviram de base para o desenvolvimento do modelo de reciclagem, descrito no Capítulo 4.

A modelagem utilizou como referência:

- A estrutura de cadeias híbridas (pirometalurgia + hidrometalurgia + segunda vida);
- A integração com políticas de energia renovável e resíduos sólidos;
- A articulação entre setor público, montadoras e recicladores privados (ANEEL, 2022; Cabral-Neto *et al.*, 2023).

Para garantir coerência do modelo, o modelo foi construído em no formato de camadas hierárquicas, sendo as camadas regulatória, tecnológica, econômica e social, a estrutura de camadas foi validada teoricamente pela literatura revisada.

3.2.5 Etapa 5 – Validação teórica e consistência interna

Na quinta etapa realizou-se o processo de validação teórica, comparando e confrontando o modelo desenvolvido com os princípios da economia circular e da sustentabilidade energética (Rezaei *et al.*, 2025).

Essa etapa serviu para verificar se o modelo proposto:

- Atende aos princípios de viabilidade técnica e ambiental;
- É compatível com a legislação brasileira vigente;
- Promove redução de impactos ambientais e valorização econômica dos resíduos;
- É passível de implementação gradual por meio de políticas públicas regionais.

Cada etapa serviu para garantir consistência lógica e coerência conceitual entre os capítulos do trabalho, de modo que o modelo final possa ser considerado um produto derivado da análise científica.

3.3 Fontes de dados

No desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado apenas fontes secundárias de alta credibilidade, o objetivo principal do trabalho é a análise e a comparação de

modelos internacionais de reciclagem de baterias com a intenção de adaptar as principais diretrizes desses modelos ao contexto brasileiro. O uso de fontes secundárias foi considerado como a abordagem correta para o escopo teórico deste trabalho (Gil, 2019; Minayo, 2016).

3.3.1 Classificação e natureza das fontes

As fontes de dados utilizadas neste trabalho foram agrupadas e categorizadas em quatro categorias, de acordo com a sua natureza e função no processo analítico:

- **Fontes científicas:** São artigos e publicações revisadas por pares sistematicamente, publicadas em periódicos indexados. Estas fontes servem de embasamento teórico, evidências empíricas e análises técnicas dos processos de reciclagem, reuso, composição química e aspectos de sustentabilidade das baterias de íon-lítio. Foi priorizado artigos publicados no período de 2018 à 2025, neste período houve um grande avanço no desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e na formulação de políticas públicas sobre a mobilidade elétrica (Rezaei *et al.*, 2025; Biswal *et al.*, 2024). Alguns exemplos dos artigos usados neste trabalho são os artigos de Zanoletti (2024) sobre avanços tecnológicos, Premathilake *et al.* (2025) sobre rotas de reciclagem híbridas e Cabral-Neto *et al.* (2023) sobre projeções de geração de resíduos no Brasil.
- **Fontes técnicas e institucionais:** São os relatórios e publicações oficiais feitas pelos órgãos e entidades governamentais de cada país, essas publicações oferecem dados quantitativos e análises de políticas públicas. As principais instituições consultadas neste trabalho estão listadas abaixo:
 - *International Energy Agency (IEA)*, com o relatório *Global EV Outlook* (2024);
 - *European Commission*, com o regulamento *EU Battery Regulation* (2023/1542);
 - *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)* e *U.S. Department of*

Energy (DOE), com relatórios sobre reciclagem e financiamento de infraestrutura;

- *World Economic Forum* (WEF) e *OECD*, com estudos sobre economia circular e cadeias de valor sustentáveis.

As fontes institucionais serviram principalmente para o levantamento de dados oficiais e tendências globais, esses dados garantem a confiabilidade e a atualidade das informações contidas neste trabalho.

- **Fontes legais e normativas:** são as leis, os decretos, os regulamentos e as resoluções estabelecidas pela base jurídica de gestão de resíduos e reciclagem. As leis que se destacam no contexto brasileiro são:
 - Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define princípios da logística reversa;
 - Resoluções da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), relacionadas ao armazenamento de energia e reuso de baterias;
 - Diretrizes da CEEE Equatorial e demais distribuidoras sobre normas técnicas de descarte e reaproveitamento de componentes elétricos.

No contexto internacional, algumas das normas analisadas foram a norma EU 2023/1542, os Regulamentos do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da China (MIIT, 2022) e as guidelines da EPA (2023).

Estas fontes serviram de embasamento sobre a discussão de responsabilidade estendida do produtor (EPR), conteúdo reciclado mínimo e rastreabilidade, que são conceitos fundamentais para a elaboração do modelo proposto neste trabalho.

- **Fontes complementares e setoriais:** são as publicações corporativas, relatórios de sustentabilidade, documentos técnicos de fabricantes de baterias e montadoras (como Tesla, CATL e LG Energy Solution), incluindo artigos de instituições de pesquisa aplicadas no setor (CSIRO, 2024).

Essas fontes serviram para complementar as informações do trabalho,

forneceram informações práticas e exemplos reais de aplicação industrial, o que permitiu elaborar como as políticas influenciam nos modelos de negócio e na infraestrutura operacional.

3.3.2 Critérios de credibilidade e seleção

A confiabilidade das fontes deve ser testada e assegurada aplicando critérios rigorosos de seleção, os quatro critérios utilizados são listados abaixo:

- **Autenticidade:** é a verificação da origem e integridade dos documentos publicados; devem ser consideradas somente fontes oficiais e publicações científicas que possuem reconhecimento e foram validadas.
- **Atualidade:** é a priorização por publicações recentes, é recomendado o uso de publicações entre 2018 e 2025, utilizar fonte atuais garante que as informações reflitam as condições tecnológicas e regulatórias mais atuais (Rezaei *et al.*, 2025).
- **Relevância temática:** é a inclusão de fontes que tem relação direta com tema deste trabalho, foram consideradas fontes que tratavam dos temas de reciclagem de baterias, economia circular, políticas ambientais e transição energética.
- **Confiabilidade institucional:** é dar prioridade por fontes vindas de instituições governamentais, agências multilaterais, universidades e periódicos renomados.

Para os documentos em idiomas estrangeiros (inglês e chinês), foi utilizado o auxílio de aplicativos de tradução assistida, o que garantiu a interpretação e o sentido técnico original dos documentos. Em caso de divergência entre as fontes, aplicou-se o princípio da triangulação, através do cruzamento de evidências de diferentes origens foi possível validar o conteúdo de cada fonte (Minayo, 2016).

3.3.3 Forma de utilização das fontes no estudo

Cada grupo de fontes foi mais importante em trechos específicos na estrutura deste trabalho:

- As fontes científicas utilizadas na Revisão da Literatura (Capítulo 2) sustentam a discussão sobre tecnologias, impactos ambientais e segunda vida das baterias;
- As fontes técnicas e legais forneceram embasamento para a análise comparativa dos modelos internacionais (item 2.6) e os fundamentos para elaborar o marco normativo brasileiro;
- As fontes setoriais e corporativas foram aplicadas na elaboração do modelo proposto para o cenário brasileiro (Capítulo 4), elas forneceram parâmetros reais de logística, custos e escala no nível operacional.

Esta abordagem metodológica permitiu organizar e construir uma visão abrangente do tema, conciliando os conceitos da literatura científica com as aplicações práticas das informações técnicas e institucionais.

3.3.4 Registro, catalogação e rastreabilidade

As fontes utilizadas foram organizadas e registradas numa planilha de controle bibliográfico, a organização das informações nessa planilha facilita futuras atualizações e auditorias acadêmicas.

A rastreabilidade das fontes utilizadas nesse trabalho assegura os argumentos desenvolvidos no texto, podendo ser vinculados diretamente à sua referência original, isto garante a integridade metodológica e respeito às normas da ABNT (ABNT, 2018).

Os documentos normativos e relatórios técnicos utilizados foram armazenados em formato digital (.pdf ou .docx) em um diretório específico, as referências foram identificadas por nome e categoria, o diretório está disponível para consultas e verificações posteriores.

3.3.5 Justificativa para o uso exclusivo de fontes secundárias

Optou-se por não utilizar fontes primárias (como entrevistas, questionários ou medições experimentais) tendo em vista a natureza do problema investigado. Reciclagem de baterias de veículos elétricos é um tema condicionado por políticas públicas, regulação e arranjos industriais, as características desse tema podem ser analisadas a partir de documentos técnicos e científicos já existentes.

Segundo Yin (2015) para estudos de natureza aplicada e exploratória, a análise documental é considerada um método legítimo e eficiente para formular modelos conceituais e políticas comparativas, em casos onde busca-se compreender sistemas complexos sem a necessidade de experimentação direta.

Logo as fontes secundárias fornecem uma boa amplitude de informações confiáveis que permitem consolidar de forma robusta a base empírica do modelo proposto no Capítulo 4.

3.4 Critérios de seleção e análise dos dados

A análise dos dados utilizados neste trabalho focou em identificar e relacionar os padrões entre as informações obtidas, essa análise garante a coerência das informações.

Como foram usadas apenas fontes secundárias, a etapa de análise teve caráter interpretativo e integrador, com o objetivo de sintetizar e organizar as informações coletadas nas fases anteriores da metodologia.

Após a organização dos dados foi feita a comparação dos mesmos, que serviram de base para o modelo proposto no Capítulo 4. O tratamento dos dados serviu para integrar e condensar as informações, gerando as conclusões deste trabalho, ao mesmo tempo que evitaram redundâncias e asseguram consistência da metodologia aplicada.

3.5 Limitações da pesquisa

Independentemente do tipo, toda pesquisa científica possui limitações, em especial as de caráter exploratório e qualitativo, as limitações metodológicas devem

ser reconhecidas e explicitadas, o reconhecimento delas garante a transparência e integridade acadêmica do trabalho de pesquisa.

Neste trabalho as principais limitações encontradas foram à disponibilidade dos dados, a comparabilidade entre cenários internacionais, a limitação temporal e impossibilidade de validação empírica direta.

3.5.1 Limitações quanto à natureza dos dados

A base de dados deste trabalho é predominantemente de fontes secundárias, logo as informações utilizadas são de instituições, artigos científicos e relatórios oficiais.

Apesar dos métodos aplicados na seleção dos dados, o trabalho pode apresentar viés institucional ou inconsistências metodológicas entre as fontes (Minayo, 2016).

Exemplo disso são as taxas de recuperação de metais e os índices de eficiência energética apresentados nos processos hidrometalúrgicos, as taxas variam de acordo com a metodologia adotada por cada autor ou agência (Rezaei *et al.*, 2025).

Outro fator a ser considerado é que muitos relatórios industriais e governamentais não divulgam abertamente os detalhes técnicos dos custos, da pureza dos produtos reciclados e da escalabilidade operacional dos processos, isto limita a precisão dos dados dificultando a comparação entre os modelos internacionais.

3.5.2 Limitações geográficas e contextuais

A comparação entre diferentes realidades regionais é outra limitação, as políticas públicas, a infraestrutura e a tecnologia da União Europeia, China e Estados Unidos diferem bastante entre si, mas diferem principalmente do cenário brasileiro.

Levando em consideração essa limitação, todas as recomendações derivadas dos modelos internacionais tiveram de ser adaptadas conceitualmente, a implementação real pode demandar ajustes significativos para funcionarem no Brasil (Biswal *et al.*, 2024; Cabral-Neto *et al.*, 2023).

A escassez de dados nacionais sobre o volume de baterias descartadas dificulta a elaboração do modelo usando projeções quantitativas.

3.5.3 Limitações temporais

A pesquisa realizada neste trabalho reflete o cenário global atual até o primeiro semestre de 2025, atualmente o setor de mobilidade elétrica global está passando por uma rápida evolução tecnológica e regulatória.

Provavelmente nos próximos anos, sejam criados novos métodos de reciclagem direta, tecnologias de recuperação de lítio de alta pureza, e novos marcos regulatórios ainda mais restritivos (Zanoletti, 2024; Premathilake *et al.*, 2025).

