

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM DIREITO
AMBIENTAL**

NUBIA DE SOUZA ONETI LIMA

**ELETROMOBILIDADE E RESPONSABILIDADE AMBIENTAL: Logística Reversa
das Baterias de Lítio de Veículos Elétricos no Direito Ambiental Brasileiro**

Manaus
2026

NUBIA DE SOUZA ONETI LIMA

**ELETROMOBILIDADE E RESPONSABILIDADE AMBIENTAL: Logística Reversa
das Baterias de Lítio de Veículos Elétricos no Direito Ambiental Brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental da Universidade do Estado do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Direito Ambiental.

Linha de Pesquisa: Conservação dos Recursos Naturais e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Profa. Dra. Gláucia Maria de Araújo Ribeiro

Manaus
2026

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

| | |
|-------|---|
| L732c | <p>Lima, Nubia de Souza Oneti</p> <p>Eletromobilidade e responsabilidade ambiental: logística reversa das baterias de lítio de veículos elétricos no direito ambiental brasileiro / Nubia de Souza Oneti Lima. Manaus : [s.n], 2026.</p> <p>106 f.: color.; 21.0 cm.</p> <p>Dissertação - Mestrado em Direito Ambiental- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2026.</p> <p>Orientador: Ribeiro, Gláucia Maria de Araújo.</p> <p>1. Direito ambiental. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Logística reversa. 4. Baterias de veículos elétricos. 5. Eletromobilidade. I. Ribeiro, Gláucia Maria de Araújo (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título</p> <p>CDU(1997)349.6(043.3)</p> |
|-------|---|

NUBIA DE SOUZA ONETI LIMA


ELETROMOBILIDADE E RESPONSABILIDADE AMBIENTAL:
LOGÍSTICA REVERSA DAS BATERIAS DE LÍTIO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
NO DIREITO AMBIENTAL BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental da Universidade do Estado do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Direito Ambiental.


Orientadora: Profa. Dra. Glauca Maria de Araújo Ribeiro

Manaus, 08 de abril de 2026.

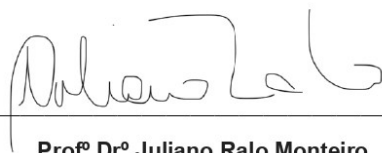
Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 GLAUCIA MARIA DE ARAUJO RIBEIRO
Data: 20/05/2026 14:25:10-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª Drª Glauca Maria de Araújo Ribeiro
Universidade do Estado do Amazonas

Documento assinado digitalmente
 VANIA MARIA DO PERPETUO SOCORRO MARQU
Data: 26/05/2026 18:44:25-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª Drª Vânia Maria do Perpétuo Socorro Marques Marinho
Universidade do Estado do Amazonas



Profº Drº Juliano Ralo Monteiro
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sustentar meus passos nos momentos de incerteza e por conceder força, serenidade e perseverança ao longo de minha caminhada acadêmica, tornando possível a concretização deste sonho.

À Profa. Dra. Glaucia Maria de Araújo Ribeiro, minha orientadora, pela confiança, paciência e generosidade intelectual durante todo o percurso desta pesquisa. Sua orientação cuidadosa e suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental da Universidade do Estado do Amazonas, pela oportunidade de formação acadêmica e pelo ambiente de reflexão crítica essencial à construção desta pesquisa.

Aos professores do programa, pelos ensinamentos compartilhados e pelo incentivo constante à pesquisa científica comprometida com a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Ao meu marido e aos meus filhos, que são meu alicerce diário, agradeço pelo amor, pela compreensão diante das ausências necessárias e pelo apoio constante durante toda esta jornada. Cada página escrita carrega também a força que encontro em nossa família.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta caminhada, reafirmando o compromisso desta pesquisa com a construção de um futuro ambientalmente mais justo e sustentável para as presentes e futuras gerações.

A crise ambiental é, antes de tudo, uma crise do conhecimento.

Enrique Leff

RESUMO

Este trabalho analisa os fundamentos do Direito Ambiental e a relação entre desenvolvimento sustentável, governança climática e a logística reversa das baterias de íon-lítio de veículos elétricos. Parte-se da constatação de que, embora a eletromobilidade contribua para a redução das emissões no setor de transportes, as baterias possuem ciclo de vida limitado e geram impactos ambientais nas etapas de produção e pós-consumo. O objetivo consiste em examinar se o ordenamento jurídico brasileiro, especialmente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), oferece instrumentos adequados para a gestão ambiental dessas baterias ao final de sua vida útil. Adota-se abordagem qualitativa, de natureza jurídico-dogmática, baseada em pesquisa bibliográfica e normativa. Os resultados indicam lacuna regulatória quanto à logística reversa, evidenciando a necessidade de aprimoramento dos instrumentos jurídicos voltados à prevenção de danos ambientais e à responsabilização ao longo do ciclo de vida desses produtos.

Palavras-chave: Direito Ambiental. Desenvolvimento Sustentável. Logística Reversa. Baterias de Veículos Elétricos.

ABSTRACT

This study analyzes the foundations of Environmental Law and the relationship between sustainable development, climate governance, and the reverse logistics of lithium-ion batteries used in electric vehicles. It is based on the premise that, although electromobility contributes to reducing emissions in the transport sector, batteries have a limited life cycle and generate environmental impacts during production and post-consumption stages. The research aims to examine whether the Brazilian legal framework, particularly the National Solid Waste Policy (Law No. 12,305/2010), provides adequate instruments for the environmentally sound management of these batteries at the end of their useful life. A qualitative juridical-dogmatic approach was adopted, based on bibliographic and normative research. The findings indicate a regulatory gap regarding reverse logistics, highlighting the need to improve legal instruments aimed at preventing environmental damage and ensuring responsibility throughout the product life cycle.

Keywords: Environmental Law. Sustainable Development. Reverse Logistics. Electric Vehicle Batteries.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | Protótipo do primeiro carro elétrico desenvolvido por Thomas Davenport no século XIX, operando por meio de motor elétrico sobre trilhos..... | 44 |
| Figura 2 | Ciclo de vida estendido das baterias de veículos elétricos..... | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABVE | Associação Brasileira do Veículo Elétrico |
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| Aida | Associação Interamericana para a Defesa do Ambiente |
| ANM | Agência Nacional de Mineração |
| APP | Área de Preservação Permanente |
| Basf | Badische Anilin- und Soda-Fabrik |
| B2B | Bateria para Bateria |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| BVE | Bateria de Veículo Elétrico |
| BYD | Build Your Dreams |
| CATL | Contemporary Ampere Technology Co. Limited |
| CH₄ | Metano |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| Conama | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| Conmetro | Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| CRFB/1988 | Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 |
| DPM | Marca Direta de Peça |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| EV | Electric Vehicle (Veículo Elétrico) |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| HDR | High Dynamic Range |
| HEV | Veículo Elétrico Híbrido |
| HFCs | Hidrofluorcarbonos |
| IA | Inteligência Artificial |

| | |
|---------------------------|--|
| Ibama | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| ICMBio | Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade |
| IEA | International Energy Agency |
| Inmetro | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| Ipaam | Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LiFePO₄ | Fosfato de Ferro-Lítio |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| MG | Minas Gerais |
| MHEV | Veículo Elétrico Micro-Híbridos |
| MPF | Ministério Público Federal |
| N₂O | Óxido Nitroso |
| NMC | Níquel Manganês Cobalto |
| NTSB | National Transportation Safety Board |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| OIT | Organização Internacional do Trabalho |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBACV | Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida |
| PERS/AM | Política Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas |
| PFCs | Perfluorcarbonos |
| PHEV | Veículo Híbrido Plug-In |
| PIM | Polo Industrial de Manaus |
| PL | Projeto de Lei |
| PNMA | Política Nacional do Meio Ambiente |
| PNMU | Política Nacional de Mobilidade Urbana |

- PNRS** Política Nacional de Resíduos Sólidos
- PNUMA** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
- RL** Reserva Legal
- SBCE** Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
- SF₆** Hexafluoreto de Enxofre
- Sisnama** Sistema Nacional do Meio Ambiente
- STJ** Superior Tribunal de Justiça
- Suframa** Superintendência da Zona Franca de Manaus
- TOA** Topo da Atmosfera
- UEA** Universidade do Estado do Amazonas
- ZFM** Zona Franca de Manaus

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1 DIREITO AMBIENTAL E A ERA DA SUSTENTABILIDADE TECNOLÓGICA: CONEXÕES COM A AGENDA 2030..... | 18 |
| 1.1 Conceito Jurídico de Meio Ambiente..... | 18 |
| 1.2 O Direito Ambiental e sua Autonomia..... | 19 |
| 1.3 Direito Ambiental Internacional e os Marcos Globais..... | 21 |
| 1.3.1 A Conferência de Estocolmo e a Formação do Direito Ambiental Internacional.. | 21 |
| 1.3.2 A Governança Ambiental Internacional e o Papel do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente na Consolidação do Direito Ambiental..... | 22 |
| 1.3.3 A Construção do Conceito de Sustentabilidade: Do Relatório Brundtland às Perspectivas Críticas..... | 23 |
| 1.3.4 Rio-92 e a Governança Ambiental Global..... | 24 |
| 1.3.5 Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono..... | 25 |
| 1.3.6 Acordo de Paris e a Meta de 1,5 °C..... | 26 |
| 1.4 Fundamentos do Direito Ambiental Brasileiro..... | 27 |
| 1.4.1 A Constitucionalização da Proteção Ambiental: do Reconhecimento Normativo à Efetividade Jurídica..... | 27 |
| 1.4.2 A Política Nacional do Meio Ambiente e a Consolidação da Gestão Ambiental no Brasil..... | 28 |
| 1.4.3 Estrutura Institucional do Sistema Nacional do Meio Ambiente..... | 30 |
| 1.5 A Convergência entre Direito Ambiental e Desenvolvimento..... | 31 |
| 1.6 Retrocesso Ambiental e Impactos na Sustentabilidade..... | 33 |
| 1.6.1 Logística Reversa como Instrumento da Sustentabilidade no Setor Tecnológico. | 34 |
| 1.6.2 Logística Reversa de Baterias de Lítio no Brasil: Desafios Regulatórios na Eletromobilidade..... | 34 |
| 1.7 A Evolução do Conceito de Desenvolvimento: do Crescimento Econômico à Sustentabilidade..... | 35 |
| 1.7.1 A Ecologização da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988: Princípios e Sustentabilidade..... | 36 |
| 1.7.2 Dimensões do Desenvolvimento Sustentável: Ambiental, Econômica e Social.. | 38 |
| 1.7.3 A Agenda 2030 e a Consolidação de um Paradigma Global de Sustentabilidade.. | 39 |
| 1.7.4 O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 e a Gestão de Resíduos..... | 40 |
| 2 ELETROMOBILIDADE SUSTENTÁVEL E O MARCO LEGAL DA LOGÍSTICA REVERSA: ENTRE A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A RESPONSABILIDADE AMBIENTAL..... | 43 |
| 2.1 Evolução Histórica da Mobilidade Elétrica e sua Reconfiguração no Contexto Climático..... | 43 |
| 2.2 Veículos Elétricos como Resposta à Crise Climática..... | 45 |
| 2.2.1 A Intensificação do Efeito Estufa e a Elevação das Temperaturas Globais..... | 46 |
| 2.2.2 Acordos Internacionais sobre Clima: Protocolo de Quioto..... | 46 |
| 2.2.3 O Papel do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa..... | 47 |
| 2.2.4 A Descarbonização da Indústria Automotiva e a Matriz Energética Global e | 49 |

| | |
|---|-----------|
| Brasileira..... | |
| 2.2.5 Emissões de CO ₂ por Veículos a Combustão: Dados e Estatísticas..... | 50 |
| 2.3 A Eletromobilidade como Estratégia de Mitigação..... | 51 |
| 2.3.1 Evolução dos Veículos Elétricos..... | 51 |
| 2.3.2 Tipologias Tecnológicas dos Veículos Elétricos..... | 52 |
| 2.4 A Mineração de Lítio e seus Impactos Jurídicos, Geopolíticos e Ambientais: Desafios para a Sustentabilidade e a Responsabilidade Socioambiental..... | 53 |
| 2.4.1 Geopolítica do Lítio..... | 53 |
| 2.4.2 O Lítio como Mineral Estratégico na Transição Energética..... | 55 |
| 2.4.3 Externalidades Negativas da Mineração de Lítio..... | 56 |
| 2.4.4 Impactos Socioambientais da Exploração do Lítio..... | 57 |
| 2.4.5 Aplicação do Princípio do Poluidor-Pagador na Exploração do Lítio no Brasil.... | 57 |
| 2.4.6 A Recomendação nº 30/2025 do Ministério Público Federal de Minas Gerais e a Aplicação Prática dos Princípios Ambientais na Mineração de Lítio..... | 58 |
| 2.4.7 Controle Judicial da Atividade Minerária: Análise de Caso Concreto..... | 59 |
| 2.5 Classificação das Baterias de Veículos Elétricos como Resíduos Perigosos no Ordenamento Jurídico Brasileiro..... | 60 |
| 2.5.1 Estrutura, Funcionamento e Características das Baterias de Íons de Lítio em Veículos Elétricos..... | 60 |
| 2.5.2 Ciclo de Vida Útil das Baterias de Veículos Elétricos e Implicações para a Sustentabilidade..... | 61 |
| 2.5.3 A Cadeia Produtiva das Baterias de Veículos Elétricos sob a Incidência do Princípio do Poluidor-Pagador..... | 62 |
| 2.5.4 Evolução Tecnológica e Consolidação das Baterias de Íons de Lítio na Transição Energética..... | 63 |
| 2.5.5 Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção de Baterias de Veículos Elétricos..... | 64 |
| 2.5.6 Enquadramento Jurídico das Baterias de Veículos Elétricos como Resíduos Perigosos no Direito Brasileiro..... | 65 |
| 2.6 Engenharia Reversa como Paradigma na Gestão Sustentável das Baterias de Veículos Elétricos..... | 66 |
| 3 A LOGÍSTICA REVERSA DAS BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: DO LÍTIO EXTRAÍDO À RECICLAGEM COMO INSTRUMENTO DE ECONOMIA CIRCULAR..... | 68 |
| 3.1 A Bateria de Íon-Lítio como Elemento Estratégico da Transição Energética | 68 |
| 3.1.1 Crescimento do Mercado de Veículos Elétricos e Aumento do Passivo Tecnológico..... | 68 |
| 3.2 Panorama da Eletromobilidade e Crescimento do Setor de Baterias..... | 69 |
| 3.2.1 Dados Atualizados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2025-2026): Frota, Modelos e Vendas Nacionais..... | 69 |
| 3.2.2 Mercado de Veículos Elétricos e Responsabilidade na Política Nacional de Resíduos Sólidos..... | 70 |
| 3.2.3 Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada às Baterias de Veículos Elétricos..... | 71 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.2.4 | Avaliação do Ciclo de Vida de Baterias de Íon-Lítio em Uso Cascata: Mobilidade Elétrica e Reutilização Estacionária..... | 72 |
| 3.3 | Mineração e Cadeia de Suprimento do Lítio..... | 75 |
| 3.3.1 | Descaracterização de Minas, Prevenção de Passivos Ambientais e a Mineração de Rejeitos de Tântalo como Estratégia de Reaproveitamento..... | 75 |
| 3.4 | Produção Industrial e Composição Química das Baterias..... | 75 |
| 3.4.1 | Estrutura das Baterias Íon-Lítio..... | 75 |
| 3.4.2 | Impactos Ambientais da Cadeia Produtiva das Baterias de Íon-Lítio..... | 77 |
| 3.4.3 | Rastreabilidade e Passaporte Digital das Baterias como Instrumentos de Responsabilidade Ambiental..... | 78 |
| 3.4.4 | Omissão Normativa quanto ao Lítio na Agenda Regulatória da Agência Nacional de Mineração..... | 80 |
| 3.5 | Logística Reversa de Baterias de Veículos Elétricos..... | 80 |
| 3.5.1 | Aplicação da Logística Reversa às Baterias de Íon-Lítio dos Veículos Elétricos.. | 81 |
| 3.5.2 | Enquadramento Jurídico-Ambiental das Baterias de Íon-Lítio como Resíduos.... | 82 |
| 3.5.3 | Desafios Nacionais..... | 83 |
| 3.5.3.1 | <i>Infraestrutura Limitada de Reciclagem.....</i> | <i>83</i> |
| 3.5.3.2 | <i>Processos de Reciclagem das Baterias de Veículo Elétrico e Recuperação da Black Mass.....</i> | <i>84</i> |
| 3.6 | Projetos de Lei e Marco Regulatório da Reciclagem de Baterias..... | 85 |
| 3.6.1 | A Logística Reversa das Baterias de Veículos Elétricos no Projeto de Lei nº 2.327/2021..... | 85 |
| 3.6.1.1 | <i>Conteúdo Normativo do Projeto de Lei nº 2.327/2021.....</i> | <i>85</i> |
| 3.6.1.2 | <i>Elementos da Logística Reversa Extraídos do Texto do Projeto de Lei nº 2.327/2021.....</i> | <i>85</i> |
| 3.6.1.3 | <i>Análise da Justificativa do Projeto de Lei nº 2.327/2021.....</i> | <i>86</i> |
| 3.6.1.4 | <i>Limites Normativos do Projeto de Lei nº 2.327/2021.....</i> | <i>86</i> |
| 3.7 | O Projeto de Lei nº 2.132/2025 e a Circularidade das Baterias de Veículos Elétricos..... | 87 |
| 3.7.1 | Conteúdo Normativo do Projeto de Lei nº 2.132/2025..... | 87 |
| 3.7.2 | Elementos da Circularidade das Baterias Extraídos do Texto Legal..... | 87 |
| 3.7.3 | Objetivos e Princípios da Política Nacional de Circularidade das Baterias..... | 88 |
| 3.7.4 | Instrumentos e Estrutura Institucional da Política de Circularidade das Baterias.. | 88 |
| 3.7.5 | Rastreabilidade e Passaporte de Bateria..... | 88 |
| 3.7.6 | Análise da Justificação do Projeto de Lei nº 2.132/2025..... | 89 |
| 3.8 | Governança Institucional e Iniciativas no Amazonas..... | 90 |
| 3.8.1 | A Fábrica da BYD em Manaus e a Produção de baterias de Ferro-Lítio..... | 90 |
| 3.8.2 | O Papel da Suframa na Industrialização e Logística Sustentável..... | 91 |
| 3.9 | Estrutura Normativa Estadual..... | 91 |
| 3.9.1 | Vigência das Normas Estaduais e Enquadramento Jurídico da Logística Reversa no Estado do Amazonas..... | 91 |
| | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 94 |
| | REFERÊNCIAS..... | 96 |

INTRODUÇÃO

A presente pesquisa propõe uma análise crítica da integração entre o Direito Ambiental, o desenvolvimento sustentável e os instrumentos de políticas públicas voltados à gestão de resíduos perigosos, com destaque para a logística reversa aplicada às baterias de lítio de veículos elétricos. No contexto contemporâneo da transição energética, examina-se o papel da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, da Organização das Nações Unidas (ONU), como diretriz global para a consolidação de práticas sustentáveis, especialmente no que se refere às metas 12.4 e 12.5, voltadas à gestão ambientalmente adequada dos resíduos e à redução de sua geração por meio da reciclagem e do reuso.