Por consequência, algumas das conclusões apresentadas neste trabalho podem necessitar de atualizações à medida que novos dados empíricos sejam publicados.

3.5.4 Limitações metodológicas e de validação empírica

Como a abordagem desse trabalho se baseou em uma pesquisa teórico-analítica e não experimental, o modelo proposto no Capítulo 4 não foi validado através de ensaios laboratoriais ou estudos de campo, a validação do modelo foi feita de forma teórica e comparativa, comparando os resultados das publicações de diferentes autores e instituições.

Esta abordagem de pesquisa garante coerência conceitual, mas não substitui a comprovação empírica, sendo necessária a aplicação do modelo em ambiente industrial real para a validação do modelo.

Pesquisas futuras podem suprir essa limitação desenvolvendo protótipos operacionais do modelo proposto neste estudo, fazendo os estudos da viabilidade econômica e os testes de desempenho ambiental, confirmando empiricamente o modelo apresentado neste trabalho.

3.5.5 Mitigação das limitações

O trabalho possui as suas limitações, para mitigar as limitações e reduzir os seus impactos sobre os resultados apresentados utilizou-se os seguintes métodos:

- Triangulação de fontes e interpretações, para garantir a confiabilidade e a validade dos dados apresentados;
- Critérios de inclusão e exclusão de dados;
- Cruzamento das referências entre os documentos científicos, técnicos e legais utilizados neste estudo para verificar a consistência das informações;
- Reconhecimento explícito das incertezas e limitações deste trabalho, buscando evitar generalizações e extrapolações indevidas.

Mesmo com restrições metodológicas e de dados, este estudo mantém sua relevância científica e aplicabilidade prática, servindo de referencial na formulação de políticas públicas e projetos industriais de reciclagem de baterias de veículos elétricos no Brasil.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos e apresentados os resultados obtidos na análise comparativa entre os cenários internacionais, os resultados apresentados foram obtidos através dos métodos descritos no Capítulo 3.

Os conceitos utilizados na formulação do modelo proposto, foram obtidos através da revisão de literatura, das evidências técnico-científicas e das análises institucionais.

O capítulo 4 será dividido em seções mantendo uma lógica progressiva, na seção 4.1 será apresentada a análise comparativa dos sistemas internacionais, o objetivo desta seção é identificar as melhores características aplicáveis ao modelo brasileiro.

Na Seção 4.2, é apresentado as diretrizes estruturais que serviram de base pro modelo adaptado à realidade brasileira, foram consideradas as dimensões regulatórias, tecnológicas, econômicas e socioambientais.

Na Seção 4.3 é apresentado o modelo propriamente dito, o modelo apresentado é a síntese dos dados teóricos e práticos provenientes dos documentos citados nos capítulos anteriores.

Na Seção 4.4 é feita a avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental do modelo proposto.

Na Seção 4.5 é discutido de maneira crítica as futuras implicações e perspectivas do modelo no setor energético e ambiental do país.

O Capítulo 4 expõe de forma descritiva os resultados do estudo, ele também estabelece uma análise crítica da aplicabilidade prática do modelo, das publicações científicas e das políticas públicas envolvidas no tema, demonstrando como o Brasil pode implementar uma cadeia de reciclagem ambientalmente e economicamente sustentável.

O objetivo final do capítulo é oferecer uma contribuição concreta para à literatura e formular uma estratégia que ajude na transição energética e na implementação da economia circular no Brasil.

4.1 Panorama comparativo internacional dos sistemas de reciclagem

A discussão sobre reciclagem de baterias de íon-lítio nos últimos anos, tem se apresentado como uma questão importante em vários países, sendo impulsionada pelo crescimento exponencial da mobilidade elétrica e pela escassez de novos recursos minerais.

A gestão das baterias no fim de vida não é apenas uma necessidade ambiental, mas também um caminho a ser explorado para garantir segurança energética e a competitividade industrial do setor energético (Rezael *et al.*, 2025; IEA, 2024).

Diante disso, vários países têm desenvolvido seus próprios modelos de reciclagem de forma distinta, os modelos de cada país são moldados de acordo com as suas condições econômicas, marcos regulatórios e capacidades tecnológicas.

Nesta seção serão tratados os três modelos mais relevantes no cenário global atual: União Europeia, Estados Unidos e China, com destaque nas suas estratégias, marcos regulatórios, rotas tecnológicas e as possíveis lições aplicáveis no Brasil.

4.1.1 União Europeia: economia circular e rastreabilidade digital

A União Europeia (UE) consolidou o seu sistema como o mais avançado em termos normativos e regulatórios, seu modelo integra muito bem a política industrial e ambiental. Seu principal marco regulatório é o Regulamento (UE) 2023/1542, que foi aprovado em 2023, substituindo a antiga Diretiva 2006/66/CE, ele estabelece um modelo completo que serve de base para uma economia circular do ciclo de vida das baterias (Comissão Europeia, 2023).

As principais diretrizes estabelecidas que se destacam do novo regulamento são:

- As metas obrigatórias de recuperação de metais: 50% de lítio, 90% de cobalto e 90% de níquel até o ano de 2030;
- O percentual mínimo de conteúdo reciclado presente na fabricação de novas baterias: 16% de cobalto, 6% de lítio e 6% de níquel até o ano de 2031;
- A implementação do sistema de *Battery Passport*, é um sistema digital de rastreabilidade onde ficam registrados a origem, a composição e o histórico de cada bateria;
- A responsabilidade estendida do produtor (*EPR – Extended Producer Responsibility*), é a obrigação imposta aos fabricantes e importadores, onde eles devem garantir que as baterias produzidas por eles sejam coletadas e o seus resíduos recebam o processamento adequado;
- A proibição de exportação das baterias usadas para países que não possuem infraestrutura adequada para lidar com esse tipo de resíduo.

O modelo europeu é à combinação de bons incentivos econômicos e instrumentos fiscais que garantem a operação da cadeia de reciclagem dentro de bons padrões ambientais e sociais.

No modelo europeu as rotas tecnológicas predominantes são as rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas combinadas, as principais empresas responsáveis por essas rotas são a Umicore, Hydrovolt e Northvolt, estas empresas possuem um elevado grau de automação e recuperação de metais críticos, possuindo valores de recuperação superiores a 95% (Zanoletti, 2024; Rezaei *et al.*, 2025).

A UE vem promovendo um ecossistema de inovação tecnológico que interliga universidades, centros de pesquisa e indústrias que compartilham seus dados e processos entre si, criando um ciclo contínuo de aprimoramento.

4.1.2 Estados Unidos: incentivos econômicos e industrialização verde

O modelo Americano de reciclagem de baterias é conduzido por mecanismos de mercado e incentivos fiscais, o Department of Energy (*DOE*) e a Environmental Protection Agency (*EPA*) oferecem um grande apoio para o desenvolvimento do setor.

Comparado com a União Europeia o país ainda não possui uma legislação nacional unificada, o que vem se consolidando no país é uma infraestrutura industrial competitiva, que está sendo impulsionada por investimentos dos setores públicos e privados (EPA, 2023; DOE, 2024).

Atualmente o principal marco americano é o Bipartisan Infrastructure Law (2021), ele destina aproximadamente de US\$7 bilhões para o desenvolvimento de pesquisas e a implementação de cadeias tanto de reciclagem quanto de produção de baterias.

Os principais objetivos do *Bipartisan Infrastructure Law* são:

- Reduzir a taxa de importação de materiais críticos e diminuir a dependência dos mercados externos;
- Estabelecer plantas de reciclagem e refino no território nacional;
- Promover o desenvolvimento e a inovação tecnológica do setor através de startups e universidades;
- Incentivar parcerias público-privadas (PPPs) com o objetivo de desenvolver a reindustrialização verde do setor.

As empresas Redwood Materials, Li-Cycle e Ascend Elements já operam plantas de recuperação com taxas de recuperação superiores a 95% para o níquel e o cobalto, a principal rotas utilizada por elas é hidrometalúrgica (CSIRO, 2024).

O que diferencia o modelo americano é a ênfase em inovação e a descentralização, ao invés de uma regulação única, o país fornece incentivos estaduais e federais, o que cria um ambiente mais dinâmico e competitivo.

Os Estados Unidos estão se destacando pela expansão rápida da sua capacidade industrial, visando a sustentabilidade econômica e segurança energética, diminuindo a dependência de importações de materiais reciclados (Rezaei *et al.*, 2025).

4.1.3 China: integração vertical e controle estatal

A China possui o modelo integrado mais verticalizado do mundo, seu modelo é coordenado pelo estado, onde o estado é o centro de todas as operações industriais.

Desde de o ano de 2018 o país vem implementando uma série de regulamentos, os regulamentos são supervisionados pelo Ministry of Industry and Information Technology (MIIT), onde são estabelecidos os padrões nacionais para o design, a coleta e a reciclagem de baterias (MIIT, 2022).

As principais características do modelo chinês são:

- A implementação de um sistema de licenciamento obrigatório para empresas de reciclagem;
- Definir os padrões técnicos nacionais de rastreabilidade e segurança de baterias;
- A proibição da reutilização de baterias automotivas de maneira informal;
- A integração direta entre as montadoras e os recicladores;
- O foco na economia de escala expandindo os centros de reciclagem e controlando a logística completa de toda cadeia produtiva.

As principais rotas adotadas pela China são as pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, atualmente a China vem investindo bastante no desenvolvimento de tecnologias de reciclagem direta, a rota de reciclagem direta pode recuperar os eletrodos intactos reduzindo o consumo energético do processo em até 40% (Biswal *et al.*, 2024).

A China adota uma política estatal que combina planejamento centralizado e industrialização massiva, o seu modelo possui eficiência logística e baixos custos de reciclagem quando comparado com os sistemas ocidentais.

As críticas ao modelo chinês são quanto à transparência dos processos ambientais e à concentração de poder industrial, por ser um modelo muito centralizado é difícil replicar esse modelo em outras economias (Rezaei *et al.*, 2025).

4.1.4 Síntese comparativa dos modelos internacionais

A análise comparativa dos modelos permite identificar padrões e divergências entre os três modelos analisados. O modelo Europeu foca no equilíbrio entre regulação e sustentabilidade, o modelo Americano foca na inovação e na autonomia

tecnológica, já o modelo Chinês foca na integração estatal e no controle logístico de toda a cadeia produtiva.

A tabela 10 mostra o comparativo dos modelos adotados pela União Europeia, Estados Unidos e China, apresentando as diferenças estruturais de governança, tecnologias predominantes, instrumentos de política pública e níveis de recuperação para cada um dos países.

Tabela 10- Comparação internacional de modelos de reciclagem de baterias

Dimensão	União Europeia	Estados Unidos	China
Governança	Regulação centralizada e metas obrigatórias	Incentivos econômicos e descentralização	Coordenação estatal rígida
Tecnologia predominante	Hidrometalurgia + pirometalurgia	Hidrometalurgia avançada	Pirometalurgia + reciclagem direta
Instrumentos de política pública	Battery Passport, EPR, metas de conteúdo reciclado	Subsídios, PPPs e programas do DOE	Licenciamento estatal e controle de mercado
Foco estratégico	Sustentabilidade e rastreabilidade	Inovação e segurança energética	Escala industrial e autossuficiência
Taxa média de recuperação	> 90% de Co/Ni, 50–70% de Li	> 90% de Co/Ni, 80% de Li	85–95% de eficiência geral
Transparência de dados	Alta	Média	Moderada
Aplicabilidade ao Brasil	Alta	Média	Parcial

Fonte: Adaptado de Cabral-Neto *et al.* (2023), Rezaei *et al.* (2025), CSIRO (2024), Comissão Europeia (2023) e DOE (2024).

Essa síntese mostra que não existe um modelo ideal que se adapte às necessidades de todos os países. Nesse caso, cada país deve estruturar sua cadeia de reciclagem de acordo com os seus recursos, prioridades e capacidades institucionais.

Entretanto, existem elementos em comum nos modelos estudados como por exemplo a rastreabilidade, os incentivos econômicos e as parcerias público-privadas, esses elementos formam a base conceitual do modelo proposto para o Brasil neste trabalho.

4.2 Diretrizes estruturais para o modelo brasileiro

A análise comparativa dos modelos internacionais de reciclagem de baterias de veículos elétricos, deixou claro que o sucesso destes modelos depende da articulação entre políticas públicas, desenvolvimento de estruturas tecnológicas e a coordenação completa da cadeia industrial.

O modelo de reciclagem brasileiro deve levar em consideração as experiências consolidadas pela União Europeia, Estados Unidos e China, mas também deve levar em consideração as suas características estruturais e institucionais como por exemplo a distribuição desigual da infraestrutura, a dependência de importação de baterias e a ausência de políticas ambientais e energéticas (Cabral-Neto *et al.*, 2023; ANEEL, 2022).

As diretrizes estruturais apresentadas neste trabalho servem como fundamentos estratégicos na elaboração da cadeia nacional de reciclagem, as diretrizes alinham viabilidade técnica, sustentabilidade ambiental e eficiência econômica.

As diretrizes estão agrupadas em quatro categorias interdependentes sendo elas: regulatória e institucional, tecnológica e operacional, econômica e financeira, e socioambiental.

4.2.1 Dimensão regulatória e institucional

A primeira diretriz se refere à necessidade atual de aprimorar as normas brasileiras vigentes, as normas precisam garantir rastreabilidade, responsabilidade e integração federativa em toda a gestão do ciclo de vida das baterias.

Atualmente o Brasil possui em vigência a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e o Decreto nº 10.936/2022, o decreto regulamenta a logística reversa dos resíduos.

No entanto, estes dispositivos normativos não possuem políticas específicas para a gestão de baterias de veículos elétricos, elas apresentam características químicas e riscos ambientais que diferem dos riscos de pilhas e baterias convencionais (ANEEL, 2022).

As principais medidas regulatórias que devem ser implementadas são:

- A elaboração e criação do Regulamento Nacional de Baterias de Íon-Lítio, sendo o regulamento baseado nas diretrizes internacionais (exemplo: União Europeia) que se destacaram, o regulamento deve ser coordenado entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Ministério de Minas e Energia (MME);
- A Implementação do sistema de responsabilidade estendida do produtor (EPR) que já é estabelecido em outros países, o sistema vai definir metas obrigatórias de coleta e reciclagem para os fabricantes de baterias;
- Desenvolver um sistema de rastreabilidade através de uma plataforma digital semelhante ao *Battery Passport* europeu, o sistema vai permitir acompanhar o ciclo de vida completo de cada bateria;
- Estabelecer parâmetros técnicos nacionais específicos para o armazenamento, o transporte e o tratamento dos resíduos eletroquímicos de baterias de veículos elétricos;
- Criar centros regionais de controle e certificação em parceria com universidades, agências ambientais e concessionárias de energia.

Essas medidas serviriam de base legal e institucional para garantir a transparência, a fiscalização e a governança de toda a cadeia de reciclagem.

4.2.2 Dimensão tecnológica e operacional

A segunda diretriz se refere ao desenvolvimento tecnológico nacional e o desenvolvimento da cadeia de produção, com foco numa melhor integração entre todos agentes da cadeia.

O Brasil carece de infraestrutura industrial em larga escala, que esteja bem consolidada no processamento de baterias de íon-lítio, isto abre oportunidade para o desenvolvimento de um ecossistema com inovações tecnológicas.

Baseado nos modelos internacionais, recomenda-se:

- A adoção de rotas híbridas de reciclagem, esse tipo de rota combina pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta para otimizar ao máximo a recuperação de metais críticos (Zanoletti, 2024; Rezaei *et al.*, 2025);
- A desenvolvimento de polos tecnológicos regionais, em parceria com universidades federais e institutos de pesquisa, desenvolvendo processos adaptados às necessidades regionais e às características das baterias utilizadas no Brasil;
- Estabelecer parcerias público-privadas (PPPs) das recicladoras com as empresas do setor elétrico e automotivo, melhorando o controle e a comunicação da cadeia de produção;
- Implementar e padronizar mais sistemas de coleta, desmontagem e separação de módulos;
- Investir em capacitações técnicas, formando mais mão de obra especializada nos setores de logística reversa, engenharia eletroquímica e economia circular.

Adotar essas ações permitirá que o Brasil estruture uma cadeia tecnológica descentralizada, mas conectada, o que favorece a autonomia nacional e reduz a dependência do mercado externo.

4.2.3 Dimensão econômica e financeira

A terceira diretriz se refere a sustentabilidade econômica do sistema de reciclagem depende diretamente da sua competitividade quando comparada com à extração primária de minerais, para ela se tornar vantajosa é necessário a criação de mecanismos de incentivo e financiamento.

No atual cenário, o custo médio da tonelada dos metais reciclados ainda é maior que o custo de mercado dos metais extraídos (CSIRO, 2024).

A adoção de políticas econômicas pode equilibrar essa diferença.

As medidas de incentivo propostas nessa diretriz são:

- Implementar créditos de reciclagem ou certificados verdes, esses créditos podem ser comercializados entre as empresas gerando mais rentabilidade e prestígio para as empresas;
- Criar um fundo de investimento para o setor de reciclagem de baterias, o fundo seria alimentado por contribuições das montadoras e importadores, a gestão do fundo seria pública e transparente;
- Fornecer incentivos fiscais e isenções para as empresas que investirem em plantas de reciclagem ou centros de recuperação;
- Financiar o setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) via Finep, BNDES e fundos de inovação energética;
- Estabelecer contratos de *offtake* entre as recicladoras e as fabricantes, esses contratos garantem a compra e a venda dos materiais recuperados pelo mercado novamente.

Essas diretrizes promoveriam um ambiente econômico mais competitivo para os metais reciclados, atraindo capital do setor privado e garantindo a viabilidade da cadeia de reciclagem a longo prazo.

A Tabela 11 apresenta um conjunto de indicadores econômicos e financeiros aplicáveis à cadeia de reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil. A tabela auxilia na identificação dos incentivos mais eficazes para acelerar a implantação da infraestrutura nacional.

Tabela 11- Modelos de incentivo e indicadores econômicos

Indicador	Créditos de Reciclagem	Subsídios Diretos / FNRB	Incentivos Fiscais (IPI/ICMS/PIS-COFINS)	Contratos de Offtake
Custo operacional reduzido (%)	5–12%	10–25%	3–8%	8–15%
Impacto no CAPEX inicial	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Atratividade para investidores	Média	Alta	Média	Alta
Risco financeiro assumido pelo operador	Médio	Baixo	Médio	Baixo
Geração estimada de receita adicional (%)	4–10%	8–20%	3–7%	10–18%
Previsibilidade de fluxo de caixa	Média	Alta	Baixa	Alta
Dependência de políticas públicas	Média	Alta	Alta	Baixa
Aplicação típica	Coleta e pré-processamento	Construção de plantas e P&D	Operações industriais	Garantia de compra do material recuperado

Fonte: Adaptado de Cabral-Neto *et al.* (2023), CSIRO (2024), Rezaei *et al.* (2025) e Zanoletti (2024).

4.2.4 Dimensão socioambiental

A quarta diretriz determina que o modelo proposto deve possuir uma dimensão socioambiental, a ideia é assegurar a sustentabilidade do sistema no longo prazo e fazer a inclusão social nos novos segmentos produtivos criados, fortalecendo a economia verde do país e gerando novos empregos.

A reciclagem de baterias de veículos elétricos oferece inúmeros benefícios ambientais, com a redução de resíduos tóxicos e as emissões de CO₂ no meio ambiente, novos empregos podem ser criados dentro das cadeias de reciclagem visando a sustentabilidade (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

As medidas socioambientais recomendadas são:

- Inserir metas de empregabilidade e inclusão nos programas de reciclagem com ênfase no desenvolvimento do setor ambiental;
- Monitorar os impactos ambientais causados por cada tipo de rota tecnológica, utilizando indicadores de pegada de carbono e eficiência energética do processo;
- Garantir condições seguras de trabalho para todas as etapas do processo de reciclagem, em específico nos setores de coleta e desmontagem das baterias;
- Criar programas sobre educação ambiental e conscientizar a população sobre as formas corretas de descarte de baterias no geral;
- Incentivar parcerias entre as cooperativas de reciclagem e criar um sistema de economia solidária, isso aumentaria os esforços atuando na triagem e pré-processamento dos resíduos.

Essa diretriz garante que o modelo brasileiro não fique limitado apenas na questão econômica, mas leve também em consideração a questão ambiental, aumentando a inclusão social e fortalecendo a economia local próxima aos centros de reciclagem.

4.3 Proposta de modelo conceitual de reciclagem para o Brasil

Utilizando como base os modelos internacionais analisados e as diretrizes estabelecidas na Seção 4.2, propõe-se o seguinte modelo conceitual de reciclagem de baterias de íon-lítio adaptado para o cenário do Brasil.

O modelo foi pensado para atender as necessidades brasileiras, o modelo utiliza os princípios da economia circular, da responsabilidade estendida do produtor (EPR) e da integração regional, o modelo proposto busca o equilíbrio entre viabilidade técnica, sustentabilidade ambiental e competitividade econômica.

Para a proposta, foi levado em consideração que o Brasil apresenta um grande potencial energético, industrial e possui uma enorme extensão territorial, mas o Brasil também carece de uma cadeia estruturada para gerir o ciclo de vida das baterias e lidar com os seus resíduos.

4.3.1 Estrutura geral do modelo

O modelo proposto foi dividido em quatro partes, cada parte será representada por uma camada dos diferentes setores que compõem o modelo, essa divisão torna a explicação do modelo mais objetiva.

As quatro camadas são a regulatória, a tecnológica, a econômica e a socioambiental, apesar da divisão todas as camadas interagem entre si de maneira dinâmica se complementando. Cada camada é composta por um conjunto de ações e medidas operacionais indispensáveis para o funcionamento do sistema de maneira eficiente.

O modelo segue uma estrutura de ciclo contínuo retroalimentado, onde o fluxo de materiais, informações e incentivos passa por todas as etapas do processo, desde a fabricação e consumo até a recuperação e reintegração industrial.

O funcionamento do sistema é descrito em cinco fases, sendo elas:

- **Fase de consumo e descarte:** no final da vida útil da bateria o consumidor descarta ou devolve a bateria usada em postos de coleta especializados ou concessionárias automotivas;
- **Fase de logística reversa:** as baterias coletadas são armazenadas e transportadas para centros de triagem regionais, onde passam por uma avaliação técnica e classificação;
- **Fase de pré-processamento:** as baterias descartadas passam pelo processo de desmontagem, separação de módulos e neutralização de eletrólitos, esses processos preparam as baterias para serem recicladas de maneira mais eficiente;
- **Fase de reciclagem industrial:** processo de reciclagem através de rotas híbridas (piro + hidro + direta) para recuperar os metais e recondicionar os componentes;
- **Fase de reinserção e circularidade:** os materiais e módulos recuperados são reintroduzidos na cadeia produtiva, diminuindo a necessidade de extrair mais matéria prima.

Essas fases, devem ser incluídas no sistema de rastreabilidade digital (*Battery Passport* nacional), facilitando a rastreabilidade do ciclo de vida das baterias no país.

4.3.2 Camada regulatória e institucional

A camada regulatória estabelece as regras, as responsabilidades e os instrumentos de governança que garantem o funcionamento coordenado de toda a cadeia.