O estudo abrange os principais marcos históricos e normativos que fundamentam o Direito Ambiental moderno, incluindo a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (CRFB/1988), a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (Lei nº 6.938/1981) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010). Contudo, evidencia-se a ausência de regulamentação específica, no âmbito da PNRS, para as baterias de lítio utilizadas em veículos elétricos, configurando lacuna normativa com repercussões diretas na efetividade das políticas ambientais.

Nesse contexto, coloca-se o seguinte problema de pesquisa: em que medida a ausência de regulamentação específica para a logística reversa das baterias de lítio de veículos elétricos compromete a efetividade das políticas ambientais no Brasil?

Parte-se da hipótese de que a regulamentação da logística reversa aplicada às baterias de lítio, enquanto resíduos tecnológicos de alta complexidade, constitui condição indispensável para a efetivação da justiça intergeracional, da responsabilidade compartilhada e da sustentabilidade no setor da eletromobilidade.

Portanto, o objetivo geral da pesquisa consiste em analisar o descarte e a logística reversa de baterias de lítio de veículos elétricos como instrumentos de concretização do direito fundamental ao meio ambiente, à luz da PNRS. Como objetivos específicos, busca-se: examinar a cadeia produtiva dessas baterias e seus impactos ambientais; analisar a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta metodológica; identificar os desafios nacionais relacionados à reciclagem e à infraestrutura disponível; examinar o marco regulatório vigente e as iniciativas legislativas em curso; e avaliar o papel das instituições e normas no contexto regional do estado do Amazonas.

A metodologia adotada é de natureza qualitativa, com abordagem jurídico-dogmática e analítica, baseada em pesquisa bibliográfica, documental e normativa. Foram examinados diplomas legais nacionais e estaduais, projetos de lei, documentos institucionais, relatórios técnicos e artigos científicos publicados em periódicos acadêmicos, inclusive eletrônicos e indexados, relacionados à eletromobilidade, às baterias de lítio e à logística reversa.

De forma complementar, foram consideradas fontes de natureza informativa, como reportagens e publicações não acadêmicas, utilizadas com finalidade estritamente contextual e empírica, especialmente para a análise de casos concretos e dinâmicas socioambientais contemporâneas. A análise se orienta pelos princípios do Direito Ambiental e pela perspectiva da economia circular, buscando compreender a integração entre desenvolvimento tecnológico e proteção ambiental.

Adicionalmente, utilizou-se o apoio de ferramentas de Inteligência Artificial (IA), notadamente o ChatGPT (OpenAI), em caráter exclusivamente auxiliar, voltado à organização textual e à revisão linguística, sem prejuízo da autoria intelectual da pesquisadora. Tal utilização ocorreu de forma instrumental e subsidiária, não sendo empregada como fonte de produção científica ou jurídica, em consonância com as diretrizes de governança e uso responsável de sistemas de inteligência artificial estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO/IEC 42001:2024.

Quanto à estrutura, a dissertação se organiza em capítulos que abordam, inicialmente, os fundamentos do Direito Ambiental e do desenvolvimento sustentável, seguidos da análise da eletromobilidade e dos desafios associados às baterias de lítio. Na sequência, examinam-se a logística reversa como instrumento jurídico, os processos de reciclagem, os projetos de lei e o marco regulatório aplicável, com especial atenção ao contexto amazônico. Por fim, apresentam-se as considerações finais, nas quais se sintetizam os resultados alcançados e se evidencia a necessidade de fortalecimento do regime jurídico da logística reversa dessas baterias como condição para a efetividade da transição energética no Brasil.

1 DIREITO AMBIENTAL E A ERA DA SUSTENTABILIDADE TECNOLÓGICA: CONEXÕES COM A AGENDA 2030

1.1 Conceito Jurídico de Meio Ambiente

Córdula *et al.* (s.d., p. 1) revelam que a vida surge dentro das mais improváveis e inexplicáveis condições ambientais, demonstrando-se uma capacidade notável de adaptação e reabilitação mesmo em contextos rigorosos. Essa constatação remete à origem da vida na Terra, há bilhões de anos, em um planeta ainda hostil, sem atmosfera respirável e submetido a intensas transformações geológicas e climáticas. Ainda assim, a vida não apenas emergiu, mas evoluiu e se perpetuou, moldando os ecossistemas e a biodiversidade que hoje conhecemos.

Segundo Souza (2024, p. 88), o meio ambiente deve ser compreendido em sua dimensão ampla e integrada, sendo essencial à própria vida e objeto de tutela em múltiplos aspectos. Nesse sentido, o autor evidencia que a proteção ambiental abrange tanto os espaços urbanos, por meio da promoção de condições adequadas de urbanização e infraestrutura pública, quanto os ambientes de trabalho, assegurando a saúde e a dignidade do trabalhador. Ademais, destaca-se a relevância da preservação do patrimônio histórico e cultural, bem como dos recursos naturais, como água, ar, solo e vegetação, os quais são indispensáveis à manutenção da vida. Infere-se, assim, que o meio ambiente se estrutura a partir de uma relação de interdependência entre seus elementos, exigindo uma abordagem sistêmica e integrada para sua efetiva proteção.

Com base nessa visão de complexidade e interdependência da vida e dos sistemas naturais, a compreensão do meio ambiente também se amplia. Tietzmann e Silva (2020, p. 12-13) esclarece que o conceito de meio ambiente não se restringe à sua dimensão natural, tradicionalmente associada aos bens ambientais e aos processos ecológicos. O autor evidencia que essa noção se amplia para abarcar também o patrimônio humano e cultural, revelando a natureza multifacetada do meio ambiente. Portanto, a compreensão contemporânea do meio ambiente demanda uma abordagem abrangente, que integre elementos naturais e culturais, reconhecendo sua interdependência e relevância para a proteção jurídica ambiental.

Assim, observa-se que a proteção ambiental envolve, para além dos elementos naturais, igualmente o patrimônio humano e cultural, em consonância com a ampliação conceitual apresentada pelo autor.

Em uma ótica jurídica, Machado (2023, p. 84) afirma que a definição federal é ampla, pois vai atingir tudo aquilo que permite a vida, que a abriga e a rege. Nota-se a concepção abrangente adotada pela CRFB/1988 e pela legislação infraconstitucional brasileira sobre o

meio ambiente. Essa definição reconhece que o meio ambiente não se limita aos elementos naturais isoladamente considerados (como água, solo, ar ou flora), mas compreende todo o conjunto de condições físicas, químicas e biológicas que tornam possível a existência da vida em todas as suas formas, estendendo-se também à proteção dos espaços urbanos, rurais, culturais e do ambiente do trabalho, em uma visão integrada e sistêmica da vida e dos fatores que a sustentam.

A legislação amazonense considerou como meio ambiente: “O conjunto de condições, leis, influências, e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”, descrito no artigo 3º, inciso I, da Lei nº 1.532/1982. Evidencia-se uma concepção sistêmica e abrangente. Tal abordagem reconhece que o meio ambiente não se restringe apenas aos elementos naturais isolados, mas abrange a profunda malha de fatores que subsidiam a vida.

Para Machado (2023, p. 85), “a maioria das conceituações estaduais não limita o campo ambiental ao homem, mas a todas as formas de vida, antecipando assim a definição federal”. Tal constatação revela uma visão de concepção ecocêntrica do meio ambiente, em consenso com os princípios da proteção integral da biodiversidade e da evolução normativa do Direito Ambiental brasileiro.

1.2 O Direito Ambiental e sua Autonomia

Partindo-se de uma visão contemporânea e integradora do Direito Ambiental, sustentada na corresponsabilidade e na ética socioambiental, Beckhauser (2020, p. 42) destaca de forma contundente que a efetivação do Estado de Direito Ambiental está condicionada à conscientização coletiva acerca da crise ambiental, bem como à atuação conjunta entre o Estado e a sociedade, caracterizando uma responsabilidade compartilhada na proteção do meio ambiente. Destaca-se do contexto que a efetivação do “Estado de Direito Ambiental” demanda não apenas a atuação do Poder Público, mas também o comprometimento ativo da sociedade civil.

No decorrer do processo histórico de afirmação dos direitos fundamentais, observa-se que a proteção ambiental foi sendo paulatinamente incorporada ao discurso dos direitos humanos. Essa incorporação, no entanto, ainda carrega traços de uma visão antropocêntrica, como observa Beckhauser (2020, p. 48-49), ao dizer que a proteção ambiental, no contexto do paradigma da modernidade, foi estruturada a partir de uma perspectiva centrada no ser humano,

na medida em que a preservação da natureza era justificada por sua relevância para a vida humana.

Dessa forma, o autor constata que a proteção ambiental, embora integrada ao discurso dos direitos fundamentais e humanos na modernidade, foi historicamente conduzida a partir de uma lógica antropocêntrica, na qual o meio ambiente é tutelado prioritariamente em função de sua utilidade à sobrevivência e bem-estar da espécie humana, revelando-se a necessidade de superação desse paradigma em direção a uma abordagem ecocêntrica mais ampliada e justificada.

No âmbito da construção doutrinária do Direito Ambiental, destaca-se a sua natureza de características amplas e heterogêneas, exigindo a integração de diversos saberes para a produção de respostas jurídicas eficazes. Nesse perspectiva, Granziera (2019, p. 4) evidencia que o Direito Ambiental se caracteriza como uma disciplina jurídica autônoma, dotada de princípios próprios, ao mesmo tempo em que se estrutura a partir de uma relação intrínseca com saberes científicos externos ao Direito e com diversos ramos do ordenamento jurídico.

O autor demonstra que essa autonomia não implica isolamento, mas uma construção que depende tanto do suporte das ciências naturais e sociais, responsáveis por fornecer a base técnica para a compreensão das questões ambientais, quanto da incorporação de institutos jurídicos provenientes de outros ramos, adaptados às especificidades da matéria ambiental. Assim, reconhece-se a autonomia do Direito Ambiental, sem desconsiderar seu caráter interdependente e multidisciplinar.

Leff (2001, p. 229-230) demonstra que a emergência da questão ambiental e da interdisciplinaridade está diretamente relacionada à crise da racionalidade econômica e teórica da modernidade, a qual se revela insuficiente para compreender e enfrentar a complexidade dos problemas contemporâneos. O autor indica que o desenvolvimento passa a exigir abordagens que ultrapassem os limites das perspectivas disciplinares e setoriais, ao mesmo tempo em que expõe a fragmentação do conhecimento produzida pela ciência moderna.

Destaca-se a necessidade de um enfoque sistêmico e de um conhecimento de caráter holístico, voltados à recomposição da compreensão da realidade diante dos processos de degradação ecológica e desigualdade social. De modo a pensar tais aspectos, o autor sustenta que tanto a questão ambiental quanto a interdisciplinaridade emergem como respostas críticas à insuficiência da racionalidade moderna, centrada em paradigmas econômicos e científicos fragmentados.

1.3 Direito Ambiental Internacional e os Marcos Globais

1.3.1 A Conferência de Estocolmo e a Formação do Direito Ambiental Internacional

Para Lago (2013, p. 13-14), a Conferência de Estocolmo (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano, em 1972) foi a primeira grande reunião organizada pela ONU a se concentrar sobre questões de meio ambiente. Convocou-se em razão da intensificação do engajamento internacional frente à degradação ambiental e seus reflexos sobre a qualidade de vida, especialmente nos países industrializados.

Identifica-se que pressões oriundas da sociedade civil, da comunidade científica e de organizações não governamentais impulsionaram a inserção da temática ambiental na agenda global. Contudo, devido à atuação dos países em desenvolvimento, tratou-se a questão ambiental em correlação com os desafios sociais e econômicos, consolidando-se uma abordagem integrada e cooperativa. A citada Conferência representou, assim, um marco na construção do Direito Ambiental Internacional, ao introduzir princípios e conceitos que orientaram a evolução da diplomacia ambiental nas décadas seguintes (Lago, 2013, p. 14).

Nesse cenário, destaca-se a importância normativa da Declaração resultante da Conferência de Estocolmo de 1972, especialmente no que se refere ao reconhecimento do meio ambiente como direito humano fundamental. Tietzmann e Silva (2020, p. 19) elucida que a Declaração de Estocolmo representou marco relevante ao reconhecer o meio ambiente como direito humano, influenciando sua posterior incorporação em ordenamentos constitucionais, como o brasileiro de 1988, o que demonstra a relevância desse instrumento internacional na consolidação do direito ao meio ambiente no âmbito jurídico.

A partir da respectiva Conferência, diversos instrumentos institucionais e normativos passaram a ser articulados no cenário global, buscando enfrentar de forma coordenada os desafios ambientais emergentes. Nesse contexto, Mendonça e Dias (2019, p. 228) indicam que a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) constituiu um desdobramento direto da Conferência de Estocolmo de 1972, assumindo papel de coordenação e liderança em âmbito internacional na promoção de iniciativas ambientais. Para os autores, tal medida reforçou a centralidade da cooperação internacional na consolidação de políticas ambientais.

1.3.2 A Governança Ambiental Internacional e o Papel do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente na Consolidação do Direito Ambiental

No cenário da governança ambiental internacional, Chamarelli (2024) ressalta a centralidade do PNUMA, ao afirmar seu papel fundamental na orientação das políticas ambientais globais e na promoção da cooperação entre os Estados. Ao enfatizar sua função de liderança e articulação, evidencia-se que o PNUMA atua como instância de referência na construção de diretrizes voltadas à proteção ambiental, contribuindo para a conciliação entre desenvolvimento e sustentabilidade, sem comprometer as necessidades das presentes e futuras gerações.

Essa liderança também se evidencia diante dos desafios relacionados à gestão de resíduos sólidos, aspecto em que a autora acrescenta que a gestão inadequada desses resíduos acarreta impactos diretos à saúde humana, à economia e ao meio ambiente, evidenciando-se, ainda, pelo aumento projetado dos custos globais, que passam de aproximadamente 252 bilhões de dólares em 2020 para cerca de 600 bilhões de dólares anuais até 2050, o que demonstra o agravamento progressivo do problema diante da ausência de ações eficazes. Dessa forma, a análise de Chamarelli (2024) reforça o papel do PNUMA como agente articulador de respostas globais aos problemas ambientais mais urgentes, promovendo ações integradas que aliam desenvolvimento sustentável e cooperação internacional.

Ao abordar os debates que marcaram a Conferência de Estocolmo de 1972, Guitarrara (s.d.) destaca os diferentes vetores da crise ambiental mundial, enfatizando a origem das pressões ecológicas, tanto nos países industrializados quanto naqueles em processo de desenvolvimento. Guitarrara (s.d.) demonstra que essas discussões evidenciaram origens distintas para a degradação ambiental, relacionadas, de um lado, aos processos históricos de industrialização dos países desenvolvidos, marcados pela emissão de poluentes e pela exploração inadequada dos recursos naturais, e de outro, às condições de subdesenvolvimento e pobreza em países em processo de industrialização, associadas à expansão econômica e à diversificação das atividades produtivas. Assim, observa-se que a problemática ambiental apresenta caráter complexo, vinculando-se a diferentes contextos históricos e estruturais.

Ainda sobre o contexto da Conferência de Estocolmo de 1972, Granziera (2024, p. 83) indica que a ciência e a tecnologia assumem papel fundamental no enfrentamento dos desafios ambientais, sendo reconhecidas como instrumentos voltados à identificação, prevenção e solução de problemas ambientais. A autora demonstra que os princípios estabelecidos atribuem aos Estados a responsabilidade de promover a investigação científica, com especial atenção aos

países em desenvolvimento, de modo a viabilizar respostas eficazes às questões ambientais em âmbito nacional e internacional. Observa-se a centralidade do conhecimento científico e tecnológico como elemento estruturante das ações voltadas à proteção ambiental.

Infere-se que tais princípios reforçam a importância da pesquisa científica no enfrentamento da crise ecológica global, ao atribuir aos Estados, especialmente àqueles em desenvolvimento, a responsabilidade de fomentar a produção de conhecimento aplicada às questões ambientais. Guitarrara (s.d.) aponta, ainda, a relevância da cooperação internacional e do investimento em inovação como fatores associados à consolidação da ciência como eixo estruturante das políticas ambientais.

À luz dessa perspectiva, a compreensão de que os direitos surgem de forma progressiva, conforme as necessidades históricas e sociais, conforme proposto por Bobbio (2022, p. 6), ao afirmar que “os direitos não nascem todos de uma vez, mas quando devem ou podem nascer”, aplica-se diretamente à trajetória do Direito Ambiental, evidenciando que sua positivação constitui resposta institucional às transformações socioambientais contemporâneas.

1.3.3 A Construção do Conceito de Sustentabilidade: Do Relatório Brundtland às Perspectivas Críticas

A relevância do conceito de sustentabilidade ganhou destaque no cenário internacional a partir da década de 1980, especialmente com a publicação de um documento emblemático sobre o tema. Mendonça e Dias (2019, p. 65) indicam que a noção de sustentabilidade se consolida a partir de 1987, com a divulgação do Relatório Nosso Futuro Comum, também conhecido como Relatório Brundtland, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, sob a liderança de Gro Harlem Brundtland. Esse documento foi responsável por difundir, em escala global, o conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como a necessidade de conciliar a satisfação das demandas presentes com a preservação das condições necessárias às gerações futuras.

Machado (2023, p. 88) sustenta que a sustentabilidade se fundamenta na análise dos efeitos das ações humanas ao longo do tempo, exigindo a consideração de suas repercussões tanto no presente quanto no futuro. O autor indica que a avaliação dessas ações implica a identificação de sua permanência e de suas consequências, evidenciando a necessidade de uma abordagem prospectiva orientada por critérios técnico-científicos.

Ao tratar do conceito de desenvolvimento sustentável, Machado (2023, p. 89) demonstra que essa expressão resulta da articulação entre os conceitos de desenvolvimento e

sustentabilidade, sendo esta responsável por qualificar aquele. O autor observa, ainda, a existência de tensões entre crescimento econômico e preservação ambiental, destacando que a busca por harmonização entre esses elementos não pode ocorrer em detrimento do equilíbrio ecológico, historicamente negligenciado nos processos decisórios.