Para o modelo proposto define a implementação das seguintes normas e políticas:

- Criar um marco regulatório específico para baterias de veículos elétricos, esse marco supriria a ausência atual de marcos específicos desse setor no Brasil, ele deve estar alinhado à PNRS e às normas atuais da ANEEL;
- Implementar o sistema nacional de rastreabilidade, o sistema seria administrado de forma conjunta entre os órgãos públicos, os fabricantes e os recicladores, o sistema serviria para monitorar com precisão a circulação de baterias no país;
- Implementar metas obrigatórias de reciclagem e reuso, assim como na União Europeia, as metas vão aumentando de acordo com o desenvolvimento da capacidade industrial instalada no Brasil;
- Definir responsabilidades compartilhadas entre todos os envolvidos na cadeia de produção, sendo eles as montadoras, os importadores, os recicladores e os consumidores;
- Criar um fundo de investimento para o setor de reciclagem, o fundo vai financiar pesquisas de desenvolvimento, infraestrutura e campanhas educativas, servindo para atrair investimento de capital no setor.

A proposta dessa camada é garantir a transparência, o controle e a segurança jurídica do modelo, com o ambiente institucional bem estabelecido, novos investimentos são atraídos para o setor, quanto mais investimentos, mais consolidada se torna a indústria de reciclagem no país (ANEEL, 2022; Cabral-Neto *et al.*, 2023).

4.3.3 Camada tecnológica e operacional

A camada tecnológica do modelo se refere aos processos industriais e logísticos que compõem toda a cadeia de reciclagem.

O modelo proposto é um sistema baseado em polos regionais instalados nas principais regiões do país, a integração desses polos será feita através de uma rede de coleta e triagem distribuída.

Os polos regionais ficariam localizados nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, neles seriam executadas as etapas do processo de reciclagem descritas na tabela 12:

Tabela 12- Etapas e tecnologias da reciclagem de baterias de íon-lítio

Etapa	Descrição	Tecnologia sugerida
Desmontagem e triagem	Separação dos módulos e neutralização de componentes perigosos	Processos automatizados e segurança controlada
Pré-processamento	Moagem, trituração e separação de metais ativos	Trituração mecânica e filtragem eletrostática
Refino químico	Extração seletiva de metais (Li, Ni, Co, Mn)	Hidrometalurgia combinada a processos de lixiviação seletiva
Recuperação energética	Aproveitamento térmico e energético de resíduos	Pirometalurgia em forno rotativo ou plasma
Recondicionamento	Reaproveitamento de módulos em “segunda vida”	Reciclagem direta e reuso estacionário

Fonte: Adaptados de Cabral-Neto *et al.* (2023), Rezaei *et al.* (2025) e Premathilake *et al.* (2025).

Esse formato de polos regionais garante uma maior eficiência técnica, reduzindo os gastos logísticos e aumentando a taxa de recuperação de resíduos, o processo como um todo está alinhado aos princípios de circularidade da economia verde (Zanoletti, 2024; Rezaei *et al.*, 2025).

4.3.4 Camada econômica e financeira

A camada econômica analisa a viabilidade econômica do modelo, para se sustentar o modelo depende de um ecossistema de financiamento sustentável, o ecossistema é a combinação de recursos públicos e privados.

A modelo inclui todas as diretrizes propostas no tópico 4.2.3 e acrescenta mais alguns mecanismos de sustentação financeira.

Os Títulos Verdes (*Green Bonds*) são a emissão de papéis de dívida que captam recursos para projetos de reaproveitamento de baterias, esses papéis possuem certificação ambiental.

Eles podem ser emitidos por empresas, consórcios industriais ou governos estaduais, o retorno financeiro é dependente de indicadores de sustentabilidade.

O Mecanismo de Depósito e Retorno (MDR) é a cobrança de um valor adicional na venda de baterias novas, esse valor é reembolsado quando a bateria é devolvida num posto de coleta autorizado.

Esse mecanismo incentiva a logística reversa, ele já foi adotado na Alemanha e na Noruega e obteve sucesso.

Nos leilões de reciclagem (*Reverse Auctions*) o governo seleciona as empresas com o menor custo por tonelada de material recuperado, os serviços de reciclagem são contratados via licitação de forma mais competitiva, esse processo é semelhante aos leilões de energia limpa que já ocorrem no Brasil.

As linhas de crédito verdes com juros subsidiados são oferecidas pelos bancos públicos (BNDES, Banco do Nordeste, BRDE), seu foco é facilitar a ampliação de empresas de reciclagem que possuem certificados verdes, as linhas de crédito oferecem prazos estendidos e taxas reduzidas.

O Programa de Compras Públicas Sustentáveis é uma iniciativa governamental de utilizar materiais reciclados ou recondicionados em licitações, esse programa cria uma demanda fixa por parte do governo, o que garante uma parcela do mercado consumidor dos produtos derivados de baterias recicladas.

O Seguro de desempenho ambiental serve de instrumento financeiro para proteger os investidores e operadores dos riscos associados a falhas técnicas ou contaminações que possam ocorrer durante o processo de reciclagem, ele aumenta a confiabilidade do setor reduzindo barreiras de entrada no mesmo.

O Fundo de Garantia para Projetos Verdes (FGPV) é um mecanismo público que oferece garantias de crédito para novas empresas de reciclagem, ele reduz os riscos e facilita o acesso dessas empresas aos financiamentos bancários tradicionais.

Com essas medidas e as previamente estabelecidas no tópico 4.2.3, o sistema passa a ser economicamente sustentável, os custos operacionais são reduzidos e ainda existe estímulo para investimentos contínuos no setor (CSIRO, 2024; WEF, 2023).

4.3.5 Camada socioambiental

A camada socioambiental do modelo garante que ele atenda a todos os princípios de justiça ambiental, segurança ocupacional e inclusão produtiva.

Os elementos dessa camada incluem as diretrizes estabelecidas no tópico 4.2.4 e acrescenta mais algumas diretrizes específicas.

O planejamento territorial para instalação de recicladoras garante que as plantas de reciclagem sejam instaladas em áreas estratégicas, onde exista demanda e infraestrutura adequada, ele evita conflitos socioambientais, reduz os gastos e as emissões com transporte de resíduos.

O planejamento mapeia e inclui estudos prévios dos impactos e vulnerabilidades locais antes de implementar os centros de reciclagem.

O método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), esse método monitora desde a extração dos materiais até a reciclagem final, ele compara os cenários e garante que a reciclagem gera benefícios líquidos em relação a alternativas convencionais.

A criação de um selo nacional de conformidade, o selo avalia critérios como transparência, redução de emissões, tratamento de efluentes e remuneração justa, caso a empresa atenda os requisitos, ela recebe a certificação.

A certificação aumenta a confiança dos consumidores nas empresas e atrai novos investimentos.

O *Ecodesign* orientado para desmontagem fácil estabelece diretrizes que estimulam os fabricantes a desenvolver baterias com um número menor de tipos de ligas, módulos que se destacam facilmente, a ausência do uso de cola na estrutura da bateria e uma padronização de formatos de baterias entre os fabricantes. Padronizar como as baterias são fabricadas reduz o custo e o tempo da reciclagem, também reduz os riscos relacionados ao manuseio informal de baterias (como incêndios, intoxicações e contaminação).

Estas diretrizes garantem os benefícios ambientais do modelo brasileiro, como a redução de resíduos tóxicos e emissões, gerando impactos sociais positivos, como empregos e capacitação produtiva (Cabral-Neto *et al.*, 2023; Rezaei *et al.*, 2025).

4.3.6 Potenciais benefícios do modelo

A adoção do modelo proposto vai oferecer uma série de benefícios para o Brasil, os principais benefícios são:

- A redução da dependência de mercados externos e a diminuição da necessidade de extrair novas matérias-primas;
- Um maior aproveitamento energético das baterias e a valorização econômica dos resíduos produzidos por elas;
- Mais estímulo para à inovação tecnológica dentro do país o que fortalece o desenvolvimento industrial verde;
- Um novo setor capaz de gerar novos empregos qualificados e novas cadeias produtivas desenvolvendo a economia regional;
- O aumento na taxa de transição energética e da economia circular verde.

A adoção do modelo coloca o Brasil como um forte representante na cadeia global de reciclagem de baterias, podendo até mesmo se destacar e liderar a transição sustentável na América Latina.

4.4 Avaliação técnico-econômica e ambiental do modelo

Para verificar a viabilidade de implementação do modelo no contexto brasileiro, é necessário fazer uma avaliação técnico-econômica e ambiental, a avaliação considera as dimensões tecnológica, financeira e ecológica do modelo.

A análise do modelo agrupa os dados obtidos nas etapas anteriores da pesquisa, o objetivo é identificar benefícios mensuráveis e os possíveis desafios operacionais que o Brasil venha a ter ao desenvolver a sua cadeia de reciclagem de baterias de íon-lítio.

Os dados utilizados baseiam-se em indicadores qualitativos e quantitativos, obtidos através da literatura técnica e dos estudos dos cenários internacionais (Rezaei *et al.*, 2025; Zanoletti, 2024; CSIRO, 2024).

Estes indicadores permitem fazer a estimativa dos potenciais ganhos na eficiência energética, na redução dos impactos ambientais e no retorno econômico,

sem haver à necessidade de experimentação direta, o que condiz com o caráter teórico-analítico deste trabalho.

4.4.1 Avaliação técnica

Os fatores que determinam a viabilidade técnica do modelo brasileiro são o nível de maturidade tecnológica das rotas de reciclagem e a integração logística entre todos os agentes da cadeia.

Adotar rotas híbridas que combinam a pirometalurgia, a hidrometalurgia e a reciclagem direta se mostra como a opção mais adequada ao país, essa estratégia equilibra eficiência, custo e disponibilidade tecnológica (Premathilake *et al.*, 2025).

- **Eficiência de recuperação:** As rotas híbridas podem alcançar taxas de recuperação superiores a 90% para o cobalto e o níquel, e entre 70 e 80% para o lítio, esses valores dependem do grau de pureza exigido (Rezaei *et al.*, 2025). Levando em consideração as condições operacionais brasileiras onde a infraestrutura industrial está em expansão e os custos energéticos são competitivos, no cenário onde o Brasil alcançou a maturidade tecnológica plena é possível alcançar eficiências médias de 85% a 90%;
- **Infraestrutura e integração logística:** A infraestrutura ideal para o modelo brasileiro prevê a criação de polos regionais de reciclagem nas principais regiões metropolitanas, os polos estariam conectados aos centros de coleta e triagem espalhados pelo território nacional de forma estratégica. Esse modelo estrutural reduz custos logísticos com o transporte e armazenamento dos resíduos, descentraliza o processamento dos resíduos e aproveita o potencial energético regional, além de poder ser instalado nas proximidades dos polos industriais automotivos (Cabral-Neto *et al.*, 2023);
- **Capacidade de adaptação tecnológica:** O modelo proposto pode ser considerado flexível, pois ele permite a adição de novas tecnologias, como por exemplo a reciclagem direta de cátodos e a recuperação eletroquímica de lítio. A flexibilidade e a modularidade do modelo garantem a resiliência tecnológica do sistema, essa característica é importante para que o modelo acompanhe as tendências globais de inovação, o que reduz o risco de obsolescência industrial (Zanoletti, 2024).

4.4.2 Avaliação econômica

A sustentabilidade financeira do projeto é um fator determinante no momento de implementar o modelo.

Todo o processo da reciclagem de baterias apresenta custos elevados, a maior parte dos custos envolvidos se encontra nas fases de desmontagem e refino químico.

No entanto, quando o sistema possui a escala correta e é operado de forma integrada os retornos financeiros diretos e indiretos superam os custos do processo.

- **Custos e receitas potenciais:** O custo médio global por tonelada reciclada de bateria de íon-lítio fica em torno de US\$1.200 à US\$1.800, o custo final depende do método utilizado e do nível de automação envolvida no processo (CSIRO, 2024).

A receita estimada com a reciclagem e recuperação dos metais críticos fica em torno de US\$2.000 a US\$2.500 por tonelada de bateria, os sistemas que priorizam a recuperação de níquel e cobalto retornam os valores financeiros mais altos (Rezaei *et al.*, 2025).

O modelo brasileiro é capaz de alcançar a viabilidade econômica positiva dentro do médio prazo de 5 a 8 anos, vai depender apenas da adoção de políticas de incentivo e do aumento da escala produtiva atual.

- **Mecanismos de incentivo e retorno financeiro:** A criação do Fundo Nacional de Reciclagem de Baterias (FNRB) proposto na Seção 4.3, permitiria o financiamento inicial da infraestrutura industrial.
O fluxo inicial de receita das empresas recicladoras viria do FNRB em conjunto com o uso de créditos de reciclagem e contratos de *offtake*, essas medidas garantiriam um fluxo de receita contínuo para novas empresas.
A adoção desses mecanismos reduziria a dependência por subsídios diretos, o que tornaria o sistema competitivo e sustentável no longo prazo (WEF, 2023).
- **Efeitos macroeconômicos:** Aplicando o modelo em escala nacional estima-se que o modelo possa:

- Até o ano de 2035 gerar cerca de 20 mil empregos diretos e indiretos nos setores de reciclagem, coleta e transporte;
- Movimentar quantias em torno de R\$ 4 a 5 bilhões anuais com atividades industriais e de reuso;
- Reduzir as taxas de importação de metais críticos em até 25%;
- Melhorar os rendimentos da indústria automotiva nacional, aumentando a autonomia produtiva, fortalecendo a transição energética e garantindo a soberania tecnológica do setor (Cabral-Neto *et al.*, 2023; ANEEL, 2022).

4.4.3 Avaliação ambiental

O modelo proposto apresenta soluções para as questões ambientais, ele reduz os impactos ambientais e promove a economia circular verde. A reciclagem de baterias reduz consideravelmente a quantidade de resíduos perigosos liberados no meio ambiente, também reduz a extração primária de metais críticos, sendo a extração uma das etapas mais poluentes de todo o ciclo produtivo (Biswal *et al.*, 2024).

- **Redução de resíduos e emissões:** Para cada tonelada de bateria que é reciclada evita-se em média a extração de 2,5 toneladas de minério de lítio e níquel, o que reduz em até 60% as emissões relacionadas à mineração (Rezaei *et al.*, 2025). A reciclagem também evita o descarte inadequado de eletrólitos e metais pesados, estes resíduos representam um enorme risco de contaminação dos solos e lençóis freáticos (EPA, 2023).
- **Eficiência energética e reaproveitamento:** A rota hidrometalúrgica e a rota de reciclagem direta consomem cerca de 40% menos energia, quando comparadas com o consumo energético da extração primária de minérios, ambas as rotas possibilitam o reaproveitamento energético dos resíduos gerados pela pirometalurgia (Zanoletti, 2024).
- **Indicadores de sustentabilidade:** Utilizando como base as referências analisadas, podem-se adotar os seguintes indicadores de desempenho

ambiental para monitorar o desempenho do sistema:

- Taxa de reciclagem por tonelada de baterias geradas (TRB);
- Eficiência energética média (EE%) dos processos industriais;
- Emissões evitadas de CO₂ equivalente (tCO₂eq);
- Índice de circularidade de materiais (ICM);
- Pegada hídrica por tonelada processada (PH).

Estes indicadores precisam ser monitorados por um órgão de gestão nacional, sendo reportados anualmente por todas as empresas participantes da cadeia produtiva.

4.4.4 Avaliação integrada de sustentabilidade

As avaliações feitas anteriormente, indicaram que o modelo proposto é viável, escalável e sustentável, desde que a implementação seja feita de maneira coordenada e progressiva.

Os resultados mostram que apesar dos desafios iniciais de infraestrutura e regulamentação, os benefícios à longo prazo são superiores aos custos de implementação, o que torna o modelo uma ótima estratégia complementar na transição energética e na instauração da economia circular no Brasil.

4.5 Discussão crítica e perspectivas futuras

A proposta conceitual do modelo de reciclagem de baterias de veículos elétricos representa um marco na transição energética nacional para o Brasil.

No entanto, a implementação do modelo depende do aprimoramento institucional, tecnológico e social, visando solucionar os desafios estruturais do país.

Essa seção discute de maneira crítica as limitações e os possíveis desdobramentos do modelo apresentado, embasado na literatura científica e nas tendências dos modelos internacionais.

4.5.1 Reflexões sobre a viabilidade e integração institucional

A viabilidade na implementação do modelo proposto, depende diretamente da capacidade do Estado brasileiro administrar as políticas públicas em conjunto com os setores energético, ambiental e industrial.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece os princípios fundamentais para o tratamento de resíduos sólidos, mas ainda existem brechas regulatórias específicas para as baterias de íon-lítio, em específico no que se refere à logística reversa e a rastreabilidade (ANEEL, 2022).

A criação do marco regulatório de baterias de íon-lítio de veículos elétricos proposta na Seção 4.3 seria a primeira etapa para garantir a transparência do processo e distribuir as responsabilidades entre os fabricantes, os recicladores e os consumidores.

É necessária a coordenação federativa entre os estados e os municípios para evitar a sobreposição de competências, a coordenação federativa garante a homogeneidade na fiscalização e no licenciamento ambiental (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

O sucesso do modelo a partir do ponto de vista institucional, depende de uma governança colaborativa, que seja capaz de alinhar metas ambientais com incentivos econômicos e regulatórios.

4.5.2 Desafios tecnológicos e oportunidades de inovação

O principal desafio tecnológico do Brasil é adaptar as rotas de reciclagem às condições industriais e energéticas atuais do país, a adaptação precisa garantir a eficiência e a segurança ambiental.

O Brasil possui universidades e centros de pesquisa com competência nas áreas de engenharia química e de materiais, mas ainda existe pouca integração entre a pesquisa acadêmica e a aplicação industrial, a falta de integração limita a velocidade de desenvolvimento nas inovações tecnológicas (Rezaei *et al.*, 2025).

O modelo proposto define a criação de polos tecnológicos regionais, os polos estariam vinculados a universidades e incubadoras industriais, a princípio eles serviriam para fomentar a inovação tecnológica aplicada.

Nestes polos estariam concentrados os esforços de desenvolvimento para possíveis novas rotas de reciclagem direta, processos hidrometalúrgicos de baixa emissão e tecnologias de condicionamento de módulos de bateria para “segunda vida”.

Estas iniciativas consolidariam a base tecnológica nacional, tornando o Brasil autossuficiente na questão tecnológica, o que reduziria a dependência nacional por tecnologias estrangeiras, além de estimular a formação de mão de obra especializada em todo o país (Zanoletti, 2024).

Outros aspectos a serem explorados em estudos futuros são o avanço da digitalização industrial e da inteligência artificial, ambos oferecem novas oportunidades de aprimoramento nos setores de monitoramento automatizado de processos e gestão dos dados ambientais, além de otimizações energéticas em plantas de reciclagem.

4.5.3 Viabilidade econômica e expansão de mercado

Toda a sustentabilidade econômica do sistema dependerá da criação das condições adequadas, o mercado precisa oferecer condições estáveis e previsíveis, que incentivem investimentos de longo prazo.

A principal solução prevista são os mecanismos de créditos de reciclagem, fundos setoriais e parcerias público-privadas (PPPs), estas medidas podem desempenhar o papel central na consolidação do setor no Brasil.

Para o Brasil, é esperado um crescimento expressivo da frota de veículos elétricos, podendo ultrapassar 1,5 milhão de unidades em circulação até o ano de 2035 (IEA, 2024), a demanda de reciclagem de baterias vai aumentar proporcionalmente dentro deste período, tornando o setor bastante rentável (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

Além disto, existe a tendência do mercado secundário de materiais recuperados como lítio, níquel, manganês e cobalto se valorizar, visto que no futuro esses elementos se tornem mais escassos globalmente, o que conseqüentemente torna a reciclagem mais lucrativa e geoestrategicamente relevante.

4.5.4 Sustentabilidade ambiental e impacto social

O modelo proposto tem grande potencial na redução das emissões dos gases de efeito estufa, do consumo energético e da extração primária de minérios.

Estima-se em média que para cada tonelada de bateria reciclada é evitado até 3 toneladas de emissões de CO₂ e uma redução de 60% no consumo de energia quando comparado à produção de novos materiais (Rezaei *et al.*, 2025).

No entanto, o sistema não deve levar em consideração apenas a questão da eficiência ambiental, o modelo precisa considerar as dimensões sociais, como empregabilidade verde e capacitação profissional, o modelo destaca a necessidade de investir em capacitação técnica, em especial nas regiões de maior vulnerabilidade socioeconômica.

O uso de indicadores de desempenho social e ambiental (ESG) permitirá medir o real impacto do modelo, e através desses dados formular as futuras políticas públicas.

4.5.5 Perspectivas futuras e recomendações para estudos posteriores

As análises feitas neste trabalho mostram que o Brasil possui condições de desenvolver a sua própria cadeia de reciclagem de baterias, mas o sucesso da implementação exigirá planejamento e políticas de Estado de longo prazo.

Utilizando como base os dados deste trabalho, recomenda-se para futuras pesquisas os seguintes eixos de estudo:

- A validação empírica do modelo proposto neste trabalho, através de simulações computacionais e estudos de viabilidade econômica e social;
- O desenvolvimento dos indicadores de circularidade propostos neste trabalho, os indicadores seriam específicos para o setor de baterias elétricas veiculares;
- Efetuar estudos de modelagem de fluxo de materiais, estes estudos determinarão o potencial do setor de reciclagem no Brasil até o ano de 2040;
- O estudo analítico que compare as rotas de reciclagem, considerando os aspectos técnicos, custos e impactos ambientais envolvidos em cada rota;
- O estudo sobre as políticas públicas atuais de incentivo, com o objetivo de elaborar e propor novas políticas, além de descentralizar a cadeia produtiva.

Estas pesquisas ajudaram na consolidação do modelo, transformando o modelo conceitual em um plano nacional totalmente operacional, aliando os conceitos de inovação tecnológica, geração de valor econômico e responsabilidade ambiental.

4.5.6 Considerações finais do capítulo

Em resumo, o modelo proposto neste trabalho possui coerência e consistência nos conceitos abordados, a solução apresentada é estruturada para atender os possíveis desafios da reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil.

Entretanto, o sucesso do modelo depende de decisões políticas, investimentos contínuos nos setores de P&D e infraestrutura, além de uma maior integração entre as universidades, o governo e o setor produtivo.

A discussão apresentada neste capítulo prova que o modelo é tecnicamente viável, economicamente promissor e ambientalmente necessário, a implementação do modelo pode colocar o Brasil em destaque na transição energética e na economia circular global.

5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve o objetivo de analisar modelos de reciclagem de diferentes nações e através desta análise propor um modelo conceitual brasileiro de reciclagem de baterias de veículos elétricos, o embasamento do modelo foi feito a partir das experiências internacionais, sendo necessário adaptar o modelo às condições estruturais, tecnológicas e institucionais do Brasil.

O principal questionamento deste trabalho é sobre como o Brasil deve estabelecer a sua cadeia de reciclagem de baterias de íon-lítio para que ela seja eficiente, economicamente viável e ambientalmente sustentável, sendo considerada a infraestrutura e o atual estágio de desenvolvimento dos setores industriais e energéticos nacionais.

Durante o estudo, constatou-se que a adoção de veículos elétricos representa uma tendência global. Entretanto, o aumento na demanda de veículos elétricos cria desafios relacionados à gestão do ciclo de vida das baterias, necessitando de soluções que integrem recuperação de materiais, inovação tecnológica e economia circular.

Com base neste cenário, o modelo deste trabalho serve de estrutura para orientar políticas públicas, processos tecnológicos e mecanismos econômicos relacionados ao desenvolvimento da cadeia nacional de reciclagem. Este trabalho busca preencher as brechas existentes entre a teoria, a prática e a regulamentação, contribuindo no desenvolvimento de um sistema circular robusto que esteja alinhado às diretrizes da transição energética nacional.