Redclift (2012) desenvolve uma análise crítica ao afirmar que, embora o conceito de desenvolvimento sustentável tenha alcançado ampla difusão a partir do Relatório Brundtland, ele permanece marcado por ambiguidades e disputas interpretativas. O autor indica que noções como “necessidades” e “gerações futuras” possuem caráter histórico e cultural, o que dificulta sua aplicação uniforme. Além disso, aponta que o conceito tem sido apropriado por diferentes atores com significados diversos, o que compromete sua consistência normativa. Destaca, ainda, que a predominância de uma abordagem tecnocrática e de matriz ocidental tende a marginalizar saberes locais e tradicionais, reforçando a necessidade de uma revisão contínua do conceito à luz da pluralidade de perspectivas socioambientais.

Sob uma perspectiva ambiental, Oliveira e Ferreira (2021, p. 23) indicam que a sustentabilidade está diretamente relacionada à manutenção dos ciclos naturais do planeta, de modo que as atividades humanas devem se desenvolver em consonância com esses processos ecológicos. Tal compreensão reforça que o desenvolvimento sustentável exige compatibilidade com as dinâmicas naturais responsáveis pela manutenção do equilíbrio ambiental.

1.3.4 Rio-92 e a Governança Ambiental Global

Mendonça e Dias (2019, p. 70) registram que, cinco anos após a publicação do Relatório Brundtland, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, também conhecida como Rio-92, no Rio de Janeiro, a qual representou um marco no fortalecimento da governança ambiental global e na consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável.

Na mesma linha, Patriarcha-Graciolli (2015, p. 69) aponta que a Rio-92 teve como objetivo avaliar as transformações ocorridas nas questões ambientais desde a Conferência de Estocolmo de 1972, evidenciando a continuidade e o aprofundamento das discussões ambientais no plano internacional.

Cordani *et al.* (1997) destacam que a Rio-92 resultou na assinatura de importantes instrumentos internacionais, como as Convenções do Clima e da Biodiversidade, a Agenda 21, a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento e a Declaração de Princípios sobre Florestas.

Observa-se, assim, que a Rio-92 consolidou avanços iniciados em Estocolmo, ao estabelecer bases normativas e institucionais para a atuação internacional em matéria ambiental, reforçando a necessidade de ações coordenadas em escala global.

No contexto dos compromissos assumidos pelo Brasil após a conferência, destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, assinada em 1992 e promulgada pelo Decreto nº 2.652, de 1º de julho de 1998, que institui um marco jurídico internacional voltado à mitigação das mudanças climáticas decorrentes das atividades humanas. O referido instrumento estabelece como objetivo central a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa em níveis que evitem interferências perigosas no sistema climático, garantindo a adaptação dos ecossistemas, a segurança alimentar e a continuidade do desenvolvimento econômico sustentável (Brasil, 1998).

Ademais, o art. 3º do Decreto nº 2.652/1998 consagra princípios orientadores da política climática, como a equidade intergeracional, as responsabilidades comuns, porém diferenciadas, o princípio da precaução e o direito ao desenvolvimento sustentável, além de enfatizar a cooperação internacional como elemento essencial à implementação das medidas climáticas.

Dessa forma, verifica-se que a Rio-92 representou etapa decisiva na consolidação da governança ambiental global, ao incorporar princípios estruturantes para a atuação dos Estados no enfrentamento das mudanças climáticas. No caso brasileiro, a internalização da Convenção por meio do Decreto nº 2.652/1998 evidencia o alinhamento do país aos compromissos internacionais, bem como a institucionalização de mecanismos voltados à proteção ambiental e à promoção do desenvolvimento sustentável.

1.3.5 Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono

De acordo com Tietzmann e Silva (2020, p. 59-60), o Protocolo de Quioto representou um marco no enfrentamento das mudanças climáticas, ao transformar princípios gerais em compromissos jurídicos vinculantes para os países desenvolvidos. Estabeleceu dois períodos de compromisso: o primeiro, de 2008 a 2012, fixou a meta de redução de 5% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em relação aos níveis de 1990; o segundo, de 2013 a 2020, previu uma redução de pelo menos 18%, com metas estabelecidas voluntariamente pelos Estados-partes.

Com base no princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, o protocolo impôs obrigações apenas aos países desenvolvidos, enquanto os países em desenvolvimento, como o Brasil, podiam adotar metas voluntárias. Para viabilizar o cumprimento das metas,

foram criados mecanismos de flexibilização, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitiam aos países cumprir parte de suas obrigações por meio de ações em territórios estrangeiros (Tietzmann e Silva, 2020 p. 59-60).

Mendonça e Dias (2019, p. 242-243) explicam que tais mecanismos de flexibilização assumem caráter estratégico ao buscar compatibilizar crescimento econômico e responsabilidade ambiental. Os autores demonstram que o Protocolo de Quioto estruturou três instrumentos principais: a Execução Conjunta, restrita a países industrializados e voltada à negociação direta para cumprimento de metas; o Comércio de Emissões, que possibilita a troca de quotas e créditos de carbono entre esses países; e o mencionado MDL, que permite a obtenção de créditos mediante o financiamento de projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento. Nesse contexto, observa-se que tais mecanismos operam por meio de instrumentos de mercado, viabilizando alternativas de cumprimento das metas estabelecidas.

Os autores também apontam que, embora inovadores, esses mecanismos são objeto de críticas quanto à sua efetividade na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que podem favorecer soluções compensatórias em detrimento de transformações estruturais nos padrões de produção e consumo (Mendonça e Dias, 2019).

No âmbito nacional, a Lei nº 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estruturado a partir do modelo *cap and trade*, que combina a limitação de emissões com a negociação de ativos ambientais. Conforme disposto no art. 3º, o sistema tem por finalidade contribuir para o cumprimento da Política Nacional sobre Mudança do Clima e dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, mediante a definição de metas e a regulamentação da comercialização de ativos relacionados à emissão, redução ou remoção de GEE.

1.3.6 Acordo de Paris e a Meta de 1,5 °C

O Acordo de Paris, incorporado ao ordenamento jurídico brasileiro por meio do Decreto nº 9.073/2017, representa um marco no enfrentamento global às mudanças climáticas. Em seu Artigo 2º, item 1, alínea a, o tratado estabelece como um de seus objetivos centrais a limitação do aumento da temperatura média global bem abaixo de 2 °C, em relação aos níveis pré-industriais, comprometendo os países signatários a envidar esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C. Tal meta reflete o consenso científico de que cada fração de grau pode ser decisiva

na mitigação dos impactos climáticos, sobretudo para populações humanas e ecossistemas que se encontram em maior situação de vulnerabilidade.

O dispositivo legal reflete o consenso internacional acerca da gravidade da crise climática e da necessidade de ações urgentes e coordenadas para conter o aquecimento global. Ademais, insere o enfrentamento das mudanças climáticas em um duplo contexto normativo: o do desenvolvimento sustentável e o dos esforços de erradicação da pobreza. Tal formulação demonstra que o Acordo de Paris não se limita à definição de metas ambientais, mas avança para o campo da justiça climática, ao reconhecer que os países e populações historicamente menos responsáveis pela emissão de GEE são, paradoxalmente, os mais vulneráveis aos seus efeitos.

Nesse sentido, o artigo 2º do Acordo de Paris reforça a compreensão de que a luta contra a mudança do clima deve ser transversal, integrada a políticas públicas de desenvolvimento socioeconômico, inclusão social, redução das desigualdades e proteção dos direitos humanos fundamentais. A limitação do aquecimento global a 1,5 °C configura, portanto, não apenas uma diretriz ambiental, mas um imperativo ético, político e jurídico, indispensável à garantia das condições mínimas de dignidade para as gerações presentes e futuras (Brasil, 2017).

1.4 Fundamentos do Direito Ambiental Brasileiro

1.4.1 A Constitucionalização da Proteção Ambiental: do Reconhecimento Normativo à Efetividade Jurídica

A promulgação da CRFB/1988 representou um marco decisivo para a consolidação do Direito Ambiental no país, ao reconhecer o meio ambiente como bem jurídico autônomo e ao instituir um regime normativo próprio voltado à sua tutela. Nesse contexto, a inovação normativa pode ser compreendida como resultado de uma ruptura com o modelo anterior, caracterizado por disposições fragmentadas e desarticuladas. Assim, a CRFB/1988 inaugura uma abordagem sistemática da proteção ambiental, ao incorporar expressamente a temática em seu texto e lhe conferir centralidade jurídica (Murta, 2019).

Tal avanço revela uma mudança paradigmática em relação às constituições precedentes, cuja ausência de uma disciplina ambiental integrada dificultava a formulação de políticas públicas eficazes. Com a nova ordem constitucional, o meio ambiente passa a ser concebido como elemento essencial à qualidade de vida, sendo reconhecido como direito de todos e bem de uso comum do povo, conforme disposto no artigo 225 do texto constitucional.

A norma estabelece, ainda, um dever compartilhado entre o Poder Público e a coletividade, impondo a ambos a responsabilidade pela defesa e preservação ambiental, sempre em atenção às presentes e futuras gerações. Para assegurar a efetividade desse direito fundamental, o § 1º do artigo 225 da CRFB/1988 estrutura um conjunto de atribuições estatais que abrangem diferentes dimensões da tutela ambiental, incluindo medidas de preservação, controle, fiscalização e educação.

Essas incumbências compreendem, entre outros aspectos, a proteção dos processos ecológicos essenciais, a salvaguarda da diversidade genética, a criação de espaços territoriais especialmente protegidos, a exigência de estudos prévios de impacto ambiental para atividades potencialmente degradadoras, o controle de substâncias e técnicas nocivas, a promoção da educação ambiental e a proteção da fauna e da flora. Trata-se, portanto, de um sistema normativo abrangente, que articula instrumentos preventivos, repressivos e educativos com o objetivo de garantir o equilíbrio ecológico como condição indispensável à dignidade humana e ao desenvolvimento sustentável.

Nessa perspectiva, Trennepohl (2024, p. 143-144) destaca que o conjunto de deveres previstos no § 1º do artigo 225 da CRFB/1988 configura uma estrutura normativa complexa, que incorpora medidas de natureza preventiva, educativa, fiscalizatória e restaurativa, demonstrando o compromisso do constituinte com a efetividade do direito fundamental ao meio ambiente. O autor ressalta que tais mecanismos não se limitam a enunciados programáticos, mas estabelecem obrigações concretas que vinculam a atuação estatal à proteção ambiental.

Por sua vez, Benjamin *et al.* (2015, Loc. 8778-8784) aprofundam essa compreensão ao defenderem a consolidação de um Estado de Direito Ambiental, no qual a proteção do meio ambiente ultrapassa a dimensão normativa formal e se projeta como elemento estruturante da ordem jurídica. Segundo os autores, esse modelo exige a efetivação dos direitos fundamentais ambientais por meio de uma atuação estatal comprometida com a proteção integral da vida, reconhecendo o meio ambiente tanto como valor intrínseco quanto como direito coletivo. Tal concepção pressupõe, ainda, a adoção de mecanismos participativos, capazes de viabilizar a atuação conjunta da sociedade na concretização da tutela ambiental.

1.4.2 A Política Nacional do Meio Ambiente e a Consolidação da Gestão Ambiental no Brasil

A Lei nº 6.938/1981, que institui a PNMA, foi recepcionada pela CRFB/1988, passando a integrar o sistema constitucional de proteção ambiental, especialmente à luz das competências comuns previstas no artigo 23, incisos VI e VII. Esse diploma normativo estabelece os

instrumentos de formulação e aplicação da política ambiental no Brasil, além de estruturar o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), configurando-se como um dos pilares da tutela jurídica ambiental no país.

A gênese da PNMA está diretamente relacionada à inserção do Brasil no debate ambiental internacional. Nesse sentido, Tietzmann e Silva (2020, p. 81) destaca que a Lei nº 6.938/1981 constitui uma decorrência da participação brasileira na Conferência de Estocolmo de 1972, evidenciando a influência dos movimentos ambientais globais na formação do ordenamento jurídico nacional. A partir da década de 1970, o país passou a incorporar diretrizes e princípios internacionais, consolidando um marco normativo essencial para a proteção do meio ambiente.

No que concerne ao conteúdo da PNMA, o artigo 2º estabelece como objetivo central a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, com vistas à garantia de condições adequadas ao desenvolvimento socioeconômico, à segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana. Para a consecução desse objetivo, o dispositivo apresenta um conjunto de princípios orientadores que estruturam a atuação estatal e social no campo ambiental, evidenciando uma política pautada na sustentabilidade e na prevenção.

Entre esses princípios, destacam-se a atuação governamental voltada à manutenção do equilíbrio ecológico, a concepção do meio ambiente como patrimônio público de uso coletivo, a racionalização do uso dos recursos naturais, o planejamento e a fiscalização das atividades potencialmente poluidoras, bem como a proteção dos ecossistemas e de áreas representativas. Soma-se a isso o controle e o zoneamento das atividades potencialmente degradadoras, o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, o monitoramento contínuo da qualidade ambiental e a recuperação de áreas degradadas.

A PNMA também contempla a proteção de áreas ameaçadas de degradação e promove a educação ambiental em todos os níveis de ensino, estimulando a participação ativa da sociedade na defesa do meio ambiente. Conforme detalha Tietzmann e Silva (2020), esse conjunto de diretrizes revela uma política ambiental orientada à integração entre proteção ambiental, prevenção de danos e engajamento coletivo, consolidando a base normativa da gestão ambiental no Brasil.

No plano conceitual, o artigo 3º da Lei nº 6.938/1981 exerce função estruturante ao definir categorias fundamentais, tais como meio ambiente, degradação da qualidade ambiental, poluição, poluidor e recursos ambientais (Brasil, 1981). Ao estabelecer essas definições de forma técnica e normativa, o dispositivo fornece parâmetros essenciais para a formulação,

execução e fiscalização de políticas públicas, além de orientar a atuação administrativa e judicial na tutela ambiental.

Esses conceitos são indispensáveis à efetivação do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, previsto no artigo 225 da CRFB/1988, uma vez que permitem a delimitação de responsabilidades, a identificação de condutas lesivas e a fundamentação de medidas preventivas, reparatórias e sancionatórias.

No que se refere aos objetivos da política ambiental, o artigo 4º da PNMA estabelece diretrizes voltadas à compatibilização entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, à definição de áreas prioritárias de atuação governamental, à fixação de padrões de qualidade ambiental e ao incentivo à pesquisa e à difusão de tecnologias sustentáveis. Além disso, contempla a promoção da conscientização pública, a preservação e restauração dos recursos ambientais e a responsabilização dos agentes poluidores, impondo-lhes o dever de reparar ou indenizar os danos causados, bem como a obrigação de contribuir pelo uso econômico dos recursos naturais (Brasil, 1981).

Dessa forma, a PNMA consolida um modelo de gestão ambiental pautado na integração entre desenvolvimento socioeconômico e conservação ambiental, orientado pelo uso sustentável dos recursos naturais, pela racionalização de sua exploração e pela responsabilização dos agentes causadores de degradação.

1.4.3 Estrutura Institucional do Sistema Nacional do Meio Ambiente

Para se consolidar uma governança ambiental eficaz no Brasil, em seu artigo 6º, a Lei nº 6.938/1981 estruturou o Sisnama com articulação entre diferentes entes federativos e instituições voltadas à proteção ecológica, envolvendo os órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios, bem como as fundações instituídas pelo Poder Público. Com esse propósito, a PNMA define seis órgãos responsáveis por implementar, coordenar, fiscalizar e deliberar sobre a política ambiental nacional.

No âmbito superior, o Conselho de Governo assessora o Presidente da República na formulação de diretrizes e políticas nacionais relacionadas ao meio ambiente e aos recursos ambientais. Em caráter consultivo e deliberativo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) propõe, estuda e delibera sobre normas e padrões voltados à proteção ambiental, observando o princípio do meio ambiente ecologicamente equilibrado. Como órgão central, a Secretaria do Meio Ambiente da Presidência da República desempenha funções de planejamento, coordenação, supervisão e controle das políticas ambientais no plano federal. A

execução dessas políticas e diretrizes é atribuída aos órgãos executores, representados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) e pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), dentro de suas competências legais. Complementam a estrutura os órgãos seccionais, compostos por entidades estaduais responsáveis pela execução de programas e pela fiscalização de atividades potencialmente degradadoras, e os órgãos locais, formados por entidades municipais encarregadas do controle e fiscalização no âmbito de suas jurisdições (Brasil, 1981).

Observa-se que o Sisnama representa um arranjo federativo descentralizado e funcionalmente integrado, cuja efetividade depende da atuação coordenada entre os níveis federal, estadual e municipal. Ao estabelecer competências específicas para cada instância, o sistema visa assegurar a aplicação uniforme das diretrizes ambientais, promovendo a proteção do meio ambiente como bem de interesse coletivo e constitucionalmente tutelado. Assim, a PNMA e o Sisnama se consolidam como instrumentos normativos e institucionais essenciais à governança ambiental brasileira, assegurando a proteção do meio ambiente enquanto bem de uso comum e direito fundamental previsto constitucionalmente.

1.5 A Convergência entre Direito Ambiental e Desenvolvimento

A estruturação institucional da política ambiental no Brasil, por meio da PNMA e do Sisnama, evidencia um esforço estatal de articulação entre proteção ecológica e planejamento. Para a adequada compreensão dessa integração, torna-se necessário analisar a evolução histórica do conceito de desenvolvimento e sua relação com a sustentabilidade no contexto contemporâneo.

Nesse sentido, Pereira (2023, p. 38) identifica que, a partir do século XVIII, ocorreu uma transformação significativa na capacidade produtiva humana, impulsionada pela Revolução Industrial, a qual promoveu a transição para uma sociedade urbano-industrial marcada pelo aumento progressivo da produtividade decorrente da incorporação de avanços tecnológicos. Tal processo implicou mudanças estruturais profundas na organização social e econômica, ampliando a escala da produção e redefinindo as relações entre sociedade e natureza.

A partir dessa perspectiva, observa-se que o modelo de desenvolvimento consolidado no período industrial intensificou a exploração dos recursos naturais, estabelecendo as bases de um sistema produtivo orientado pelo crescimento econômico contínuo. Esse cenário contribui

para a compreensão dos desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade, especialmente no que se refere à necessidade de reconfiguração das práticas produtivas.

Nesse contexto crítico, Leff (2001, p. 79) propõe uma releitura das relações entre sociedade e natureza, ao destacar que a questão ambiental reintroduz, no cenário social, conflitos relacionados aos meios de produção industrializados, além de ao acesso e ao controle dos recursos naturais. O autor sustenta que o ambientalismo aponta para um novo paradigma produtivo, fundamentado na valorização dos potenciais ecológicos, tecnológicos e culturais, orientando formas alternativas e mais sustentáveis de uso dos recursos.

Essa abordagem implica a superação de uma visão estritamente economicista, ao incorporar dimensões socioambientais e culturais na gestão dos recursos naturais. Nessa linha, Leff (2001, p. 79) também evidencia uma ampliação do campo dos direitos humanos, que passa a incluir a proteção dos bens ambientais comuns e o direito ao pleno desenvolvimento das potencialidades humanas, associado às lutas das comunidades pela autonomia sobre seus territórios e recursos. Tal perspectiva reforça a centralidade da justiça ambiental e da sustentabilidade como fundamentos de uma nova racionalidade ambiental.

No plano histórico-científico, Barbieri (2020, p. 22-23) destaca que, embora o conhecimento sobre a relação entre gases atmosféricos e clima remonte ao século XIX, a problemática ambiental somente passou a integrar a agenda política internacional a partir da década de 1970. Esse avanço decorreu da intensificação das pesquisas científicas, especialmente a partir de 1957, com o Ano Internacional da Geofísica, que impulsionou a produção de conhecimento sobre o planeta e o clima.

A evolução da consciência ambiental também foi impulsionada por eventos concretos que evidenciaram os impactos da poluição sobre a saúde humana. A respeito disso, Gates (2021, p. 232-233) descreve episódios históricos de poluição atmosférica, como os eventos de *smog* em Los Angeles, na década de 1940, resultantes da combinação entre poluição do ar e condições meteorológicas, e em Londres, em 1952, os quais provocaram graves consequências à população e despertaram preocupação pública e governamental. Esses acontecimentos contribuíram para a mobilização social e para a criação de instrumentos normativos voltados ao controle da poluição, marcando o início de uma atuação estatal mais estruturada na área ambiental. A partir desses eventos, observa-se que a percepção direta dos impactos ambientais pela sociedade desempenhou papel relevante na construção de políticas públicas e legislações ambientais, evidenciando a relação entre crise ambiental, mobilização social e regulação estatal.

Por fim, Mendonça e Dias (2019, p. 22) destacam que, embora a ciência e a tecnologia tenham promovido avanços significativos para a humanidade, também intensificaram a

exploração dos recursos naturais desde o início do processo de industrialização, atendendo a uma lógica de produção e consumo cada vez mais ampliada. Essa constatação reforça a necessidade de reorientação do modelo de desenvolvimento, de modo a compatibilizar o progresso tecnológico com a preservação ambiental.

Dessa forma, evidencia-se que a construção do pensamento ambiental contemporâneo resulta de um processo histórico que articula transformações produtivas, avanços científicos, mobilização social e evolução normativa, exigindo a adoção de um paradigma sustentável capaz de harmonizar desenvolvimento econômico e proteção ambiental.

1.6 Retrocesso Ambiental e Impactos na Sustentabilidade

Mendonça e Dias (2019, p. 38-39) apontam que, desde 2015, houve retrocessos marcantes para a área ambiental e a conservação da natureza e da sociobiodiversidade nacional. A constatação evidencia a adoção de políticas e medidas legislativas que, sob justificativas econômicas e políticas, vêm enfraquecendo os instrumentos de proteção ambiental e comprometendo a integridade dos ecossistemas brasileiros.

Entre os aspectos destacados, os autores apontam o aumento da anistia para donos de terras ocupadas ilegalmente na Amazônia, o que configura uma forma de legitimação de práticas irregulares, desestimulando a regularização fundiária e incentivando a grilagem. Tais medidas, além de comprometerem a ordem jurídica, favorecem o avanço do desmatamento em áreas de floresta pública não destinada.

A flexibilização do Código Florestal Brasileiro (lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) a fim de atender interesses de grandes fazendeiros de terras é outro exemplo de retrocesso normativo citado por Mendonça e Dias (2019, p. 38-39). Alterações legislativas têm reduzido as exigências de recomposição e proteção ambiental em propriedades rurais, o que compromete a função ecológica das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e das Reservas Legais (RLs), afetando a conectividade dos ecossistemas e a proteção dos recursos hídricos.

Além disso, os autores observam ainda a flexibilização das normas para o licenciamento ambiental, processo que parece comprometer o rigor técnico na análise de impactos e fragiliza o papel do Estado na prevenção de danos ambientais. A dispensa de estudos prévios e a criação de regimes simplificados de licenciamento para atividades de médio e alto impacto representam ameaças ao princípio da precaução.

Mendonça e Dias (2019) alertam também para a exploração de recursos minerais em terras indígenas e a não demarcação dessas terras para os povos nativos, conduta que implica

em retrocesso ambiental e violação dos direitos originários garantidos constitucionalmente, além de gerar conflitos fundiários e ameaçar a integridade sociocultural dos povos indígenas.

A análise de Mendonça e Dias (2019) descreve um conjunto articulado de medidas que contribuem para o enfraquecimento da governança ambiental brasileira, com impactos diretos sobre a biodiversidade, os povos tradicionais e os compromissos do país com o desenvolvimento sustentável.

1.6.1 Logística Reversa como Instrumento da Sustentabilidade no Setor Tecnológico

Nesse contexto, marcado pela crescente exigência de responsabilização ambiental dos agentes econômicos, a logística reversa se destaca como instrumento normativo e operacional de elevada relevância. Conforme analisa Guarnieri (2013, p. 23), a logística reversa consiste em uma estratégia voltada à reinserção dos resíduos oriundos do pós-venda e do pós-consumo nos ciclos produtivos ou de negócios, superando a lógica tradicional de simples disposição final em aterros ou lixões, a qual se mostra insuficiente diante das demandas ambientais contemporâneas.

A partir dessa perspectiva, demonstra-se a importância da logística reversa dentro do contexto de transição para modelos produtivos sustentáveis, ao estabelecer uma conexão entre os padrões de consumo e a destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Tal mecanismo concretiza, na prática, princípios estruturantes do Direito Ambiental, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a economia circular, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a racionalização do uso de recursos naturais.

1.6.2 Logística Reversa de Baterias de Lítio no Brasil: Desafios Regulatórios na Eletromobilidade

Entre os setores que mais demandam atenção no que se refere à responsabilidade pós-consumo e aos riscos decorrentes da insuficiência normativa, destaca-se o segmento da eletromobilidade, especialmente no que concerne às baterias de lítio. A destinação final desses dispositivos, amplamente empregados em veículos elétricos, configura um dos principais desafios contemporâneos no âmbito da logística reversa, sobretudo diante da inexistência de regulamentação específica.

No contexto brasileiro, essa lacuna normativa compromete a efetividade das políticas públicas voltadas à gestão de resíduos perigosos, dificultando a implementação de mecanismos

adequados de controle, fiscalização e reaproveitamento. Nesse sentido, Tironi (2024) explica que a ausência de um marco regulatório específico para a logística reversa de baterias de lítio transfere, de forma predominante, a responsabilidade pela destinação final aos fabricantes de veículos elétricos, ao mesmo tempo em que favorece práticas informais, como a coleta e a exportação clandestina desses resíduos, o que fragiliza o desenvolvimento de um mercado estruturado de reciclagem no país.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de consolidação de um arcabouço normativo mais robusto, capaz de assegurar a rastreabilidade das baterias, a segurança ambiental em todas as etapas do ciclo de vida e a conformidade com os princípios estabelecidos pela PNRS, especialmente no que se refere à responsabilidade compartilhada e à gestão integrada dos resíduos. Tal medida se revela crucial para a efetivação de um modelo de economia circular no setor da eletromobilidade.

1.7 A Evolução do Conceito de Desenvolvimento: do Crescimento Econômico à Sustentabilidade

Ao analisar a evolução histórica do conceito de desenvolvimento econômico, Barbieri (2020, p. 17) destaca que diferentes concepções foram formuladas ao longo do tempo, remontando aos economistas clássicos, como Adam Smith, David Ricardo e Thomas Malthus, que já demonstravam preocupação com o crescimento da produção e da riqueza a longo prazo, ainda que não utilizassem propriamente o termo “desenvolvimento”. O enfoque predominante recaía sobre a expansão das forças produtivas, a intensificação da divisão do trabalho e a acumulação de capital, elementos que caracterizavam uma visão essencialmente voltada ao crescimento econômico.

Dando continuidade à sua análise, Barbieri (2020, p. 20) observa que um marco relevante para a consolidação do conceito de desenvolvimento no cenário internacional ocorreu com a decisão da Assembleia Geral das Nações Unidas, em 1959, de instituir a Primeira Década do Desenvolvimento, referente ao período de 1960 a 1970. Essa iniciativa teve como objetivo promover esforços concentrados para a redução da pobreza nos países então classificados como subdesenvolvidos, adotando o crescimento econômico como principal instrumento de melhoria das condições de vida, acompanhado pela diminuição do desemprego e do subemprego. Percebe-se que, naquele momento histórico, prevalecia uma concepção predominantemente economicista de desenvolvimento, na qual as dimensões sociais e ambientais ainda ocupavam posição secundária nas agendas internacionais.

Em perspectiva mais contemporânea, Barbieri (2020, p. 178) destaca que, em 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, foi aprovado o documento intitulado Agenda 2030, o qual estabelece um conjunto de objetivos e diretrizes voltados à promoção do desenvolvimento sustentável em escala global. Esse instrumento incorpora os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estruturados como uma agenda orientadora que reúne princípios, compromissos assumidos pelos Estados e mecanismos de implementação, monitoramento e avaliação das metas estabelecidas.

Dessa forma, observa-se uma evolução conceitual significativa, que desloca o enfoque exclusivo no crescimento econômico para uma abordagem integrada, na qual o desenvolvimento passa a ser compreendido a partir da articulação entre dimensões econômicas, sociais e ambientais.

1.7.1 A Ecologização da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988: Princípios e Sustentabilidade

Observa-se que a proteção ambiental ultrapassa a esfera das obrigações ético-morais e assume natureza jurídica, impondo-se como dever tanto do Estado quanto da sociedade civil. Nesse sentido, Manzini e Vezzoli (2011, p. 57) compreendem a sustentabilidade como um dos valores universais emergentes, fundamentado na responsabilidade em relação às gerações futuras e na necessidade de preservação dos equilíbrios ambientais que sustentam a vida no planeta.

A partir dessa concepção, evidencia-se a consolidação do princípio da responsabilidade intergeracional como elemento estruturante do desenvolvimento sustentável. Tal princípio impõe aos ordenamentos jurídicos e às políticas públicas o dever de assegurar a preservação ambiental para as necessidades presentes, para garantir a continuidade da vida e para a justiça entre gerações.

No campo do Direito Constitucional Ambiental, Benjamin *et al.* (2015, p. 2939-2940) destacam que a CRFB/1988 incorporou a noção de “antropocentrismo alargado”, ao reconhecer o meio ambiente como bem de uso comum do povo, atribuindo-lhe natureza de macrobem e ampliando sua proteção para além de interesses meramente individuais. Essa concepção fortalece o entendimento de que o meio ambiente constitui elemento essencial à coletividade, exigindo proteção jurídica voltada tanto às demandas atuais quanto à preservação das condições de vida futura.

Ainda nessa perspectiva, os autores identificam que o texto constitucional reúne um amplo conjunto de princípios ambientais, tanto expressos quanto implícitos, que estruturam a tutela ecológica no ordenamento jurídico brasileiro. Entre esses princípios, destacam-se a primariedade do meio ambiente, a limitação da explorabilidade da propriedade e dos recursos naturais, o uso sustentável, a prevenção, o poluidor-pagador, o usuário-pagador e a função ecológica da propriedade, além do princípio da precaução, que se extrai do sistema constitucional como um todo (Benjamin *et al.*, 2015, p. 2483-2488).

Nesse contexto, a defesa do meio ambiente assume posição central também na ordem econômica, uma vez que o artigo 170, inciso VI, da CRFB/1988 estabelece a proteção ambiental como princípio estruturante da atividade econômica. Tal previsão demonstra a constitucionalização do desenvolvimento sustentável, ao submeter a livre iniciativa e a atividade produtiva à observância de critérios ambientais, conferindo à proteção ecológica caráter normativo vinculante.

A articulação entre os artigos 170 e 225 da CRFB/1988 reforça a transversalidade da proteção ambiental no ordenamento jurídico brasileiro, consolidando a ampliação da responsabilidade coletiva e institucional diante dos impactos decorrentes das atividades econômicas. Esse processo de ecologização do texto constitucional também produziu efeitos relevantes no regime jurídico da propriedade.

Conforme ainda destacam Benjamin *et al.* (2015, p. 1681-1683), a incorporação da dimensão ambiental à CRFB/1988 implicou a instituição de um regime de exploração limitada e condicionada da propriedade, integrando à sua função social um componente ecológico explícito. Dessa forma, o direito de propriedade deixa de ser absoluto, passando a exigir conformidade com parâmetros ambientais e sociais.

Esse entendimento encontra respaldo no artigo 186, inciso II, da CRFB/1988, que estabelece como requisito da função social da propriedade rural a utilização adequada dos recursos naturais e a preservação do meio ambiente, evidenciando que a exploração econômica deve se submeter a critérios de sustentabilidade. Nessa linha, Benjamin *et al.* (2015, p. 1681-1683) destacam que os dispositivos constitucionais relacionados à ordem econômica e à função social da propriedade representam uma ruptura com o paradigma clássico da exploração irrestrita dos bens ambientais, a qual passa a ser juridicamente condicionada à preservação da saúde humana e dos processos ecológicos essenciais, consolidando a sustentabilidade como requisito normativo obrigatório.

Diante desse cenário, a efetividade dos princípios do desenvolvimento sustentável, como a responsabilidade intergeracional e o uso sustentável dos recursos, demanda a

implementação de instrumentos normativos e operacionais capazes de articular os diversos atores sociais e econômicos. A partir disso, a logística reversa emerge como mecanismo de concretização desses princípios, ao viabilizar o retorno de resíduos ao ciclo produtivo, reduzindo impactos ambientais e promovendo a economia circular.

Tal instrumento materializa, na prática, o princípio do poluidor-pagador, incorporado ao ordenamento jurídico brasileiro pela PNRS e reafirmado nas diretrizes da Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU, 2015), evidenciando a necessidade de integração entre desenvolvimento econômico, responsabilidade ambiental e justiça intergeracional.

1.7.2 Dimensões do Desenvolvimento Sustentável: Ambiental, Econômica e Social

A definição de ecodesenvolvimento ou desenvolvimento sustentável se fundamenta na compreensão de que as dimensões econômica, ambiental e social são indissociáveis, devendo ser consideradas de forma integrada na formulação de políticas e estratégias de desenvolvimento. Nesse sentido, Reis destaca que a superação do modelo hegemônico exige uma mudança paradigmática capaz de articular, simultaneamente, a eficiência econômica, a prudência ecológica e a equidade social (Reis, s.d., p. 7).

A partir dessa perspectiva, o desenvolvimento sustentável assume caráter multidimensional, no qual a racionalidade econômica não pode ser dissociada da proteção dos recursos naturais nem da promoção da justiça social. Tal abordagem evidencia a necessidade de integração entre diferentes dimensões, superando visões fragmentadas que historicamente orientaram os modelos de desenvolvimento.

Nesse cenário, a sustentabilidade também se configura como campo de disputas teóricas, especialmente no âmbito da Ciência Econômica. Tietzmann e Silva (2020, p. 176) observa que há um embate entre diferentes correntes, notadamente entre a economia ambiental e a economia ecológica, as quais apresentam alternativas distintas para o enfrentamento da problemática ambiental e para a construção de um modelo efetivo de sustentabilidade. Enquanto a economia ambiental tende a atribuir ao mercado papel central na gestão dos recursos naturais, por meio de mecanismos como a internalização das externalidades e a valoração econômica dos bens ambientais, a economia ecológica questiona essa lógica, propondo abordagens mais críticas quanto à mercantilização da natureza.

Dessa forma, a compreensão da sustentabilidade se revela permeada por tensões conceituais que refletem diferentes visões acerca do papel do mercado e do Estado na regulação ambiental. A definição e a aplicação desse conceito passam, portanto, a depender dos critérios

adotados para a valoração dos bens ambientais e das estratégias de gestão dos recursos naturais, o que influencia diretamente sua efetividade normativa.

Em complemento, Reis (s.d., p. 11) ressalta que o desenvolvimento sustentável deve ser estruturado a partir da integração de múltiplas dimensões, incluindo aspectos econômicos, ecológicos, sociais, espaciais e culturais, de modo a promover um modelo de desenvolvimento viável, equilibrado e socialmente justo. Tal entendimento reforça a necessidade de construção de políticas públicas e instrumentos jurídicos capazes de articular essas dimensões de forma sistêmica, evitando abordagens fragmentadas que comprometam sua concretização.

Nesse contexto, uma das manifestações mais evidentes da articulação entre as dimensões do desenvolvimento sustentável pode ser observada na gestão de resíduos tecnológicos de alta complexidade. A logística reversa das baterias de veículos elétricos constitui exemplo emblemático dessa integração, ao promover o uso racional dos recursos naturais, estimular a inovação e a geração de valor econômico na cadeia produtiva e contribuir para a mitigação de riscos à saúde e à qualidade de vida.

Conforme explicitam Pereira *et al.* (2022, p. 221-222), o aumento populacional e a intensificação dos padrões de consumo contemporâneos têm provocado crescimento significativo na geração de resíduos, o que evidencia a urgência de estratégias integradas para o enfrentamento dessa problemática. Nesse sentido, a Lei nº 12.305/2010 estabelece diretrizes fundamentais ao instituir a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, conferindo base jurídica à atuação dos diversos setores sociais na gestão adequada de resíduos perigosos, como as baterias de veículos elétricos.

1.7.3 A Agenda 2030 e a Consolidação de um Paradigma Global de Sustentabilidade

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável constitui um plano de ação global orientado à erradicação da pobreza, à proteção do meio ambiente e à promoção da paz, da justiça e da prosperidade, estabelecendo diretrizes para o desenvolvimento sustentável até o ano de 2030 (ONU, 2015, p. 1). Estruturada em 17 ODS, essa agenda propõe uma abordagem integrada, que busca equilibrar as dimensões econômica, social e ambiental, assegurando que nenhum indivíduo ou região seja excluído desse processo de transformação global.

Nesse contexto, os ODS configuram um referencial normativo e programático de alcance universal, orientando a formulação de políticas públicas e a adoção de práticas voltadas à sustentabilidade em diferentes escalas, com uma estrutura interdependente de objetivos propostos e a necessidade de atuação coordenada entre múltiplos atores sociais e institucionais.

A partir da análise dos 17 ODS, observa-se que a Agenda 2030 abrange um conjunto amplo de metas que vão desde a erradicação da pobreza e da fome até a promoção da saúde, da educação, da igualdade de gênero, da inovação e da sustentabilidade ambiental, evidenciando a natureza multidimensional do desenvolvimento sustentável. Esses objetivos demandam articulação entre diferentes setores da sociedade e níveis de governança, reforçando a necessidade de integração entre políticas econômicas, sociais e ambientais (ONU, 2015, p. 18-19).

Além disso, a Agenda 2030 se estrutura em cinco dimensões fundamentais – pessoas, planeta, prosperidade, paz e parceria – que orientam as ações globais e evidenciam a interdependência entre os diferentes eixos do desenvolvimento, reforçando a compreensão de que a promoção do bem-estar humano, a proteção dos recursos naturais e o fortalecimento das instituições devem ocorrer de forma simultânea e coordenada (ONU, 2015, p. 2).