5.1 Modelos internacionais

O trabalho alcançou os seus objetivos ao analisar os modelos internacionais e propor o modelo conceitual adaptado às condições brasileiras. A análise evidenciou que os países da União Europeia, China e Estados Unidos estruturaram as suas cadeias de reciclagem através da integração entre regulação específica, responsabilidade estendida do produtor, rastreabilidade digital e inovação tecnológica contínua, o resultado dessas medidas foram altas taxas de recuperação de materias

e circularidade (Biswal *et al.*, 2024; Rezaei *et al.*, 2025). Os modelos desses países serviram como base na formulação do modelo nacional deste trabalho.

A análise mostrou que o Brasil possui um enorme potencial energético e científico, o Brasil apresenta uma crescente capacidade industrial e centros de pesquisa consolidados.

No entanto, os seus principais problemas estão relacionados à ausência de regulamentação específica para o setor, a baixa coordenação institucional por parte do governo e a falta de investimentos em inovação tecnológica aplicada (Cabral-Neto *et al.*, 2023; ANEEL, 2022). O atual cenário brasileiro mostra que o modelo necessita ser implementado de forma progressiva, de forma que o modelo seja capaz de amadurecer de acordo com a evolução da estrutura regulatória e tecnológica.

A partir dos dados analisados, foi proposto neste trabalho o modelo estruturado em quatro camadas, a regulatória, a tecnológica, a econômica e a socioambiental, as camadas foram organizadas de forma interdependente.

Através da validação teórica dos dados, ficou indicado que o modelo pode alcançar eficiência média superior a 85% na taxa de recuperação de metais, uma redução de até 60% nas emissões de CO₂, além de produzir resultados econômicos positivos no médio e longo prazo (Zanoletti, 2024; CSIRO, 2024). A criação e implementação dos polos regionais de reciclagem pode gerar muitos empregos qualificados, aumentar os investimentos no setor e diminuir a dependência brasileira do mercado externo de matérias-primas.

No conjunto, os resultados confirmam que o modelo proposto oferece um excelente caminho para o desenvolvimento do setor no Brasil.

5.2 Contribuições científicas e práticas

Este trabalho ofereceu um conjunto de contribuições científicas que mostram a sua relevância para o setor energético e para a engenharia de energias no Brasil. As contribuições foram organizadas em duas dimensões complementares.

5.2.1 Contribuições científicas

No campo científico, este trabalho apresenta uma abordagem inovadora ao propor um modelo de reciclagem de baterias de íon-lítio para o Brasil, ele amplia a literatura existente do tema, compilando variáveis técnicas, institucionais e ambientais e aplicando as ideias de forma lógica e sistêmica, suprindo as lacunas deixadas por abordagens fragmentadas comuns na produção científica internacional (Cabral-Neto *et al.*, 2023; Rezaei *et al.*, 2025).

O trabalho contribui sistematizando dados técnicos e indicadores recentes dos processos de reciclagem, destacando a eficiência, os impactos ambientais e os requisitos operacionais relacionados às rotas de reciclagem. Este levantamento de dados agrega informações na literatura do tema de reciclagem em países em desenvolvimento, uma área que ainda é pouco explorada e carece de literatura, além de fornecer uma base teórica para futuras pesquisas envolvendo modelagem quantitativa, análise de ciclo de vida e estudos comparativos relacionados as baterias de íon-lítio.

A metodologia aplicada neste trabalho fornece um modelo replicável para outras tecnologias limpas, como a reciclagem de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, o que amplia o alcance científico deste estudo.

5.2.2 Contribuições práticas e aplicadas

No campo prático, o trabalho apresenta elementos que podem contribuir no desenvolvimento de políticas públicas, no planejamento industrial e na inovação tecnológica. As principais contribuições são:

- Uma base teórica para a regulamentação nacional, onde são incluídas metas de reciclagem, sistemas de rastreabilidade e a responsabilidade estendida do produtor;
- A proposta de criação do Fundo Nacional de Reciclagem de Baterias, com o fundo sendo destinado a financiar infraestrutura, P&D e capacitação dentro do setor de reciclagem;

- Um modelo operacional constituído por polos regionais de reciclagem, com os polos sendo integrados às universidades, centros tecnológicos, indústria e governos locais;
- Estabelece diretrizes de qualificação profissional, estimulando a geração de empregos e a formação de profissionais nas áreas de engenharia eletroquímica, automação e logística reversa;
- Estabelece mecanismos de incentivo econômico, como os créditos de reciclagem, os contratos de offtake e as isenções fiscais, estes mecanismos ajudam a garantir a viabilidade financeira do setor (WEF, 2023; CSIRO, 2024).

Estas contribuições evidenciam que o trabalho ultrapassa o campo teórico e oferece ferramentas práticas que podem ser aplicadas no desenvolvimento da cadeia de reciclagem brasileira.

5.3 Discussão crítica sobre os resultados

A análise dos resultados mostra o potencial que a reciclagem de baterias de veículos elétricos no Brasil possui para contribuir com a transição energética, embora o modelo proposto seja consistente, a sua implementação prática do modelo ainda necessita de avanços institucionais e investimentos contínuos na cadeia nacional de reciclagem.

5.3.1 Governança e institucional

A principal barreira identificada neste trabalho foi a ausência de um marco regulatório específico para baterias de íon-lítio automotivas.

A atual Política Nacional de Resíduos Sólidos fornece diretrizes gerais para o tratamento de resíduos, mas não contempla aspectos importantes para as baterias como a rastreabilidade, a segurança e a responsabilidade estendida do produtor (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

A criação de um regulamento específico para as baterias de veículos elétricos, semelhante ao modelo de regulamentação europeu *Battery Passport* (Zanoletti, 2024), supriria a necessidade legislativa atual do Brasil definindo responsabilidades claras, estabelecendo metas graduais e garantindo transparência regulatória.

5.3.2 Desafios tecnológicos e necessidade de inovação

O Brasil possui capacidade científica para desenvolver a sua cadeia de reciclagem, a infraestrutura industrial atual carece de capacidade para processar baterias em escala comercial.

Combinar várias rotas de reciclagem como a pirometalúrgica, a hidrometalúrgica e a direta aumenta a eficiência da cadeia tornando-a mais flexível, a combinação de rotas se mostra a melhor alternativa no desenvolvimento da infraestrutura nacional, porém a implementação demanda investimentos elevados, uma mão de obra especializada e um controle ambiental rigoroso (Premathilake *et al.*, 2025).

O Brasil deve implementar programas nacionais de P&D, estes programas devem ser apoiados por agências como BNDES e Finep, o incentivo é essencial para o desenvolvimento de tecnologias nacionais, reduzir custos e desenvolver processos mais limpos. As tecnologias emergentes IA, digitalização industrial e sensores avançados contribuem para o aumento da rastreabilidade e a eficiência operacional da cadeia produtiva, o Brasil deve estar alinhado com as tendências tecnológicas internacionais.

5.3.3 Sustentabilidade econômica e escalabilidade

Atualmente os custos envolvidos no processo de reciclagem supera o valor dos materiais recuperados, reduzindo a atratividade econômica do setor (CSIRO, 2024). Entretanto, com a expansão da frota elétrica e a valorização de metais críticos este cenário tende a se reverter.

O uso de instrumentos financeiros como o Fundo Nacional de Reciclagem de Baterias, pode garantir estabilidade financeira para o setor, atraindo e incentivando investimentos. A cadeia composta por polos regionais integrados a centros de

pesquisa e centros de coleta locais, diminui os custos logísticos envolvidos no transporte e processamento dos resíduos, descentraliza a capacidade produtiva e incentiva o desenvolvimento econômico e tecnológico regional (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

5.3.4 Sustentabilidade ambiental e inclusão social

A reciclagem de baterias diminui as taxas de emissões de CO₂ e diminui a necessidade de minerar novos recursos, sendo esses os principais benefícios ambientais diretos da reciclagem (Biswal *et al.*, 2024). Entretanto, a sustentabilidade plena de toda a cadeia de reciclagem depende de condições seguras de trabalho, capacitação técnica e inserção de cooperativas especializadas nas etapas coleta e triagem.

É importante desenvolver programas de educação ambiental e engajamento social, através deles é possível ampliar as taxas de retorno das baterias por meio da logística reversa. A inclusão produtiva e a justiça social servem como pilares e alinham o modelo de acordo com os princípios da transição energética justa.

5.3.5 Integração das dimensões avaliadas

A análise do modelo proposto mostra a sua coesão, ele possui a capacidade de adaptação de acordo com o amadurecimento tecnológico e regulatório do Brasil.

Apesar dos desafios na implementação, as vantagens ambientais, industriais e socioeconômicas do modelo justificam a sua implementação de maneira progressiva. O sucesso da implementação depende da convergência entre políticas públicas, inovação e participação social, desta forma o modelo consolidaria a cadeia nacional de reciclagem de acordo com às metas globais de descarbonização.

5.4 Limitações do estudo e implicações futuras

A pesquisa utilizada neste trabalho apresenta limitações devido ao seu caráter conceitual e exploratório. A falta de dados empíricos nacionais sobre a reciclagem de

baterias de íon-lítio limita a precisão das estimativas técnicas e econômicas, visto que o Brasil não possui atualmente plantas industriais em operação e nem sistemas de monitoramento padronizados.

Parte das informações utilizadas neste trabalho baseiam-se em estudos internacionais que utilizam metodologias heterogêneas, essa diferença nas metodologias de cada estudo pode gerar variações nos indicadores de eficiência, custos e emissões (Rezaei *et al.*, 2025; CSIRO, 2024).

Do ponto de vista estrutural e tecnológico, a falta de infraestrutura industrial em escala gera o impedimento na validação experimental de parâmetros essenciais do modelo proposto, sendo eles a eficiência metalúrgica, o rendimento das rotas híbridas e o desempenho energético total. A diversidade de formatos e químicas de baterias é outro fator que dificulta a padronização dos protocolos de desmontagem, logística e pré-processamento, o que representa um enorme desafio operacional para os futuros projetos de cadeias de reciclagem.

Do ponto de vista institucional, as brechas regulatórias brasileiras, deixadas pela ausência de um marco específico para baterias automotivas, acabam limitando a coordenação entre órgãos federais, estaduais e municipais, o que reduz a capacidade de planejamento e o estímulo à inovação dentro do setor.

Estas limitações se mostram como oportunidades para os avanços científicos dentro do setor.

Em síntese, as limitações mostram um campo de pesquisa em formação, o que reforça a necessidade de mais pesquisas e inovações nessa área de estudo. Este trabalho serve de base inicial para o desenvolvimento de análises empíricas, as análises servirão de orientação para as políticas públicas e projetos industriais ao longo dos próximos anos.

5.5 Perspectivas estratégicas para o Brasil

A estruturação da cadeia nacional de reciclagem de baterias de íon-lítio se mostra como uma excelente oportunidade para o Brasil. As projeções atuais mostram que com o aumento na adesão dos veículos elétricos serão produzidas mais de 100 mil toneladas de baterias descartadas por ano até 2035 (IEA, 2024), o Brasil precisa

se preparar com políticas e infraestrutura capazes de transformar o setor produtivo, gerando produtos com alto valor agregado.

O modelo proposto mostra que o Brasil possui todas as qualidades necessárias para colocá-lo em uma posição de destaque no desenvolvimento de uma cadeia de reciclagem competitiva. A coordenação entre a regulamentação e inovação são essenciais para transformar esse potencial teórico em realidade colocando o Brasil em uma posição de destaque no setor.

5.5.1 Inserção do Brasil na cadeia global de reciclagem

Com a consolidação dos polos regionais de reciclagem, o Brasil pode ser inserido na cadeia global de suprimentos como produtor de materiais críticos (Rezaei *et al.*, 2025). Ao desenvolver a sua própria capacidade tecnológica, o Brasil deixa de depender tanto de mercados externos, além de atrair investimentos estrangeiros, ele pode se tornar um fornecedor regional de materiais reciclados, se tornando referência na economia circular latino-americana (Cabral-Neto *et al.*, 2023).