Dessa forma, a Agenda 2030 consolida um compromisso internacional voltado à transformação das bases do desenvolvimento, integrando dimensões sociais, econômicas, ambientais e institucionais em um modelo orientado pela sustentabilidade. Trata-se, nesse sentido, da consolidação de um novo paradigma global de desenvolvimento, que representa uma inflexão em relação à lógica tradicional de crescimento econômico dissociado dos limites ecológicos e da justiça social, ao estabelecer uma abordagem integrada, inclusiva e intergeracional. Esse paradigma se fundamenta na compreensão de que o desenvolvimento sustentável não pode ser alcançado de forma fragmentada, exigindo a articulação entre políticas públicas, governança multinível e responsabilidade compartilhada entre Estados, mercado e sociedade civil.

Por fim, Barbieri (2020, p. 182) destaca que os ODS constituem um conjunto integrado e indivisível de prioridades globais, cuja implementação depende da adaptação às realidades nacionais, permitindo que cada país estabeleça metas compatíveis com suas condições específicas. Tal flexibilidade normativa é essencial para a construção de estratégias eficazes e contextualizadas de desenvolvimento sustentável.

1.7.4 O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 e a Gestão de Resíduos

O ODS 12, integrante da Agenda 2030 das Nações Unidas, estabelece diretrizes voltadas à promoção de padrões sustentáveis de produção e consumo, com ênfase na gestão ambientalmente adequada de resíduos ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos e na redução significativa de sua geração por meio da prevenção, reciclagem e reuso (ONU, 2015).

No contexto das baterias de veículos elétricos, cuja destinação ainda carece de regulamentação específica no Brasil, essas metas assumem especial relevância, ao evidenciarem a necessidade de mecanismos eficazes para o gerenciamento de resíduos complexos e potencialmente perigosos. Diante disso, a gestão de resíduos sólidos se configura como um dos principais desafios à efetivação do ODS 12, exigindo a atuação integrada entre o Poder Público, o setor produtivo e a sociedade civil.

No âmbito da atividade econômica, Oliveira e Ferreira (2021, p. 309) destacam que a indústria desempenha papel central no ciclo produtivo, sendo responsável pela produção de uma ampla diversidade de bens essenciais à sociedade contemporânea, além de representar parcela significativa da economia nacional. Tal protagonismo implica diferentes formas de interação com os recursos naturais, exigindo a adoção de práticas sustentáveis compatíveis com as especificidades de cada setor. A partir dessa perspectiva, compreende-se que o setor industrial, ao depender intensamente dos recursos naturais, assume responsabilidades relevantes quanto à mitigação dos impactos ambientais decorrentes de seus processos produtivos, devendo incorporar estratégias voltadas à sustentabilidade.

No contexto da intensificação da produção e do consumo, Lourenço (2019, p. 31-32) observa que os resíduos sólidos passam a ser compreendidos não somente como rejeitos, mas como recursos com potencial valor econômico, sobretudo em razão dos avanços tecnológicos nos processos de reaproveitamento. Essa mudança de paradigma implica uma reconfiguração na forma de gestão dos resíduos, favorecendo sua reinserção no ciclo produtivo.

Conforme destacam Pereira *et al.* (2022, p. 221-222), o crescimento da geração de resíduos está diretamente relacionado ao aumento populacional e aos padrões de consumo da sociedade contemporânea, gerando impactos ambientais, sociais e econômicos significativos. Tal realidade reforça a necessidade de abordagens integradas para a gestão dos resíduos. Nesse contexto, a PNRS constitui um instrumento fundamental ao estabelecer diretrizes para a prevenção, redução e destinação adequada dos resíduos, além de instituir o princípio da responsabilidade compartilhada entre cidadãos, empresas e poder público, elemento essencial para a efetividade da gestão ambiental.

No âmbito das indústrias de alta tecnologia, Telles (2022, p. 108-109) destaca que, embora essas atividades sejam frequentemente associadas a uma imagem ambientalmente favorável, produzem resíduos complexos e potencialmente perigosos, especialmente no caso dos equipamentos eletroeletrônicos. A gestão desses resíduos demanda tecnologias avançadas e políticas públicas eficazes, diante dos riscos ambientais associados ao seu descarte inadequado.

Paralelamente, a Agenda 2030 também enfatiza, por meio do ODS 9, a importância da inovação tecnológica e da industrialização sustentável, incentivando a modernização dos processos produtivos e o desenvolvimento de tecnologias limpas, especialmente em países em desenvolvimento (ONU, 2015, p. 4-5).

No contexto urbano, Barbieri (2020, p. 201) ressalta que a sustentabilidade das cidades constitui elemento central do desenvolvimento sustentável, uma vez que os espaços urbanos concentram grande parte das atividades humanas e dos impactos ambientais associados. Nesse cenário, a evolução da mobilidade elétrica se insere como parte de uma transformação estrutural mais ampla. Conforme destacam Capell e Carvalho (2025, p. 5), o avanço dos veículos elétricos resulta não apenas de inovações tecnológicas, mas também de mudanças nas percepções sociais e ambientais relacionadas ao transporte, impulsionadas por preocupações com a poluição e as mudanças climáticas.

A análise do ciclo de vida desses veículos aponta, contudo, que os impactos ambientais não se restringem à fase de uso, abrangendo também a extração de matérias-primas, a produção e o descarte final. Nesse sentido, Capell e Carvalho (2025) ressaltam que a mineração de elementos como lítio, cobalto e níquel pode gerar impactos significativos, ao passo que a reciclagem e a inovação tecnológica se apresentam como alternativas para a mitigação desses efeitos. Dessa forma, a eletromobilidade revela uma dualidade: ao mesmo tempo em que contribui para a redução de emissões, impõe desafios relevantes quanto à gestão de resíduos, especialmente no que se refere às baterias.

Nesse contexto, a logística reversa se destaca como instrumento essencial para a concretização das metas do ODS 12, especialmente no que se refere à gestão de resíduos de alta complexidade. Todavia, a ausência de regulamentação específica no ordenamento jurídico brasileiro para a logística reversa das baterias de veículos elétricos compromete a efetividade dessas metas, evidenciando a necessidade de aprimoramento do marco normativo nacional.

2 ELETROMOBILIDADE SUSTENTÁVEL E O MARCO LEGAL DA LOGÍSTICA REVERSA: ENTRE A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A RESPONSABILIDADE AMBIENTAL

A intensificação das mudanças climáticas e a elevação das temperaturas globais consolidaram o setor de transportes como um dos principais vetores de emissão de GEE, especialmente em contextos urbanos marcados pela dependência de combustíveis fósseis (IPCC, 2022). Nesse cenário, a eletromobilidade emerge como estratégia relevante de mitigação climática, alinhada aos compromissos internacionais de redução de emissões e às políticas nacionais de transição energética.

2.1 Evolução Histórica da Mobilidade Elétrica e sua Reconfiguração no Contexto Climático

A história do automóvel moderno, consolidada com a criação do Benz Patent Motorwagen em 1886, considerado o primeiro carro com motor de combustão interna movido a gasolina, marca o início da mobilidade motorizada moderna (Sérvio, 2023). No entanto, paralelamente ao desenvolvimento dos veículos a combustão, já se observavam iniciativas experimentais voltadas à mobilidade elétrica.

Segundo Capell e Carvalho (2025, p. 2-3), os primeiros protótipos de veículos elétricos surgiram no início do século XIX. Em 1828, o húngaro Ányos Jedlik desenvolveu um pequeno motor elétrico e, em 1834, o norte-americano Thomas Davenport construiu um modelo funcional utilizando uma bateria não recarregável. Posteriormente, nomes como o escocês Robert Anderson e empresas como a Baker Motor Vehicle Company contribuíram para a popularização dos veículos elétricos no final do século XIX, sobretudo em áreas urbanas, devido à operação silenciosa e à facilidade de condução.

Conforme ilustrado na Figura 1, após obter sua patente em 1837, Thomas Davenport passou a buscar compradores para seu motor elétrico, instalando-o em um pequeno trem que operava em sua propriedade. Em 1840, a mesma tecnologia foi utilizada para imprimir o periódico *The Electro-Magnetic and Mechanics Intelligencer*, considerada a primeira impressão realizada por meio de um motor elétrico. O inventor também desenvolveu um primitivo carro elétrico sobre trilhos, que serviu como protótipo para o posterior surgimento dos bondes elétricos nas décadas seguintes (Landrigan, s.d.).



Figura 1 – Protótipo do primeiro carro elétrico desenvolvido por Thomas Davenport no século XIX, operando por meio de motor elétrico sobre trilhos.

Fonte: Extraída de Landrigan, [s.d.].

Santos (2022, p. 20-21) destaca que o uso da eletrificação no setor de transportes remonta ao período em que os trens eletrificados eram empregados, inclusive, para o transporte de carvão. Na experiência suíça, a escassez de recursos fósseis naturais impulsionou a rápida eletrificação de sua malha ferroviária, consolidando um modelo de transporte baseado em fontes alternativas. Paralelamente, registra-se que uma das primeiras baterias recarregáveis, a de níquel-ferro, foi desenvolvida por Thomas Edison (1847-1931) e aplicada em veículos elétricos experimentais, em um contexto marcado por avanços tecnológicos significativos.

A operação ferroviária eletrificada já utilizava sistema de alimentação por cabos aéreos, responsável pela transferência de energia elétrica por meio de hastes coletoras. Nesse cenário inicial, os veículos elétricos despontaram como uma das primeiras formas de automóvel. Registraram, inclusive, índices expressivos de velocidade e autonomia antes da difusão da iluminação elétrica e do advento dos motores de combustão interna. No início do século XX, empresas como Baker Electric, Columbia Electric e Detroit Electric foram responsáveis pela produção desses veículos, de modo que, em 1900, cerca de 28% da frota de automóveis em circulação nos Estados Unidos era composta por modelos elétricos (Santos, 2022, p. 20-21).

Conforme Capell e Carvalho (2025, p. 2-3), a ascensão do motor a combustão, o barateamento dos combustíveis fósseis e a linha de montagem criada por Henry Ford em 1913

contribuíram para o declínio desses veículos elétricos por várias décadas. No entanto, as crises energéticas dos anos 1970 e o aumento das preocupações ambientais reacenderam o interesse por alternativas sustentáveis, abrindo caminho para a atual transição tecnológica no setor automotivo. Diferentemente do período inicial, a retomada contemporânea da mobilidade elétrica se insere no contexto da governança climática internacional e das políticas públicas de descarbonização, conferindo-lhe novo significado jurídico-ambiental no âmbito das políticas globais de mitigação climática.

2.2 Veículos Elétricos como Resposta à Crise Climática

Sartori *et al.* (2020, p. 23) afirmam que, a partir do século XX, intensificaram-se as reflexões sobre os impactos do modelo econômico baseado predominantemente no crescimento industrial e na acumulação de capital. Essa lógica, herdada da Revolução Industrial, promoveu uma visão instrumental da natureza, relegando o ser humano a um papel secundário diante da primazia da produção. Essa análise revela o esgotamento de um modelo que desconsidera os limites ecológicos do planeta, exigindo, nas décadas seguintes, uma profunda revisão dos paradigmas de desenvolvimento e a incorporação de princípios voltados à sustentabilidade e à justiça ambiental.

Nesse cenário de reavaliação das bases do desenvolvimento, a eletromobilidade emerge como uma resposta tecnológica e regulatória à crise climática. Segundo Quirino (2023, p. 7), a expansão do mercado de veículos elétricos em escala global resulta da conjugação de fatores normativos, econômicos, tecnológicos e sociais. Destacam-se o fortalecimento das regulações estatais voltadas à redução das emissões de carbono, a adoção de incentivos financeiros à aquisição desses veículos, os avanços tecnológicos no desenvolvimento das baterias e a crescente conscientização ambiental dos consumidores. Tais elementos, articulados, explicam o ritmo acelerado de difusão da eletromobilidade como alternativa ao modelo tradicional de transporte baseado em combustíveis fósseis.

No contexto brasileiro, a transição para a eletromobilidade apresenta condições estruturais favoráveis, especialmente em razão da matriz elétrica predominantemente de baixo carbono, da disponibilidade de recursos minerais estratégicos para a produção de baterias e da consolidação de uma indústria automotiva nacional relevante. Conforme análise divulgada pela Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), a eletricidade já se mostra economicamente mais competitiva em relação aos combustíveis fósseis, fator que tende a impulsionar a demanda

por veículos elétricos à medida que os consumidores percebam os ganhos associados à economia operacional (ABVE, 2026).

Embora a adoção do sistema *flex-fuel* (mistura de etanol e gasolina) tenha contribuído historicamente para a redução das importações de petróleo no país, a dependência estrutural do transporte rodoviário em relação aos combustíveis fósseis permanece significativa. Assim, a eletrificação da mobilidade é apontada como alternativa estratégica para o fortalecimento da segurança energética, a redução de custos no longo prazo e a efetiva descarbonização do setor de transportes, reforçando o papel dos veículos elétricos como instrumento relevante de mitigação climática (ABVE, 2026).

Contudo, a efetividade ambiental da eletromobilidade está condicionada à gestão adequada do ciclo de vida das baterias e à estruturação de instrumentos jurídicos para a governança de seus resíduos.

2.2.1 A Intensificação do Efeito Estufa e a Elevação das Temperaturas Globais

O balanço energético no Topo da Atmosfera (TOA – *Top of the Atmosphere*) expressa a quantidade líquida de energia que ingressa ou é devolvida pelo sistema climático terrestre. As variações desse balanço podem ser monitoradas por meio de observações de satélite dos fluxos radiativos no TOA, pela análise do acúmulo de energia no sistema climático e pela observação dos fluxos energéticos na superfície. Quando esse equilíbrio é modificado por causas naturais ou antrópicas, denominadas forçamentos radiativos, o sistema climático responde por meio de processos de aquecimento ou resfriamento, refletindo o ganho ou a perda de energia. A compreensão das alterações nos fluxos de energia da Terra é fundamental para a explicação dos principais processos físicos que impulsionam as mudanças climáticas, além de constituir um parâmetro essencial para a validação dos modelos climáticos e de suas projeções futuras (IPCC, 2021).

2.2.2 Acordos Internacionais sobre Clima: Protocolo de Quioto

No contexto das negociações climáticas internacionais, um marco importante foi estabelecido em 1997, com a criação de um instrumento vinculante que visava dar efetividade à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Assim, o Protocolo de Quioto foi elaborado com a finalidade de regulamentar a Convenção Climática, estabelecendo metas específicas de redução das emissões de seis dos principais gases responsáveis pelo efeito

estufa: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs), a serem cumpridas pelos países desenvolvidos que viessem a ratificar o instrumento internacional (Ipam Amazônia, s.d.).

Nesse contexto, o Protocolo de Quioto consolidou um marco inicial da governança climática global ao introduzir compromissos internacionais mensuráveis de mitigação, contribuindo para a estruturação de políticas ambientais nacionais orientadas pela redução das emissões e pela responsabilidade compartilhada entre os Estados.

2.2.3 O Papel do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa

No contexto das mudanças climáticas, a organização do espaço urbano e dos sistemas de mobilidade assume papel central, razão pela qual a análise do setor de transportes demanda aproximação com os fundamentos do Direito Urbanístico. A abordagem desse campo jurídico exige a consideração de dois pilares: sua base fática, relacionada ao fato urbano, e sua base jurídica, estruturada no Brasil pela CRFB/1988, pelo Estatuto da Cidade e por normas complementares.

Conforme destaca Tietzmann e Silva (2020, p. 124), observa-se um descompasso entre o ordenamento jurídico vigente e a realidade urbana, sobretudo nos países em desenvolvimento. Mais da metade da população mundial reside em áreas urbanas, sendo que, no Brasil, esse número alcança aproximadamente 85%, circunstância que potencializa problemas estruturais como deficiência de saneamento, falhas na mobilidade urbana, insegurança e riscos socioambientais diversos, diretamente relacionados à ausência de planejamento urbano adequado.

Nesse contexto, a mobilidade urbana constitui ponto de convergência entre planejamento urbano e política climática, uma vez que a organização espacial das cidades influencia diretamente os padrões de deslocamento e o nível de emissões associadas ao transporte, conforme se depreende das análises sobre organização urbana e mobilidade sustentável (Tietzmann e Silva, 2020; Lopes *et al.*, 2020; IPCC, 2022).

Nessas circunstâncias, o setor de transportes se consolida como um dos principais vetores de pressão ambiental nos centros urbanos, uma vez que os padrões de deslocamento influenciam diretamente o consumo energético e as emissões de GEE (IPCC, 2022).

Segundo Lopes *et al.* (2020, p. 561, 1185), o conceito de mobilidade urbana sustentável abrange três dimensões fundamentais: ambiental, econômica e social. A dimensão ambiental prioriza os deslocamentos não motorizados e de baixo impacto ambiental, como caminhar e

pedalar, bem como a implantação de sistemas de transporte limpos e integrados. A dimensão econômica se relaciona ao equilíbrio financeiro e à eficiência dos sistemas de mobilidade, enquanto a dimensão social busca assegurar inclusão, acessibilidade e equidade no uso do espaço urbano.

A mobilidade urbana apresenta dois aspectos críticos no tocante à mudança climática: as emissões diretas de poluentes decorrentes do uso de veículos motorizados e a matriz energética que sustenta o setor de transportes. Nas cidades brasileiras, o transporte urbano é apontado como um dos principais responsáveis pela degradação da qualidade do ar, sobretudo em razão do uso intensivo de veículos individuais, cuja média de ocupação raramente ultrapassa duas pessoas. Ônibus movidos a diesel, embora utilizem combustível mais poluente que a gasolina, transportam maior número de passageiros por viagem, reduzindo proporcionalmente os impactos ambientais.

A origem do combustível também interfere diretamente na poluição gerada: os derivados de combustíveis fósseis são finitos e altamente danosos ao meio ambiente, enquanto alternativas como o etanol, embora também emitam gases tóxicos, são provenientes de fonte renovável. Nesse contexto, reforça-se a importância de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana sustentável, como demonstram Lopes *et al.* (2020, p. 561, 1185). Esses elementos explicitam que o impacto climático do transporte urbano está diretamente relacionado ao modelo de mobilidade adotado, evidenciando a necessidade de transição para sistemas energéticos e tecnológicos de menor emissão.

O Estatuto da Cidade não disciplina de forma específica a temática da mobilidade urbana, limitando-se a estabelecer, em seu art. 41, inciso VI, § 2º, que os municípios com população superior a 500 mil habitantes devem elaborar um plano de transporte urbano integrado, compatível com o Plano Diretor ou nele inserido. Segundo Schwambach (2022, p. 43), a ausência de diretrizes mais específicas sobre esse tema levou à criação da Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012, que instituiu a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) e passou a definir, além da obrigatoriedade, o conteúdo mínimo e as diretrizes a serem observadas nesses planos.

Evidencia-se como a legislação brasileira evoluiu ao reconhecer as lacunas deixadas pelo Estatuto da Cidade e, a partir disso, instituiu um novo marco normativo com diretrizes mais específicas e estruturadas sobre mobilidade urbana, reforçando a importância do planejamento integrado para os centros urbanos, como descreve Schwambach (2022, p. 43). A PNMU estabelece princípios, objetivos e instrumentos para o planejamento e a gestão dos sistemas de mobilidade nas cidades brasileiras. Destaca-se o art. 6º, inciso V, que prevê o

“incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico e ao uso de energias renováveis e menos poluentes”.

Para Lopes *et al.* (2020, p. 1045), essa diretriz “está ligada à eficiência energética na Mobilidade Urbana, sob o enfoque da abordagem de aumento da eficiência nos modos existentes, por meio da melhoria do sistema de transporte ou da tecnologia atualmente empregada e pelo uso de energia menos poluente”. Em alinhamento com esse entendimento, a norma busca fomentar a adoção de práticas e tecnologias que reduzam os impactos ambientais do transporte urbano, promovendo maior eficiência energética nos sistemas de mobilidade.

Lopes *et al.* (2020) também discutem a relação entre as fontes de energia utilizadas nos veículos motorizados e seus impactos ambientais. Os autores apontam que os combustíveis fósseis são altamente prejudiciais, tanto por emitirem poluentes tóxicos quanto por serem fontes não renováveis. Em contraposição, o etanol, embora também gere emissões, é derivado de fonte vegetal renovável, como a cana-de-açúcar. No que se refere aos veículos elétricos, reconhecem-se os ganhos ambientais em termos de emissões, especialmente em países como o Brasil, cuja matriz energética é majoritariamente composta por fontes limpas, o que torna essa substituição vantajosa do ponto de vista da sustentabilidade.

Ressalta-se, portanto, que o setor de transportes desempenha papel central na mitigação climática, sendo a eletrificação da mobilidade urbana uma alternativa relevante para a redução das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2022; Lopes *et al.*, 2020). Todavia, a substituição tecnológica dos veículos a combustão não elimina integralmente os impactos ambientais associados ao setor de transportes, uma vez que parte desses impactos é deslocada para a cadeia produtiva das baterias. Nesse contexto, emerge a necessidade de instrumentos jurídicos capazes de disciplinar o ciclo de vida desses componentes e a gestão ambiental de seus resíduos.

2.2.4 A Descarbonização da Indústria Automotiva e a Matriz Energética Global e Brasileira

A análise da matriz energética da indústria automotiva é essencial, pois os benefícios climáticos da eletromobilidade dependem também das condições energéticas de sua produção. Para Bednarski (2023), a descarbonização da indústria automotiva transcende a adoção de tecnologias voltadas exclusivamente para os motores, abrangendo também a transformação dos processos produtivos nas fábricas de montadoras e fornecedores. Conforme mencionado anteriormente, o Brasil apresenta uma posição de destaque em relação a outros países, em virtude da expressiva participação de fontes renováveis em sua matriz elétrica.

Esse desempenho está diretamente relacionado à disponibilidade de fontes como a hídrica, historicamente predominante, e ao crescimento de alternativas como energia eólica, solar e biomassa, além de fontes de baixa emissão de carbono, como a energia nuclear, conforme informações divulgadas por Bednarski (2023) em matéria especializada sobre o setor automotivo.

Ainda no Brasil, verifica-se a adoção crescente de soluções energéticas sustentáveis por parte da indústria automotiva. Dentre as práticas mais consolidadas estão a instalação de painéis fotovoltaicos em áreas internas das fábricas, como telhados ou terrenos ociosos, os quais viabilizam a geração de energia limpa e a compensação de consumo por meio do sistema nacional. Além disso, observa-se a expansão das chamadas fazendas solares, estruturas de geração instaladas em áreas rurais que fornecem energia a diversos consumidores, incluindo empresas do setor automotivo, que podem atuar como investidoras ou apenas compradoras da energia gerada. Tais iniciativas evidenciam a incorporação progressiva de estratégias empresariais alinhadas à transição energética e à redução das emissões no âmbito industrial. (Bednarski, 2023).

Dados comparativos sobre a composição da matriz energética indicam diferenças relevantes entre países e blocos econômicos no que se refere à participação de fontes renováveis na indústria instalada. Observa-se que o Brasil apresenta percentual aproximado de 83% de energia limpa em sua matriz elétrica, valor significativamente superior à média global, estimada em cerca de 38%. A China apresenta participação intermediária, enquanto economias como Estados Unidos e União Europeia registram percentuais inferiores, evidenciando maiores desafios estruturais para a descarbonização industrial. Esses dados reforçam o protagonismo brasileiro na utilização de energias renováveis e indicam, simultaneamente, a necessidade de diversificação e modernização das fontes energéticas nacionais, visando reduzir a vulnerabilidade a crises hídricas e potencializar a sustentabilidade do setor energético. (Bednarski, 2023).

Apesar dos avanços na descarbonização industrial, os impactos climáticos do setor automotivo ainda se concentram no uso de veículos movidos a combustíveis fósseis, tornando necessária a análise das emissões do transporte e da transição para alternativas de baixa emissão.

2.2.5 Emissões de CO₂ por Veículos a Combustão: Dados e Estatísticas

Segundo Prota de Sá (2021, p. 141), o carbono compõe dois dos principais GEE: o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Ambos são naturalmente emitidos, mas também

resultam de atividades antrópicas que, ao longo das últimas décadas, intensificaram drasticamente sua concentração na atmosfera. Juntos, esses dois gases respondem por cerca de 80% dos impactos associados ao agravamento do aquecimento global.

Durante grande parte da história geológica da Terra, o ciclo do carbono se manteve em equilíbrio. Contudo, esse equilíbrio foi comprometido com o advento da Revolução Industrial e o uso intensivo de combustíveis fósseis. A queima de petróleo, carvão mineral e gás natural – substâncias armazenadas no subsolo durante milhares de anos – passou a ser praticada em larga escala para atender às crescentes demandas por energia, transporte e consumo (Prota de Sá, 2021, p. 143-144).

Entre os vetores mais relevantes dessa transformação estão os meios de transporte motorizados, como automóveis, caminhões, aviões, navios e trens, que passaram a ser movidos por derivados do petróleo. O autor destaca que esses modais, ao utilizarem combustíveis fósseis como gasolina, diesel, querosene e gasolina de aviação, contribuíram diretamente para a introdução de volumes massivos de carbono na atmosfera. Segundo dados analisados por Prota de Sá (2021, p. 146), o consumo mundial de petróleo ultrapassa 100 milhões de barris por dia e cada barril contém cerca de 110 kg de carbono. Considerando-se que 1 kg de carbono emitido gera aproximadamente 3,664 kg de CO₂, o impacto das emissões oriundas do setor de transportes se revela expressivo e preocupante.

A quantificação e a caracterização das fontes móveis de emissão de poluentes atmosféricos constituem instrumentos essenciais para subsidiar políticas públicas ambientais e aprimorar a gestão do transporte e do trânsito nos centros urbanos. A partir desse diagnóstico, torna-se possível desenvolver estratégias mais precisas e eficazes para o controle das emissões, priorizando a atuação sobre os modais e agentes que apresentam maior contribuição para a degradação da qualidade do ar (Carvalho, 2011 p. 7).

2.3 A Eletromobilidade como Estratégia de Mitigação

2.3.1 Evolução dos Veículos Elétricos

O ressurgimento dos veículos elétricos na era contemporânea é representativo dos avanços tecnológicos e da transformação nas percepções sociais e ambientais acerca da mobilidade. Desde a década de 1990, a conjugação de crises energéticas, das preocupações com a poluição atmosférica e do aquecimento global tem moldado um novo cenário para o transporte sustentável. Conforme destaca Capell e Carvalho (2022, p. 5), esse contexto é marcado por

inovações que consolidaram os veículos elétricos como uma alternativa viável e socialmente desejável, impulsionando o seu protagonismo na transição energética.

A respeito disso, sustentam Castro e Ferreira (2010, p. 269): “Há três fatores principais responsáveis pelo crescente interesse nos veículos elétricos: a superação de entraves tecnológicos, as preocupações com o meio ambiente e com a segurança energética dos países”. Nesse contexto, esses fatores explicam o aumento do interesse global pelos veículos elétricos e sua inserção como alternativa relevante para o setor de transportes.

De acordo com Baran e Legey (2011, p. 214), no início da história do automóvel, as viagens eram limitadas pela inexistência de infraestrutura elétrica e postos de gasolina nas estradas do interior. Os autores destacam que a maior eficiência do motor a combustão interna (km/l), combinada à distribuição de combustíveis líquidos por pequenos estabelecimentos, impulsionou o rápido crescimento da rede de abastecimento. Ressaltam, ainda, que a simplicidade mecânica dos primeiros veículos permitia que mecânicos especializados em bicicletas realizassem a manutenção, favorecendo a difusão dos automóveis a combustão. Já os carros elétricos e híbridos, por dependerem de motores elétricos e baterias, sofreram com a falta de profissionais qualificados, o que limitou sua disseminação.

Baran e Legey (2011) também observam que o boca a boca teve papel importante na popularização dos veículos a combustão. A partir da década de 1930, a produção de veículos elétricos diminuiu e passou a se restringir a nichos como coleta de lixo, entregas e distribuição de leite nos Estados Unidos e Reino Unido, com picos durante as guerras mundiais por força do racionamento de combustíveis. No Japão do pós-guerra, os carros elétricos ganharam popularidade temporária por causa do racionamento, mas perderam espaço ao ser normalizado o abastecimento na década de 1950.

2.3.2 Tipologias Tecnológicas dos Veículos Elétricos

Goulart (2023) orienta que, nos últimos anos, está ocorrendo uma transformação profunda na indústria automobilística, provocada pelo avanço e pela crescente popularidade dos veículos elétricos (VEs). O autor destaca três tipologias tecnológicas principais de veículos elétricos: Veículo Elétrico a Bateria (BEV), Veículo Híbrido Plug-In (PHEV) e Veículo Elétrico Híbrido (HEV).

Os BEV são movidos exclusivamente por energia elétrica armazenada em baterias recarregáveis, não possuindo motor a combustão interna. Os PHEV combinam motor elétrico e motor a combustão, permitindo a recarga externa da bateria e a operação em modo

exclusivamente elétrico por determinadas distâncias. No âmbito dessas tipologias, os HEV utilizam motor elétrico auxiliar alimentado por recarga interna durante o funcionamento do veículo, dispensando a conexão direta à rede elétrica para carregamento (ABVE, 2025).

Independentemente da configuração tecnológica adotada, observa-se que o funcionamento dos veículos eletrificados depende diretamente de sistemas avançados de armazenamento de energia, predominantemente baseados em baterias de íon-lítio, cuja expansão em larga escala passa a gerar novos desafios ambientais e regulatórios.

2.4 A Mineração de Lítio e seus Impactos Jurídicos, Geopolíticos e Ambientais: Desafios para a Sustentabilidade e a Responsabilidade Socioambiental

2.4.1 Geopolítica do Lítio

A transição para tecnologias de energia limpa implica uma demanda crescente por minerais estratégicos. De acordo com o Banco Mundial (World Bank, 2024), a produção de substâncias como “grafite, lítio e cobalto” poderá aumentar em quase “500% até 2050”, a fim de atender às necessidades do processo de descarbonização global. Nesse contexto, a instituição desenvolveu a abordagem denominada “Mineração Inteligente para o Clima” (*Climate-Smart Mining*), em conformidade com os ODS da ONU. O propósito é assegurar que a transição energética e a descarbonização dos setores de mineração e energia também resultem em benefícios concretos para os países detentores de recursos minerais e para as comunidades diretamente impactadas por sua extração. Ainda segundo o Banco Mundial (2024), essa iniciativa busca “garantir que os países em desenvolvimento ricos em recursos naturais também se beneficiem da nova demanda mineral”, mitigando riscos de investimento por meio de “estratégias sustentáveis e responsáveis” de exploração e gestão de recursos.

Segundo Sanderson e Schipani (2016, n.p.), a Bolívia realizou, em 2016, o primeiro embarque de carbonato de lítio para a China, composto por quase 10 toneladas avaliadas em aproximadamente US\$ 70.000. O envio foi considerado um marco simbólico, representando a inserção do país no mercado internacional do mineral, ainda que sem relevância econômica imediata. A Bolívia possui reservas estimadas em 9 milhões de toneladas, o que a posiciona como detentora do maior potencial mundial de lítio. Entretanto, enfrenta barreiras técnicas e econômicas que dificultam sua competitividade: os depósitos bolivianos apresentam concentração de magnésio três vezes superior à dos chilenos, o que eleva os custos de refino, e

suas salinas registram taxa de evaporação mais baixa, reduzindo a eficiência do processo de extração.

Os autores citados ressaltam que o país integra o denominado triângulo do lítio, juntamente com Chile e Argentina, região que concentra grande parte da produção global e cuja importância geopolítica tem crescido diante da transição energética. Nessa região, o lítio se encontra dissolvido em salmouras subterrâneas localizadas sob as salinas do deserto. O processo de extração consiste no bombeamento dessa salmoura para grandes lagoas, onde permanece por vários meses em evaporação até resultar em carbonato de lítio bruto, que é posteriormente refinado e misturado a outros elementos para compor os cátodos de baterias de íons de lítio.

Ainda conforme Sanderson e Schipani (2016, n.p.), a Bolívia buscava superar a condição de mera exportadora de matéria-prima, projetando-se como futura produtora de baterias e veículos elétricos. Para tanto, a estatal mineradora Comibol implementou uma planta piloto nas margens do deserto do Salar de Uyuni, com investimento de US\$ 19 milhões, voltada à produção de carbonato de lítio e cloreto de potássio. As metas estabelecidas incluíam a exportação de 10.000 toneladas de carbonato de lítio e 168.000 toneladas de cloreto de potássio até 2021, além de 5.000 toneladas de cátodos de lítio no mesmo período.

No âmbito do triângulo do lítio, verifica-se que o Chile se consolidou como principal fornecedor global devido à qualidade de suas reservas e à eficiência de seus processos de extração, enquanto a Argentina expandia rapidamente sua produção por meio de investimentos internacionais. A Bolívia, embora detentora do maior volume estimado de reservas, permanecia em posição secundária em razão dos entraves tecnológicos, institucionais e econômicos que retardavam sua competitividade no mercado internacional (Sanderson e Schipani, 2016).

Williams (2026) destaca que investidores interessados no setor de lítio devem ampliar sua atenção para empresas listadas na Austrália e na China, países que assumiram papel central na cadeia global. A Austrália se consolidou há décadas como o maior produtor de lítio, enquanto a China, além de se tornar a maior refinadora e processadora, também alcançou a terceira posição em produção mineral, ficando atrás apenas da Austrália e do Chile. Esse cenário evidencia que a expansão da eletromobilidade depende diretamente da reorganização geopolítica dos minerais críticos, especialmente do lítio, cuja exploração passa a ocupar posição central na transição energética global.

2.4.2 O Lítio como Mineral Estratégico na Transição Energética

Conforme diretrizes do Ministério de Minas e Energia, os minerais críticos são aqueles indispensáveis para setores estratégicos da economia, cuja oferta pode estar sujeita a riscos de suprimento. Nesse cenário, o lítio integra o conjunto de minerais críticos prioritários no Brasil, sendo objeto de políticas públicas voltadas ao fortalecimento da cadeia produtiva e à inserção do país no mercado global de insumos para a descarbonização (Brasil, 2025). Tal protagonismo decorre não somente de sua ampla aplicação tecnológica, mas devido ao potencial geológico nacional, que possibilita a expansão da exploração mineral e da industrialização associada.

No contexto da transição energética global, o lítio se consolida como mineral crítico e estratégico, essencial à viabilização de tecnologias de baixo carbono, especialmente na produção de baterias destinadas aos veículos elétricos e aos sistemas de armazenamento de energia. O Brasil possui importantes reservas de lítio, com destaque para o estado de Minas Gerais, na região conhecida como Vale do Lítio, que abrange os municípios de Araçuaí e Itinga, no Vale do Jequitinhonha. Nessa área, encontram-se minerais como espodumênio, ambligonita, lepidolita e petalita, que representam as principais fontes de lítio em território nacional, conferindo à região papel estratégico na transição energética e tecnológica. Além das jazidas mineiras, registram-se ocorrências relevantes no estado do Ceará, notadamente nos municípios de Quixeramobim e Solenópole, evidenciando o potencial de expansão da exploração em outras regiões do país (Minérios & Minerales, 2025).

O mercado global de lítio apresenta perspectiva de crescimento acelerado, com estimativas de significativa ampliação da demanda até 2030, impulsionada pela transição para energias limpas. Nesse contexto, destacam-se oportunidades para o Brasil, como a atração de investimentos, o fortalecimento da industrialização local e o desenvolvimento de cadeias produtivas de maior valor agregado. Por outro lado, persistem desafios estruturais, como a necessidade de infraestrutura adequada, o aprimoramento da regulação ambiental e a competitividade internacional frente a grandes produtores. No plano econômico, observa-se ainda a volatilidade do preço do lítio, influenciado pela dinâmica da demanda global (Minérios & Minerales, 2025).

Dessa forma, o protagonismo do lítio deve ser compreendido em articulação com a logística reversa prevista na Lei nº 12.305/2010. Contudo, a ausência de disciplina específica para baterias de veículos elétricos evidencia lacuna normativa relevante, diante da complexidade desse resíduo.

2.4.3 Externalidades Negativas da Mineração de Lítio

Para Ukpanah (2024), a mineração de lítio, responsável por quase 90% da produção global, concentra-se em regiões como Austrália, Chile, Argentina e China, além da participação de países como Zimbábue e Brasil, que juntos somaram uma produção de aproximadamente 170,8 mil toneladas em 2023. O autor destaca que, apesar de sua relevância estratégica para a transição energética e a eletromobilidade, o processo de extração, sobretudo por meio da mineração de salmoura, apresenta impactos ambientais expressivos, tais como poluição de recursos hídricos, perda de biodiversidade e elevadas emissões de GEE.

Ainda de acordo com Ukpanah (2024), estima-se que cada tonelada de lítio extraída resulte em 15 toneladas de dióxido de carbono lançadas na atmosfera, além de demandar cerca de 500.000 litros de água para atingir o volume de 2,2 milhões de litros por tonelada de lítio, o que intensifica a escassez hídrica em regiões áridas. Configura-se um paradoxo: embora o lítio seja essencial para a redução da dependência dos combustíveis fósseis e para o armazenamento de energias renováveis, a sua exploração indiscriminada pode gerar novos passivos ambientais e sociais, exigindo o fortalecimento da regulação internacional, a adoção de políticas públicas de mitigação, o incentivo à reciclagem e à logística reversa das baterias, bem como o investimento em alternativas tecnológicas que diminuam a dependência desse recurso mineral.