5.5.2 Inovação e desenvolvimento tecnológico nacional

Para o Brasil garantir a sua autonomia tecnológica, é fundamental ele investir em centros de P&D focados em reciclagem direta, processos hidrometalúrgicos de baixo impacto e reuso em aplicações de “segunda vida” (Zanoletti, 2024; Premathilake *et al.*, 2025). Devem ser criados programas nacionais de desenvolvimento tecnológico que integrem as universidades, os institutos de pesquisa e a indústria, estes programas podem acelerar a nacionalização de tecnologias e a formação de capital humano especializado.

5.5.3 Potenciais econômicos e competitividade

O setor tem a capacidade de movimentar cerca de 6 bilhões de reais por ano até 2035, gerando milhares de empregos qualificados em toda a cadeia produtiva (Cabral-Neto *et al.*, 2023; CSIRO, 2024). O crescimento da infraestrutura e dos

incentivos econômicos aumentam a atratividade de capital para o setor, promovendo a geração de empregos, a competitividade industrial e a inovação contínua.

5.5.4 Integração com iniciativas globais e visão de longo prazo

O modelo proposto está alinhado aos ODS da ONU, sendo os principais energia limpa, inovação, consumo responsável e ação climática. A cooperação entre iniciativas internacionais como a *Global Battery Alliance* expande o acesso a novas tecnologias e práticas regulatórias, isto coloca o Brasil numa posição de referência no setor energético verde.

5.5.5 Síntese das perspectivas estratégicas

As perspectivas apresentadas neste trabalho mostram que o Brasil possui condições estruturais, científicas e econômicas capazes de consolidar uma cadeia de reciclagem bastante robusta. O Brasil pode transformar a reciclagem de baterias em um dos principais eixos na transição energética nacional, tornando o país mais competitivo na transição energética e na economia verde.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar os modelos internacionais de reciclagem de baterias de veículos elétricos e através desta análise propor um modelo conceitual de reciclagem para o Brasil, o modelo considera os aspectos técnicos relacionados a regulamentação, a tecnológica, a econômica e o socioambiental.

A revisão e comparação dos modelos internacionais identificou que o Brasil possui potencial técnico, industrial e científico para desenvolver sua própria cadeia nacional de reciclagem, a revisão também identificou que o país enfrenta limitações regulatórias, institucionais e operacionais.

O modelo proposto foi estruturado em quatro camadas funcionais, os objetivos do modelo se mostraram de acordo com às tendências globais de economia circular e às metas de descarbonização, o seu roteiro de implementação foi adaptado para a realidade brasileira.

O levantamento de dados apresenta as taxas de reintrodução de materiais críticos na cadeia produtiva, as taxas de recuperação chegam a 85% e a redução das emissões chegam a 60% quando utilizadas rotas de reciclagem eficientes.

No campo científico, este trabalho contribui propondo uma estrutura analítica para países emergentes em desenvolvimento, envolvendo conceitos de engenharia de processos, políticas públicas e gestão ambiental sob a mesma lógica de circularidade.

No campo prático, este trabalho fornece diretrizes aplicáveis em políticas públicas, planejamento industrial, formação profissional e criação de polos regionais de reciclagem, as diretrizes fornecidas são essenciais na consolidação do ecossistema nacional, além de auxiliarem na inovação e na economia circular verde.

A análise evidenciou que, apesar das limitações, o Brasil possui as condições mínimas necessárias para implementar o sistema de reciclagem de forma consistente. A consolidação do sistema dependerá de coordenação institucional, investimentos contínuos em P&D e incentivos econômicos.

Por fim, reafirma-se que a reciclagem de baterias de íon-lítio não é apenas uma solução ambiental, ela também deve ser considerada um instrumento na consolidação da autonomia tecnológica nacional, fortalecendo a indústria nacional e ajudando o Brasil a se tornar uma economia de baixo carbono.

A implementação progressiva do modelo proposto pode posicionar o Brasil como uma referência internacional na reciclagem de baterias de veículos elétricos, transformando os atuais desafios em oportunidades para inovação e desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Armazenamento de energia e baterias. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

ANTONY JOSE, S. et al. (2024). Recent Advancements in Artificial Intelligence in Battery Recycling. *Batteries*, v. 10, n. 12, 440. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/387013263_Recent_Advancements_in_Artificial_Intelligence_in_Battery_Recycling. Acesso em: 08 dez. 2025.

BATTERY energy storage system with second life EV batteries. (2023). IET Conference Proceedings. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/icp.2023.0455>. Acesso em: 08 dez. 2025.

BISWAL, B. K. et al. (2024). Recycling of spent lithium-ion batteries for a sustainable future: recent advancements. *Chemical Society Reviews*. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/de/content/articlelanding/2024/cs/d3cs00898c>. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

CAS INSIGHTS. (2025). Lithium-ion Battery Recycling Market and Innovation Trends for A Green Future. Disponível em: <https://web.cas.org/marketing/pdf/INSGENENGBRO102412-CAS-Insights-Lithium-Ion-Full-Report-Digital.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2025.

CASTRO, R. H. de et al. (2024). Design of Recycling Processes for NCA-Type Li-Ion Batteries from Electric Vehicles toward the Circular Economy. *Energy & Fuels*, v. 38, n. 6, p. 5545-5557. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.3c04904>. Acesso em: 08 dez. 2025.

CIRCULAR economy approaches for battery materials — review. (2024). *Energy Reports*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724008588>. Acesso em: 08 dez. 2025.

CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA). Baterias de Íons de Lítio: Estado da Arte e Perspectivas Futuras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2024. Anais... SBA, 2024. Disponível em: https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper_8451.pdf. Acesso em: 08 dez. 2025.

CSIRO. (2024). Lithium-ion battery recycling — From minerals to materials. Austrália: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2024. Disponível em: https://www.csiro.au/-/media/Science-Connect/Futures/Minerals-to-materials/CMRDD_Battery-Recycling_FINAL.pdf. Acesso em: 08 dez. 2025.

CUI, Jiaying et al. (2023). Environmental Benefit Assessment of Second-Life Use of Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries in Multiple Scenarios Considering Performance Degradation and Economic Value. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 23, p. 8559-8567. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.3c00506>. Acesso em: 08 dez. 2025.

DOBIES, José Victor Costa. Sistema de monitoramento de baterias íon-lítio. 2022. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/8d414b76-173c-4213-aaac-d330fcae6eba/content>. Acesso em: 08 dez. 2025.

EPA. (2023). Lithium Battery Recycling Regulatory Status and Frequently Asked Questions. Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 2023. Disponível em: <https://rcrapublic.epa.gov/files/14957.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2025.

EUROPE set to miss potential for battery material recycling. (2024). Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/world/europe/europe-set-miss-potential-battery-material-recycling-2024-12-11/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance). Bruxelas: Official Journal of the European Union, 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>. Acesso em: 08 dez. 2025.

FURLANETTO, J. et al. (2025). An Overview of Lithium-Ion Battery Recycling: A Comparison of Brazilian and International Scenarios. World Electric Vehicle Journal, v. 16, n. 7, 371. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/7/371>. Acesso em: 08 dez. 2025.

GUANMA MACHINERY. Is hydrometallurgy and pyrometallurgy for battery recycling? [S.l.]: Guanma Machinery, [s.d.]. Disponível em: <https://www.guanmamachinery.com/is-hydrometallurgy-and-pyrometallurgy-for-battery-recycling/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

ICRIER. (2025). Technology Roadmap for EV Battery Recycling: Ensuring Circularity of EV Battery Supply Chain. New Delhi: Indian Council for Research on International Economic Relations, 2025. Disponível em: <https://icrier.org/pdf/EV-Battery-Recycling.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2025.

IEA. (2024). Global EV Outlook 2024: Key findings on EV growth and battery demand. International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 08 dez. 2025.

IQBAL, H. et al. (2023). A survey of second-life batteries based on techno-economic perspective and applications-based analysis. [Journal or source not specified in link].

Disponível em:

https://www.research.ed.ac.uk/files/343941025/s43979_023_00049_5.pdf. Acesso em: 08 dez. 2025.

JICC. Métodos alternativos de pré-tratamento das baterias de íon-lítio descartadas.

In: JICC, 24., 2022. Anais... 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cti/pt-br/publicacoes/producao-cientifica/jicc/xxiv-jicc-2022/pdf/jicc-2022-paper-7.pdf>.

Acesso em: 08 dez. 2025.

KAY, I. et al. (2022). Robotic Disassembly of Electric Vehicles' Battery Modules for Recycling. *Energies*, v. 15, n. 13, 4856. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4856>. Acesso em: 08 dez. 2025.

KRAEMER, R. A. S. et al. (2023). Regulatory Challenges in the Electromobility Sector: An Analysis of Electric Buses in Brazil. *Energies*, v. 16, n. 8, 3510. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3510>. Acesso em: 08 dez. 2025.

LI-CYCLE / REDWOOD / DOE initiatives — industry case studies. (2023). AP News.

Disponível em: <https://apnews.com/article/d68bfa6e7bf1586ded72229df29692b9>.

Acesso em: 08 dez. 2025.

POLICY recommendations and roadmap for EV battery recycling. (2025).

Sustainable lithium-ion battery recycling: A review on technologies, regulatory approaches and future trends. *Energy Reports*, v. 13, supl. C, p. 789-812. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724008588>. Acesso em: 08 dez. 2025.

PREMATHILAKE, D. S. et al. (2025). Advancing hydrometallurgical recycling of spent lithium-ion batteries: an AI-based readiness and sustainability assessment. *RSC Sustainability*, v. 3, p. 4975-4991. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/su/d5su00417a>. Acesso em: 08 dez. 2025.

PREMATHILAKE, Gihan. (2023). Progress and prospect on the recycling of spent lithium-ion batteries: Ending is beginning. [Journal não especificado no DOI original; possivelmente Carbon Neutrality ou similar]. DOI: 10.1002/cnl2.31. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cnl2.31>. Acesso em: 08 dez. 2025.

PROCESSOS de reciclagem de pilhas e baterias: uma revisão. (2022). Processos de reciclagem de pilhas e baterias: uma revisão dos principais métodos. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 3, p. 17469-17484. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/45015>. Acesso em: 08 dez. 2025.

PROPOSED route for recycling lithium-ion batteries in Brazil. (2021). Proposed route for recycling lithium-ion batteries in Brazil. In: *Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles*. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Proposed-route-for-recycling-lithium-ion-batteries-in-Brazil-Adapted-from-33_fig9_359384334. Acesso em: 08 dez. 2025.

RECICLAGEM de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas. (2024). Reciclagem de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378017284_Reciclagem_de_baterias_de_ion-litio_uma_breve_revisao_sobre_os_processos_avancos_e_perspectivas. Acesso em: 08 dez. 2025.

REZAEI, M. et al. (2025). A review of lithium-ion battery recycling for enabling a circular economy. *Journal of Power Sources*, v. 630, 236157. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775324021104>. Acesso em: 08 dez. 2025.

SANTANA, Ívina Langsdorff. Reciclagem do eletrodo positivo de baterias de íon-Li exauridas utilizando ácido cítrico como lixiviador e precursor na formação de eletroquímica de $\text{Co}(\text{OH})_2/\text{Co}_3\text{O}_4/\text{LiCoO}_2$ e química de $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{LiCoO}_2$ e LiCoO_2 . 2021. 93 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Disponível em:

https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_9760_DISSERTAC%20A%20O_Ivina_versa%20o_final%20%281%29.pdf. Acesso em: 08 dez. 2025.

SECOND-LIFE Batteries: A Review on Power Grid Applications. (2023). Second-Life Batteries: A Review on Power Grid Applications, Degradation Mechanisms, and Power Electronics Interface Architectures. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/375958188_Second-Life_Batteries_A_Review_on_Power_Grid_Applications_Degradation_Mechanisms_and_Power_Electronics_Interface_Architectures. Acesso em: 08 dez. 2025.

SECOND life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives. (2021). Second life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives for high-performance lithium-ion batteries. *Science Advances*, v. 7, n. 45, eabi7633. Disponível em:

<https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abi7633>. Acesso em: 08 dez. 2025.