Segundo Carvalho (2024), a empresa Sigma produz “270 mil toneladas de lítio por ano” e os “entulhos descartados atingiram 560 mil metros quadrados de área e já vão invadindo os quintais da vila”. A autora relata ainda que “essa sinistra exploração vai espalhando por toda a região o pó das minas escavadas”, provocando doenças respiratórias incuráveis e graves problemas psíquicos na população local. Além disso, evidencia que “na obtenção do lítio há um processo de evaporação que exige 2 milhões de litros de água para cada tonelada de minério extraído”, o que afeta as bacias aquíferas, reduz a produção agrícola e compromete o consumo de água pelos moradores, bem como pelos animais domésticos e silvestres. As “detonações frequentes que produzem rachaduras nas casas e nas almas” são apresentadas como símbolo do sofrimento humano diante da degradação ambiental.

Carvalho conclui que os efeitos da exploração do lítio representam o retrato da contradição entre o discurso de sustentabilidade e a realidade destrutiva da mineração, demonstrando que a chamada transição energética ainda se apoia em modelos extrativistas que perpetuam desigualdades ambientais e sociais no Brasil (Carvalho, 2024). Dessa forma, observa-se que a expansão da cadeia produtiva do lítio, embora vinculada à transição

energética, evidencia a necessidade de mecanismos jurídicos capazes de prevenir, mitigar e compensar os impactos socioambientais decorrentes da atividade minerária.

2.4.4 Impactos Socioambientais da Exploração do Lítio

Nos processos neoextrativistas, como ocorre no Vale do Jequitinhonha, no estado de Minas Gerais, entre os municípios de Araçuaí e Itinga, especialmente na área da mina Grota do Cirilo, na exploração mineral do lítio, o primeiro impacto socioambiental observado é a “transformação da paisagem natural” (Campos, 2024). Conforme explica Campos (2024), essa alteração ocorre porque a principal forma de extração mineral empregada no Brasil é realizada por meio de minas a céu aberto, o que demanda a remoção da vegetação nativa e do solo fértil. Para a instalação de uma barragem, é necessário um desmatamento severo, que resulta na modificação profunda do ambiente natural e na perda de importantes funções ecológicas da região, afetando diretamente as comunidades locais e os ecossistemas do entorno.

A poluição atmosférica também é apontada como uma das consequências mais severas do modelo de extração mineral adotado no país, sendo mais perceptível quando as barragens são construídas próximas às comunidades. Nesses casos, conforme destaca Campos (2024), a poluição decorre da lama e da poeira transportadas das minas para as áreas habitadas por meio dos ônibus, caminhões e automóveis utilizados pelas mineradoras.

Ainda segundo a autora, “um dos principais desafios da mineração de lítio está relacionado à elevada demanda hídrica” (Campos, 2024), uma vez que o material é geralmente encontrado em regiões com pouca água. Para cada tonelada de lítio extraída, são necessários cerca de dois milhões de litros de água, o que significa que, para fabricar a bateria de um carro elétrico – que contém, em média, oito quilos de lítio – são utilizados aproximadamente 16.000 litros de água. A empresa Sigma Lithium, que atua na região desde o início de 2023, deve consumir aproximadamente 42 mil litros de água por hora, em um território já caracterizado pela escassez hídrica (Campos, 2024).

2.4.5 Aplicação do Princípio do Poluidor-Pagador na Exploração do Lítio no Brasil

A Lei nº 6.938/1981, que instituiu a PNMA, consolidou o princípio do poluidor-pagador como fundamento da responsabilidade ambiental no ordenamento jurídico brasileiro. Nos termos do artigo 4º, inciso VII, a política ambiental visa “à imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados, e ao usuário, da

contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos” (Brasil, 1981). Ressalta-se que toda atividade econômica potencialmente poluidora, como a mineração de lítio, deve internalizar os custos ambientais decorrentes de sua atuação, evitando a socialização dos prejuízos e assegurando a sustentabilidade do processo produtivo, conforme sustentam Machado (2022) e Leite e Ayala (2021).

A realidade observada na região do Vale do Jequitinhonha, no estado de Minas Gerais, evidencia a existência de múltiplas demandas sociais, ambientais e institucionais decorrentes da intensificação da atividade minerária, as quais refletem problemas estruturais historicamente presentes e agravados pelo avanço da exploração do lítio. Conforme demonstram os relatos das comunidades atingidas, tais demandas são amplas, complexas e interdependentes, exigindo a atuação coordenada do Poder Público e dos agentes econômicos envolvidos.

A partir das categorias analíticas propostas por Oliveira (2024), aplicadas às evidências empíricas coletadas em 2024, observa-se que essas reivindicações abrangem desde a proteção dos recursos naturais e a recuperação de áreas degradadas até a melhoria das condições socioeconômicas, o acesso a serviços públicos essenciais, o fortalecimento da participação social e a garantia de direitos fundamentais.

Nesse sentido, evidencia-se que os impactos da exploração do lítio não se limitam à dimensão ambiental, alcançando de forma significativa as esferas social, econômica e institucional, ao mesmo tempo em que revelam uma assimetria na distribuição dos benefícios e dos ônus da atividade minerária. Tal cenário demonstra a insuficiente internalização dos custos socioambientais pelos agentes econômicos, em desacordo com o princípio do poluidor-pagador, evidenciando a necessidade de sua efetiva concretização. Ademais, a ausência de regulamentação específica para a logística reversa das baterias de veículos elétricos, no âmbito da Lei nº 12.305/2010, compromete a aplicação desse princípio ao longo de toda a cadeia produtiva, reforçando a necessidade de aprimoramento normativo em consonância com os fundamentos da justiça ambiental e da economia circular.

2.4.6 A Recomendação nº 30/2025 do Ministério Público Federal de Minas Gerais e a Aplicação Prática dos Princípios Ambientais na Mineração de Lítio

A Recomendação nº 30/2025, emitida pelo Ministério Público Federal em Minas Gerais (MPF/MG) representa um marco na aplicação concreta dos princípios da precaução, da prevenção e da participação social no contexto da mineração de lítio. Ao determinar à Agência Nacional de Mineração (ANM) a “suspensão e revisão das autorizações de pesquisa e lavra de

espodumênio/lítio” nos municípios de Araçuaí, Itinga, Coronel Murta e Medina, o MPF fundamenta sua atuação na “necessidade de prevenir riscos socioambientais e violações de direitos étnico-territoriais”, especialmente em relação às comunidades tradicionais, povos quilombolas e agricultores familiares do Vale do Jequitinhonha diretamente impactados pela expansão da atividade minerária. A medida se ancora na Convenção nº 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT) e no art. 231 da CRFB/1988, reafirmando o direito das comunidades tradicionais à “consulta prévia, livre e informada”.

Essa orientação institucional materializa os princípios da precaução e da prevenção, previstos na PNMA, pois impõe atuação estatal antecipada diante da incerteza científica e do risco de degradação ambiental. Ademais, ao condicionar o avanço das atividades minerárias à revisão das autorizações e à compensação de eventuais impactos, o MPF reafirma a efetividade do princípio do poluidor-pagador, segundo o qual o empreendedor deve suportar integralmente os custos de reparação e mitigação ambiental. Dessa forma, a Recomendação nº 30/2025 constitui um “instrumento jurídico de concretização do art. 225 da Constituição Federal”, ao integrar a proteção ambiental, a justiça social e o controle público das atividades minerárias estratégicas.

Se a exploração do lítio representa a etapa inicial da cadeia produtiva da eletromobilidade, o encerramento do ciclo de vida das baterias evidencia novos desafios ambientais relacionados à destinação final, à gestão de resíduos perigosos e à necessidade de implementação de instrumentos jurídicos capazes de assegurar a responsabilidade ambiental ao longo de todo o ciclo produtivo.

2.4.7 Controle Judicial da Atividade Minerária: Análise de Caso Concreto

A atuação do Poder Judiciário tem se consolidado como instrumento relevante no controle das atividades minerárias, especialmente em contextos de risco socioambiental e de potencial violação de direitos de comunidades tradicionais. Destaca-se decisão proferida pelo Tribunal Regional Federal da 6ª Região no Agravo de Instrumento nº 6010277-90.2025.4.06.0000, referente à exploração mineral no estado de Minas Gerais.

No referido caso, o tribunal reconheceu a necessidade de observância dos princípios ambientais, em especial os da precaução e da prevenção, diante dos riscos associados à atividade minerária. A decisão evidencia a importância da atuação estatal antecipada em situações de incerteza científica, com o objetivo de evitar a consolidação de danos ambientais de difícil reparação.

Além disso, o julgado ressalta a centralidade da proteção das comunidades afetadas, destacando a exigência de consulta prévia, livre e informada, em conformidade com a Convenção nº 169 da OIT. Tal entendimento reforça a integração entre a tutela ambiental e a proteção dos direitos fundamentais de povos e comunidades tradicionais. A intervenção judicial, nesse contexto, revela-se como mecanismo de correção de eventuais falhas na atuação administrativa, especialmente em processos de licenciamento ambiental, contribuindo para a efetividade das normas ambientais e para o fortalecimento da governança socioambiental.

Dessa forma, o caso demonstra que o controle jurisdicional das atividades minerárias constitui instrumento essencial para assegurar a aplicação dos princípios ambientais e a proteção dos direitos coletivos, evidenciando a necessidade de maior rigor na regulação e fiscalização da exploração de recursos estratégicos, como o lítio (Brasil, Tribunal Regional Federal da 6ª Região, Agravo de Instrumento nº 6010277-90.2025.4.06.0000/MG, Rel. Genevieve Grossi Orsi, julgado em 12 nov. 2025).

2.5 Classificação das Baterias de Veículos Elétricos como Resíduos Perigosos no Ordenamento Jurídico Brasileiro

2.5.1 Estrutura, Funcionamento e Características das Baterias de Íons de Lítio em Veículos Elétricos

Segundo a NeoCharge (s.d.), a bateria é considerada o “coração” do veículo elétrico, pois é o principal componente responsável pelo armazenamento da energia necessária para a tração das rodas. Além da bateria principal, o veículo possui uma bateria auxiliar destinada exclusivamente à alimentação dos sistemas internos e acessórios, função semelhante à encontrada em “todos os automóveis”. Embora se assemelhem às utilizadas em dispositivos eletrônicos, como os celulares, as baterias automotivas apresentam estrutura muito mais complexa, composta por pacotes formados por milhares de células que operam em conjunto.

Nesse mesmo sentido, a NeoCharge (s.d.) explica que os veículos elétricos a bateria se diferenciam por possuírem um motor elétrico em substituição ao motor de combustão interna, utilizando uma bateria tracionária, geralmente de íons de lítio, como forma de armazenar a eletricidade destinada ao acionamento das rodas. Ao pressionar o pedal do acelerador, a energia é transmitida de maneira instantânea ao motor, que consome gradualmente a carga acumulada. Em situações de desaceleração, o próprio motor pode atuar como gerador por meio da chamada frenagem regenerativa, processo em que a energia que seria dissipada em forma de calor nos

freios é recuperada e reinserida na bateria, contribuindo para maior autonomia. Quando a carga se esgota, a recarga ocorre a partir da rede elétrica, seja por meio de uma tomada de parede ou de um carregador específico para essa finalidade (NeoCharge, s.d.).

Para o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) (2024, p. 6), as baterias de íon de lítio constituem atualmente a principal tecnologia empregada nos veículos elétricos de produção em massa, em virtude de sua elevada densidade de energia, vida útil razoável e capacidade de recarga relativamente rápida. Todavia, esse tipo de bateria apresenta limitações importantes, como a degradação progressiva da capacidade ao longo do tempo, mesmo quando não atingido o número máximo de ciclos de carga e descarga. Ademais, fatores externos, tais como temperatura, taxa de carregamento e descarregamento, bem como condições de armazenamento, influenciam diretamente em seu desempenho e longevidade.

Ainda de acordo com o Inmetro (2024, p. 8), além das composições consolidadas, pesquisas têm se concentrado em tecnologias emergentes que visam superar as limitações atuais. Dentre elas, destacam-se as baterias de estado sólido, que utilizam eletrólito sólido em substituição ao líquido, reduzindo significativamente os riscos de incêndios e vazamentos. Essa inovação apresenta potencial de maior densidade de energia, maior autonomia, maior número de ciclos e operação em condições extremas de temperatura. Não obstante, seu principal desafio reside nos custos de produção, ainda elevados em função da complexidade tecnológica.

Salienta o Inmetro (2024, p. 9) que também outra inovação em fase de desenvolvimento é a bateria de íon de sódio, que se apresenta como alternativa viável às de lítio, sobretudo pela abundância e baixo custo do sódio, recurso amplamente disponível na crosta terrestre. Essa tecnologia, além de mais acessível, apresenta vantagens em termos de segurança, uma vez que o sódio é menos reativo. Entretanto, ainda enfrenta barreiras técnicas relacionadas à densidade energética, à eficiência e à durabilidade, o que limita sua aplicação em escala industrial no presente momento (Inmetro, 2024).

2.5.2 Ciclo de Vida Útil das Baterias de Veículos Elétricos e Implicações para a Sustentabilidade

A transição para os VEs se encontra em estágio avançado e a integridade da bateria se apresenta como elemento central para o êxito dessa transformação. A Geotab – empresa líder global em soluções de telemática e análise de dados para gestão de frotas e veículos conectados – desempenha papel essencial na aferição do rendimento e da eficiência energética dos VEs (Geotab, 2025). De acordo com seus levantamentos, observa-se uma evolução significativa no

desempenho das baterias ao longo dos últimos anos: em 2019, registrava-se uma taxa média de degradação de 2,3% ao ano; já em 2024, essa taxa foi reduzida para 1,8% ao ano, refletindo avanços contínuos tanto no desenvolvimento tecnológico quanto nos processos de fabricação. Esse progresso projeta uma vida útil potencial de até 20 anos ou mais, caso a taxa reduzida de degradação se mantenha constante.

Esse cenário apresenta implicações diretas para o setor de transporte e para gestores de frotas, que enfrentam crescente pressão normativa e social para a redução das emissões de CO₂. Ainda segundo a Geotab (2025), 75% da frota atual de veículos comerciais leves já poderia ser substituída por modelos elétricos equivalentes, sem comprometer a eficiência operacional. Além disso, o estudo aponta que um único VE pode gerar uma economia de até US\$ 15.900 ao longo de sua vida útil, o que reforça o benefício econômico associado à eletromobilidade.

A análise confirma, portanto, que a transição para veículos elétricos é a estratégia mais eficaz para a mitigação das emissões de GEE, além de oferecer vantagens econômicas concretas, ao mesmo tempo em que fortalece a confiabilidade da tecnologia de baterias (Geotab, 2025).

2.5.3 A Cadeia Produtiva das Baterias de Veículos Elétricos sob a Incidência do Princípio do Poluidor-Pagador

De acordo com o relatório publicado pela SNE Research (2025), o uso global de baterias para veículos elétricos alcançou 504,4 GWh no primeiro semestre de 2025, representando um aumento de 37,3% em relação ao mesmo período do ano anterior.

A Contemporary Amperex Technology Co. Limited (CATL) manteve-se na liderança mundial, com crescimento anual de 37,9% e utilização total de 190,9 GWh. Esse resultado decorre da ampla adoção de suas baterias por grandes fabricantes chineses, como ZEEKR, AITO, Li Auto e Xiaomi, além de montadoras globais de destaque, entre elas Tesla, BMW, Mercedes-Benz e Volkswagen. Tal cenário reforça o protagonismo da CATL no fornecimento de baterias de íon-lítio e sua capacidade de atender simultaneamente às demandas tecnológicas e de escala do mercado global de eletromobilidade.

A Build Your Dreams (BYD) se consolidou em segundo lugar, com um crescimento ainda mais expressivo de 58,4% (89,9 GWh). A empresa, que produz internamente tanto as baterias quanto os veículos elétricos, tem expandido suas vendas por meio de forte competitividade de preços e diversificação de modelos. Essa estratégia tem garantido sua consolidação no mercado chinês e em mercados internacionais, especialmente na Europa, onde

o uso de baterias BYD atingiu 6,0 GWh no primeiro trimestre de 2025, um aumento de 313,4% em comparação ao mesmo período do ano anterior (SNE Research, 2025).

Esse crescimento exponencial da produção e utilização de baterias evidencia, entretanto, a intensificação dos impactos ambientais associados à cadeia produtiva, sobretudo nas etapas de extração de minerais críticos, processamento industrial e gestão de resíduos ao final da vida útil. A expansão da eletromobilidade, embora essencial à descarbonização do transporte, não se mostra isenta de externalidades negativas, exigindo a adoção de mecanismos jurídicos capazes de assegurar a responsabilidade ambiental dos agentes econômicos envolvidos.

Nesse contexto, o princípio do poluidor-pagador, consagrado pela Lei nº 6.938/1981, impõe que os custos decorrentes da degradação ambiental sejam internalizados pelos responsáveis pela atividade poluidora. Sua aplicação à cadeia produtiva das baterias de veículos elétricos se revela particularmente relevante, na medida em que envolve atividades potencialmente poluidoras em todas as fases do ciclo de vida, desde a mineração do lítio e de outros metais estratégicos até o descarte ou reaproveitamento dos componentes.

Assim, a incidência desse princípio no setor da eletromobilidade exige a responsabilização pelos danos ambientais já causados e a implementação de instrumentos preventivos e econômicos, como a logística reversa, a rastreabilidade e os sistemas de reciclagem, de modo a evitar a socialização dos prejuízos ambientais e assegurar a sustentabilidade do modelo produtivo. Trata-se, portanto, de um mecanismo essencial para a harmonização entre desenvolvimento tecnológico e proteção ambiental, garantindo que os benefícios da transição energética não sejam acompanhados pela transferência indevida de custos à coletividade.

2.5.4 Evolução Tecnológica e Consolidação das Baterias de Íons de Lítio na Transição Energética

O desenvolvimento das baterias de íon-lítio teve início no final da década de 1970, a partir dos esforços de uma equipe internacional de cientistas que buscava criar uma fonte de energia recarregável, leve e eficiente. Essa tecnologia se transformou em um dos pilares da era moderna, alimentando dispositivos como telefones celulares, computadores portáteis e, mais recentemente, veículos elétricos.

Conforme destaca a Thermo Fisher Scientific (2019), o trabalho de John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino, laureados com o Prêmio Nobel de Química de 2019, foi determinante para a consolidação das baterias de íon-lítio como

componentes fundamentais da transição energética, ao possibilitar o armazenamento de energia proveniente de fontes renováveis, como a solar e a eólica, promovendo, assim, o avanço rumo a uma sociedade menos dependente de combustíveis fósseis.