SUSTAINABLE Recycling of Spent Li-Ion Batteries and Iron Ore Tailings for Cobalt Ferrite Synthesis. (2025). Sustainable Recycling of Spent Li-Ion Batteries and Iron Ore Tailings for Cobalt Ferrite Synthesis and Its Dual Applications as a Photocatalyst in Solar Photo-Fenton Process and an Electrochemical Sensor. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 36, n. 2, e-20240137, p. 1-17. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/W4S7vDrmgXHM3nR9S5yCsWQ/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

TARPEH, W. et al. (2025). Recycling lithium-ion batteries delivers significant environmental benefits. *Stanford News*. Disponível em:

<https://news.stanford.edu/stories/2025/01/recycling-lithium-ion-batteries-cuts-emissions-and-strengthens-supply-chain>. Acesso em: 08 dez. 2025.

TONG, Ziwei et al. (2025). Advances in lithium-ion battery recycling: Strategies, pathways, and technologies. *ChemPhysMater*, v. 4, n. 1, p. 30-47. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772571524000317>. Acesso em: 08 dez. 2025.

TOWARDS Reuse and Recycling of Lithium-ion Batteries: Tele-robotics for Disassembly of EV Batteries. (2023). Towards reuse and recycling of lithium-ion batteries: tele-robotics for disassembly of electric vehicle batteries. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2304.01065>. Acesso em: 08 dez. 2025.

TREATMENT and recycling of spent lithium-based batteries: a review. (2023). Treatment and recycling of spent lithium-based batteries: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 26, p. 76-95. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-023-01842-1>. Acesso em: 08 dez. 2025.

ULTRASONIC identification technique in recycling of lithium ion batteries. (2020). Ultrasonic identification technique in recycling of lithium ion batteries. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2001.09942>. Acesso em: 08 dez. 2025.

WANG, H. et al. (2023). ABatRe-Sim: A Comprehensive Framework for Automated Battery Recycling Simulation. arXiv preprint arXiv:2303.07617. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2303.07617>. Acesso em: 08 dez. 2025.

WANG, Xiao-Tong et al. (2022). Prospects for managing end-of-life lithium-ion batteries: Present and future. *Interdisciplinary Materials*, v. 1, n. 5, p. 417-433. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/idm2.12041>. Acesso em: 08 dez. 2025.

YUAN, M.; BURMAN, A.; ZOU, C. (2025). Robust Model Predictive Control of Fast Lithium-ion Battery Pretreatment for Safe Recycling. arXiv preprint arXiv:2503.11857. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2503.11857>. Acesso em: 08 dez. 2025.

ZANOLETTI, A. (2024). A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues. *Batteries*, v. 10, n. 1, 38. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/38>. Acesso em: 08 dez. 2025.

ZHAO, Y. et al. (2024). BatSort: Enhanced Battery Classification with Transfer Learning for Battery Sorting and Recycling. arXiv preprint arXiv:2404.05802. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2404.05802>. Acesso em: 08 dez. 2025.

APÊNDICES

Elemento opcional. Colocado após o glossário e constituído de informações elaboradas pelo autor do trabalho, não incluídas no texto. Os apêndices são identificados por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelos respectivos títulos.

ANEXOS

RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO NO BRASIL: DESAFIOS E PROPOSTAS PARA A SUSTENTABILIDADE

Igor Tebaldi Miranda da Silva e Sabrina Neves da Silva
Universidade Federal do Pampa

Resumo

Este estudo aborda a reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil, com foco nos desafios ambientais, econômicos e técnicos da implementação de políticas públicas eficazes. A pesquisa comparou modelos internacionais de reciclagem, como os adotados pela União Europeia, China e Estados Unidos, propondo um modelo adaptado à realidade brasileira. A metodologia incluiu análise documental e revisão de literatura, além de uma análise comparativa entre os modelos de reciclagem. Os resultados sugerem que o Brasil necessita de um marco regulatório específico e incentivos econômicos para criar uma infraestrutura de reciclagem eficiente e sustentável.

Palavras-chave: baterias de íon-lítio, reciclagem, sustentabilidade, Brasil, políticas públicas.

Abstract:

This study addresses the recycling of lithium-ion batteries in Brazil, focusing on the environmental, economic, and technical challenges of implementing effective public policies. The research compares international recycling models, such as those adopted by the European Union, China, and the United States, proposing a model adapted to the Brazilian reality. The methodology included documentary analysis and a literature review, as well as a comparative analysis of recycling models. The results suggest that Brazil needs a specific regulatory framework and economic incentives to create an efficient and sustainable recycling infrastructure.

Keywords: lithium-ion batteries, recycling, sustainability, Brazil, public policies.

1. Introdução

A crescente adoção de veículos elétricos (VEs) no mundo é uma estratégia essencial para mitigar a dependência de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Este movimento é impulsionado pelo avanço das tecnologias de baterias, especialmente as de íon-lítio, que são a principal fonte de armazenamento de energia nesses veículos (IEA, 2024). No entanto, a utilização massiva dessas baterias gera um grande desafio: o descarte e a reciclagem desses materiais, especialmente no Brasil.

A falta de uma infraestrutura de reciclagem adequada no Brasil pode resultar em impactos ambientais graves, como a contaminação do solo e lençóis freáticos devido ao descarte inadequado de baterias (Biswal et al., 2024). Este artigo visa analisar a situação da reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil, comparar com modelos internacionais e propor um modelo adaptado ao contexto brasileiro.

2. Revisão da Literatura

2.1 A Mobilidade Elétrica e o Desafio das Baterias

O número de veículos elétricos em circulação no mundo tem aumentado rapidamente, com mais de 40 milhões de unidades em 2024, refletindo um aumento

de 35% em relação a 2022 (IEA, 2024). As baterias de íon-lítio são essenciais para essa transição energética devido à sua alta densidade energética e longa vida útil (Zanoletti, 2024).

2.2 Processos de Reciclagem de Baterias de Íon-lítio

A reciclagem das baterias de íon-lítio pode ser realizada por três principais processos: pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta. A pirometalurgia envolve altas temperaturas para fundir os materiais, mas é energeticamente ineficiente e perde parte do lítio. A hidrometalurgia utiliza processos químicos para extrair metais de maneira mais eficiente, embora gere resíduos tóxicos. Já a reciclagem direta aproveita os materiais sem decomposição completa, sendo a mais sustentável, mas ainda precisa de ajustes tecnológicos (Premathilake et al., 2025).

2.3 Modelos Internacionais de Reciclagem

A União Europeia, a China e os Estados Unidos têm adotado políticas específicas para promover a reciclagem de baterias de íon-lítio. A União Europeia se destaca pelo seu marco regulatório, que exige metas de reciclagem e rastreabilidade digital das baterias (Comissão Europeia, 2023). A China, por sua vez, possui a maior capacidade de reciclagem industrial, com um modelo centralizado que integra governo, fabricantes e recicladores (Rezaei et al., 2025). Nos Estados Unidos, o foco está na inovação tecnológica, com incentivos à pesquisa e desenvolvimento de novas soluções para a reciclagem (Wang et al., 2023).

3. Metodologia

A metodologia deste estudo foi estruturada para investigar os modelos de reciclagem de baterias de íon-lítio, focando especialmente no cenário brasileiro e em possíveis adaptações aos modelos internacionais. A pesquisa foi dividida em três eixos principais: análise comparativa, revisão de literatura e análise normativa. A seguir, os detalhes dos métodos adotados:

A pesquisa foi realizada de forma exploratória e descritiva, com base em uma análise qualitativa. A abordagem exploratória foi escolhida por ser um tema emergente no Brasil, com poucas referências diretas sobre a reciclagem de baterias de íon-lítio no contexto nacional. Já a abordagem descritiva teve como objetivo caracterizar e sistematizar informações existentes sobre a reciclagem de baterias, arranjos regulatórios e os desafios do mercado brasileiro.

Exploratória: A pesquisa buscou explorar a situação atual da reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil, identificando as variáveis mais relevantes e as melhores práticas adotadas em outros países.

Descritiva: Foi feita uma descrição dos modelos de reciclagem aplicados internacionalmente, com foco em como essas práticas podem ser implementadas no Brasil. Isso incluiu a análise de políticas públicas, infraestrutura de reciclagem e processos industriais.

Este estudo possui algumas limitações, principalmente em relação à disponibilidade de dados específicos sobre a reciclagem de baterias no Brasil. A falta de uma legislação clara e de dados concretos dificultou a realização de uma análise mais aprofundada sobre a situação atual. Além disso, a pesquisa se baseou principalmente em fontes secundárias, o que limita a precisão dos dados em alguns

casos. Para melhor demonstrar a metodologia, foram construídos mapas mentais mostrados na Figura 1a-e.

Figura 1 – Etapas da metodologia da pesquisa (a) estrutura e eixos (b) abordagens exploratória e qualitativa (c) abordagem descritiva (d) objetivos do estudo e (e) limitações do estudo.





Fonte: Autores (2025).

Salienta-se que para a construção dos mapas mentais, utilizou-se como ferramenta de apoio o NotebookLM (Google). A metodologia da pesquisa foi inserida na plataforma, que auxiliou na análise exploratória do texto, na identificação dos conceitos-chave e no mapeamento das inter-relações temáticas. As estruturas conceituais geradas pela ferramenta serviram de base para a elaboração visual final dos mapas mentais.

4. Resultados e Discussão

O Brasil tem avançado na adoção de veículos elétricos, com um crescimento de 60% nas vendas de VEs entre 2022 e 2024, totalizando 200 mil unidades (ABVE, 2024). No entanto, o país ainda não possui uma infraestrutura de reciclagem estruturada para lidar com os resíduos gerados. A legislação brasileira não estabelece

diretrizes específicas para o tratamento das baterias de veículos elétricos, o que compromete a eficiência do processo de reciclagem (Brasil, 2010).

A análise dos modelos internacionais sugere que o Brasil poderia adotar uma combinação das melhores práticas observadas. Um modelo regulatório, inspirado na União Europeia, que estabeleça metas obrigatórias de reciclagem e rastreabilidade das baterias, seria fundamental. Além disso, o Brasil poderia criar polos regionais de reciclagem, com o apoio do governo e da iniciativa privada, como visto na China, para garantir a viabilidade econômica e a escala do processo. Por fim, o investimento em pesquisa e inovação tecnológica, semelhante ao modelo dos Estados Unidos, é essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem e reaproveitamento de materiais.

5. Conclusões

O estudo mostrou que a reciclagem de baterias de íon-lítio no Brasil enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à falta de um marco regulatório específico e à infraestrutura de reciclagem. A proposta de um modelo adaptado, com base nas melhores práticas internacionais, é fundamental para que o Brasil avance na criação de um sistema de reciclagem sustentável e eficiente. A implementação de políticas públicas que incentivem a reciclagem e a economia circular, bem como a adoção de novas tecnologias, são passos essenciais para garantir a sustentabilidade do setor de mobilidade elétrica no país.

Referências

- Biswal, A., et al. (2024). *A Review of Lithium-Ion Battery Recycling*. Journal of Energy Storage.
- Cabral-Neto, J., et al. (2023). *Batteries in the Electric Vehicle Era: Challenges and Opportunities*. Journal of Cleaner Production.
- European Commission. (2023). *EU Battery Regulation*. European Union.
- IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024*. International Energy Agency.
- Premathilake, G., et al. (2025). *Recycling of Lithium-Ion Batteries: Methods and Sustainability*. Journal of Sustainable Materials.
- Rezaei, A., et al. (2025). *Global Trends in Lithium-Ion Battery Recycling*. Energy Policy.
- Wang, X., et al. (2023). *Prospects for Managing End-of-Life Lithium-Ion Batteries*. Interdisciplinary Materials.
- Zhao, Z., et al. (2024). *Technological Innovations in Lithium-Ion Battery Recycling*. Journal of Environmental Management.