Nesse contexto de expansão tecnológica, a consolidação da eletromobilidade no Brasil ganhou novo impulso com a instalação da fábrica de baterias de Fosfato de Ferro-Lítio (LiFePO_4) da BYD, inaugurada em 1º de setembro de 2020, no Polo Industrial de Manaus (PIM). Trata-se da “primeira unidade fabril do país” voltada especificamente à produção desse tipo de bateria, amplamente reconhecida por sua segurança térmica, durabilidade e eficiência ambiental.

Conforme informa a BYD (2020), o investimento inicial de “R\$ 15 milhões (US\$ 2,7 milhões)” resultou em uma planta altamente automatizada, com “capacidade anual de até 18 mil módulos de bateria”, destinada principalmente à instalação em chassis de ônibus elétricos. A implantação dessa unidade representa um marco estratégico para o avanço da mobilidade elétrica nacional, integrando o PIM à cadeia global de energia limpa e contribuindo para o fortalecimento das políticas de transição energética no país (BYD, 2020).

2.5.5 Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção de Baterias de Veículos Elétricos

A bateria é o elemento central dos veículos elétricos, desempenhando a função de reservatório de energia e substituindo o tradicional tanque de combustível. Sua composição envolve diversos metais críticos e tradicionais, cuja obtenção é altamente intensiva em energia e emissões de carbono. Conforme observa Gauto (2022), “uma bateria de 60 kWh contém aproximadamente 9 kg de lítio, 24 kg de níquel, 24 kg de cobalto e 22 kg de manganês, além de quantidades significativas de grafite, alumínio e cobre, totalizando cerca de meia tonelada”. Essa complexa estrutura evidencia que “nem só de lítio vive uma bateria”, pois seu desempenho e impacto ambiental estão diretamente relacionados à extração e ao processamento dos metais.

Ainda segundo o autor, a maior parte das baterias para veículos elétricos é atualmente produzida na Ásia, especialmente na China, onde os processos industriais apresentam elevada intensidade energética. Gauto (2022) destaca que, para cada quilowatt-hora (kWh) de capacidade de uma bateria fabricada no continente asiático, são emitidos em média 115 kg de GEE, o que significa que uma bateria de 60 kWh “nasce” com aproximadamente sete toneladas de CO_2 equivalente associadas à sua fabricação.

Esse cenário é corroborado por estudos da International Energy Agency, que indicam que a produção de baterias de íon-lítio apresenta elevada intensidade de carbono, variando

conforme a matriz energética utilizada no processo produtivo, especialmente em regiões com forte dependência de combustíveis fósseis (IEA, 2024). Tal constatação revela que, embora os veículos elétricos eliminem as emissões diretas durante sua operação, sua pegada de carbono inicial é significativa, o que evidencia a necessidade de políticas industriais orientadas à descarbonização da cadeia produtiva, bem como de estratégias eficientes de reaproveitamento e gestão ao longo do ciclo de vida desses sistemas.

Diante do exposto, à luz da Lei nº 12.305/2010, consideram-se resíduos perigosos aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública ou ao meio ambiente. As baterias de veículos elétricos, especialmente as de íons de lítio, se enquadram nessa categoria, uma vez que contêm substâncias químicas potencialmente tóxicas e reativas, além de apresentarem risco de incêndio e explosão quando submetidas a condições inadequadas de manuseio, armazenamento ou descarte.

Assim, sua gestão demanda tratamento diferenciado, compatível com os princípios da prevenção e do poluidor-pagador, bem como com os instrumentos da logística reversa previstos no ordenamento jurídico brasileiro, evidenciando a necessidade de estruturas normativas e operacionais capazes de assegurar a destinação ambientalmente adequada desses resíduos ao final de seu ciclo de vida.

2.5.6 Enquadramento Jurídico das Baterias de Veículos Elétricos como Resíduos Perigosos no Direito Brasileiro

A partir dos elementos técnicos, ambientais e econômicos analisados nos itens anteriores, verifica-se que as baterias de veículos elétricos, especialmente as de íons de lítio, apresentam características que ressaltam seu potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente, sobretudo em situações de descarte inadequado. A presença de substâncias potencialmente tóxicas, aliada à reatividade química e ao risco de eventos como incêndios, explosões e contaminação ambiental, reforça a necessidade de seu tratamento jurídico diferenciado, compatível com a natureza dos resíduos que oferecem perigo significativo.

No ordenamento jurídico brasileiro, a disciplina dos resíduos sólidos encontra fundamento na PNRS (Lei nº 12.305/2010), que estabelece a classificação dos resíduos com base no grau de risco que representam. Ainda que não haja previsão específica para baterias de veículos elétricos, esse critério permite seu enquadramento como resíduos perigosos, considerando suas propriedades e os impactos associados ao seu ciclo de vida.

A jurisprudência do Superior Tribunal de Justiça (STJ) corrobora essa interpretação, ao firmar o entendimento de que a responsabilidade civil por danos ambientais é objetiva e regida pela teoria do risco integral, de modo que o dever de reparação independe da comprovação de culpa, bastando a demonstração do nexo entre a atividade e o dano (Brasil, STJ, REsp 1.374.284/MG, 2014). Dessa forma, o enquadramento das baterias de veículos elétricos como resíduos perigosos decorre da própria lógica do sistema jurídico ambiental brasileiro, que prioriza a prevenção e a responsabilização integral dos agentes envolvidos em atividades potencialmente poluidoras.

Tal constatação evidencia a existência de lacuna normativa quanto à disciplina específica dessas baterias, especialmente no que se refere à sua destinação final, o que reforça a necessidade de aperfeiçoamento do marco regulatório, em articulação com os instrumentos da logística reversa e da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

2.6 Engenharia Reversa como Paradigma na Gestão Sustentável das Baterias de Veículos Elétricos

Diante da necessidade de instrumentos capazes de viabilizar a gestão ambientalmente adequada das baterias de veículos elétricos, especialmente considerando seu enquadramento como resíduos perigosos e a lacuna normativa existente, a engenharia reversa¹ se apresenta como um paradigma relevante na reestruturação da cadeia produtiva. Em contraposição ao modelo linear tradicional – baseado na lógica de extração, produção, consumo e descarte –, essa abordagem propõe a análise técnica e funcional dos produtos ao final de sua vida útil, com vistas à recuperação de componentes, materiais e informações, possibilitando sua reinserção em novos ciclos produtivos. Tal perspectiva encontra respaldo nos fundamentos da Lei nº 12.305/2010, que estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e incentiva a reinserção de resíduos nos processos produtivos.

No caso das baterias de íon-lítio, a engenharia reversa assume papel estratégico ao permitir a identificação da composição química, da estrutura modular e do grau de degradação dos materiais, viabilizando práticas de reaproveitamento, remanufatura e reciclagem. Tal abordagem contribui para a redução da dependência de novas atividades extrativas, especialmente no que se refere a minerais críticos, além de minimizar os impactos ambientais

¹ Engenharia reversa significa um método ou processo de desenvolvimento ou fabricação de um produto conhecido, descoberto por meio de “trabalho inverso”, como desmontar o produto original. É frequentemente utilizada no desenvolvimento de máquinas, manutenção de software e muitas outras áreas. Disponível em: https://www.law.cornell.edu/wex/reverse_engineering. Acesso em: 15 abr. 2026.

associados à cadeia produtiva. Nesse sentido, a ABVE destaca o elevado potencial de reciclagem e reaproveitamento das baterias de veículos elétricos, evidenciando a relevância de mecanismos técnicos voltados à recuperação de materiais e à redução de resíduos no setor.

Sob a perspectiva do Direito Ambiental brasileiro, a engenharia reversa dialoga diretamente com os instrumentos previstos na PNRS, especialmente a logística reversa, que tem por finalidade assegurar o retorno dos resíduos ao setor produtivo. Nesse contexto, a engenharia reversa contribui para a efetivação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, além de favorecer a internalização dos custos ambientais, em consonância com o princípio do poluidor-pagador, previsto no art. 4º, inciso VII, da Lei nº 6.938/1981.

No caso específico das baterias de veículos elétricos, essa abordagem possibilita a destinação ambientalmente adequada dos resíduos e a recuperação de materiais estratégicos, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais. Com isso, promove-se a diminuição dos impactos ambientais e o aproveitamento mais eficiente dos insumos já inseridos na cadeia produtiva. Apesar de seu potencial, a implementação da engenharia reversa no Brasil ainda enfrenta desafios, como a ausência de regulamentação específica para baterias de íon-lítio, limitações tecnológicas e a necessidade de padronização de informações ao longo da cadeia produtiva.

Nesse cenário, a engenharia reversa deixa de ser apenas uma ferramenta técnica e passa a assumir papel relevante na consolidação de práticas sustentáveis, contribuindo diretamente para a operacionalização da logística reversa e para a concretização dos princípios do Direito Ambiental. Sua aplicação, portanto, reforça a necessidade de aperfeiçoamento normativo e institucional, especialmente no que se refere à gestão das baterias de veículos elétricos, tema que será aprofundado no item seguinte.

3 A LOGÍSTICA REVERSA DAS BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: DO LÍTIO EXTRAÍDO À RECICLAGEM COMO INSTRUMENTO DE ECONOMIA CIRCULAR

3.1 A Bateria de Íon-Lítio como Elemento Estratégico da Transição Energética

O estudo publicado por Vega-Muratalla *et al.* (2024) evidencia que o lítio ocupa posição estratégica no contexto da transição energética contemporânea. A análise técnica demonstra que sua aplicação na indústria automotiva, especialmente na produção de baterias de íon-lítio para veículos elétricos, constitui fator essencial para a redução gradual da dependência de combustíveis fósseis. Ao analisar a disponibilidade, a extração e as perspectivas futuras desse recurso, os pesquisadores ressaltam que o lítio se consolida como elemento-chave para a viabilização da eletromobilidade e para o avanço de sistemas de energia de baixo carbono, reforçando seu papel na descarbonização do setor de transportes.

Extrai-se que a centralidade do lítio, contudo, além de impulsionar a transição energética, intensifica a pressão sobre sua cadeia produtiva e evidencia a necessidade de instrumentos regulatórios capazes de disciplinar o ciclo de vida das baterias, especialmente quanto ao retorno, à reutilização e à destinação final ambientalmente adequada.

3.1.1 Crescimento do Mercado de Veículos Elétricos e Aumento do Passivo Tecnológico

No artigo publicado por García (2023), na plataforma da Associação Interamericana para a Defesa do Ambiente (Aida), a pesquisadora evidencia um dos paradoxos centrais da transição energética: embora essa mudança busque substituir os combustíveis fósseis por tecnologias de menor impacto climático, ela depende de recursos minerais cuja extração e processamento podem gerar efeitos adversos significativos sobre ecossistemas e comunidades.

A autora explica que o lítio, tradicionalmente empregado nas indústrias de vidro e cerâmica devido à sua capacidade de conferir maior aderência e dureza, adquiriu relevância estratégica ao se tornar insumo essencial para a fabricação de baterias utilizadas em veículos elétricos e em outras tecnologias voltadas à redução de emissões. Também observa que a ampliação da demanda global por esse mineral tende, em muitos casos, a ocultar ou minimizar os impactos socioambientais associados à sua extração, os quais incluem degradação ambiental, pressão sobre ecossistemas frágeis e consequências diretas para populações que vivem nos territórios minerados.

Nesse contexto, a expansão da eletromobilidade revela que a transição energética, embora necessária sob a perspectiva climática, pode reproduzir assimetrias socioambientais, quando fundamentada em cadeias extrativas intensivas. Assim, a consolidação dos veículos elétricos projeta, além dos benefícios ambientais na fase de uso, igualmente a formação de um passivo tecnológico de natureza jurídica e ambiental, cuja gestão adequada depende da adoção de instrumentos preventivos, regulatórios e estruturantes voltados ao ciclo de vida das baterias.

3.2 Panorama da Eletromobilidade e Crescimento do Setor de Baterias

3.2.1 Dados Atualizados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2025-2026): Frota, Modelos e Vendas Nacionais

Os dados publicados pela ABVE demonstram um avanço significativo no mercado brasileiro de eletrificados leves em 2025. Segundo a entidade, os veículos *plug-in* passaram a representar 81% das vendas de eletrificados leves em outubro de 2025, correspondendo a 138.088 unidades de um total de 168.798 veículos eletrificados comercializados entre janeiro e outubro do mesmo ano (ABVE, 2025). Esse cenário evidencia a predominância dos modelos de recarga externa no país. Consideram-se, nesse grupo, os BEVs e os PHEVs, caracterizados pela necessidade de conexão a fontes externas de energia elétrica para recarga de suas baterias, em contraste com os híbridos convencionais, que não dependem de recarga externa.

Inicialmente, entre os fatores associados à expansão do setor, destaca-se a ampliação da infraestrutura nacional de recarga, cujos pontos públicos e semipúblicos passaram de aproximadamente 350 unidades em dezembro de 2020 para 16.880 em agosto de 2025, conforme levantamento da Tupi Mobilidade/ABVE Data (ABVE, 2025). Tal expansão contribui para o aumento da confiança dos consumidores e viabiliza a utilização dos veículos eletrificados tanto em deslocamentos urbanos cotidianos quanto em viagens intermunicipais e interestaduais.

Somam-se a esse cenário a evolução dos sistemas eletrônicos de gerenciamento veicular, o aprimoramento da eficiência energética e a ampliação da oferta de modelos nacionais e importados, fatores que têm favorecido a democratização gradual do acesso à eletromobilidade (ABVE, 2025). A diversificação do mercado fortalece a competitividade e impulsiona inovações relacionadas à autonomia, conectividade e desempenho energético.

Adicionalmente, dados mais recentes indicam que o Brasil conta com 670.292 veículos eletrificados em circulação até fevereiro de 2026, dos quais 186.519 correspondem a BEVs,

evidenciando o crescimento contínuo do setor e a consolidação progressiva da eletromobilidade no país (ABVE, 2026). Esse dado revela que, embora os BEVs apresentem expansão significativa, ainda representam parcela minoritária no conjunto dos eletrificados, indicando a predominância das tecnologias híbridas no processo de transição energética nacional.

Importa destacar que, a partir de janeiro de 2025, a ABVE passou a adotar nova metodologia de classificação, considerando como veículos eletrificados apenas aqueles dotados de tração elétrica autônoma e motorização mínima de 60V, incluindo os modelos BEV, PHEV, HEV e HEV flex, excluindo os micro-híbridos (MHEV). O crescimento observado projeta, como consequência direta, o aumento futuro do volume de baterias ao final da vida útil, reforçando a necessidade de estruturação de sistemas eficazes de retorno, reaproveitamento e destinação ambientalmente adequada, aspecto diretamente relacionado à logística reversa das baterias de veículos elétricos.

Nesse contexto, observa-se que o crescimento da eletromobilidade no Brasil não tem sido acompanhado, na mesma medida, pela evolução dos instrumentos normativos destinados à gestão dos resíduos decorrentes dessa tecnologia. Tal cenário evidencia um possível descompasso entre o avanço tecnológico e a capacidade regulatória, especialmente no que se refere à destinação final das baterias de veículos elétricos.

Embora a PNRS represente um marco relevante na gestão ambiental, verifica-se que sua aplicação aos resíduos tecnológicos de maior complexidade, como as baterias de íon-lítio, ainda ocorre de forma genérica. A ausência de regulamentação específica pode limitar a efetividade dos mecanismos de logística reversa, dificultando a implementação de sistemas estruturados de coleta, reaproveitamento e reciclagem.

Dessa forma, identifica-se que a expansão da eletromobilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, também introduz novos desafios ambientais que demandam atenção do ordenamento jurídico. Tal constatação reforça a importância de aprimoramento contínuo dos instrumentos normativos, de modo a assegurar a compatibilidade entre inovação tecnológica e proteção ambiental.

3.2.2 Mercado de Veículos Elétricos e Responsabilidade na Política Nacional de Resíduos Sólidos

Barros (2025), ao analisar o desempenho da BYD no mercado brasileiro de veículos elétricos, evidencia que “seis dos dez veículos elétricos mais vendidos no país pertencem à fabricante”, revelando o domínio da empresa no segmento. O modelo Dolphin Mini ocupa

posição de liderança, sendo o veículo elétrico mais vendido do Brasil e também um dos modelos mais acessíveis dentro da própria linha da BYD. A análise indica que o mesmo veículo já havia ocupado a primeira colocação em 2024, mantendo o protagonismo em 2025, com autonomia aproximada de 280 km, conforme dados do Inmetro (2025), o que confirma sua adequação ao uso cotidiano urbano.

Embora lidere as vendas, o modelo não corresponde ao veículo elétrico de menor preço disponível no país, posição que permanece com o Renault Kwid E-Tech. A relação dos dez modelos mais vendidos inclui ainda outras montadoras, como Volvo e GWM, evidenciando processo gradual de diversificação do mercado brasileiro de eletromobilidade (Barros, 2025).

A concentração de mercado em determinados fabricantes assume relevância jurídica no âmbito da PNRS, uma vez que o art. 33 da Lei nº 12.305/2010 atribui aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes o dever de estruturar e implementar sistemas de logística reversa, em observância ao princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Sob a perspectiva jurídica, verifica-se que a responsabilidade compartilhada prevista na PNRS ainda enfrenta desafios quanto à sua plena aplicação no contexto das baterias de veículos elétricos. A inexistência de mecanismos específicos de rastreabilidade e de retorno desses resíduos pode dificultar a responsabilização dos agentes envolvidos na cadeia produtiva.

Nesse sentido, observa-se que o ordenamento jurídico brasileiro ainda carece de maior detalhamento normativo no que se refere à gestão pós-consumo dessas baterias. Tal lacuna pode impactar a efetividade de princípios como o do poluidor-pagador e da prevenção, especialmente diante da crescente inserção dessas tecnologias no mercado nacional.

3.2.3 Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada às Baterias de Veículos Elétricos

Segundo Jugend *et al.* (2022, p. 3144-3159), a perspectiva de ciclo de vida compreende todas as etapas da cadeia de suprimentos de um produto, desde a extração dos recursos naturais, passando pelo beneficiamento, manufatura, transporte, distribuição e uso, até as opções de fim de vida, como reutilização, reciclagem, incineração ou disposição em aterros. O transporte se encontra presente em todas essas fases, conectando os diferentes estágios do sistema produtivo.

A ACV permite mapear, de forma sistemática, as atividades envolvidas em cada etapa do ciclo de vida, bem como o consumo de recursos naturais, a geração de resíduos e as emissões associadas. Ao adotar uma abordagem holística, a técnica possibilita a quantificação dos impactos ambientais em diferentes categorias, a partir de uma análise do sistema de produto “do berço ao túmulo” (Jugend *et al.*, 2022, p. 3207).

A Resolução do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro) nº 4/2010, ao aprovar o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), reconhece que a pressão sobre os recursos naturais e o aumento da geração de resíduos exigem instrumentos capazes de reduzir impactos ambientais decorrentes das atividades produtivas. O texto estabelece que a ACV constitui uma das principais ferramentas aplicadas internacionalmente, sobretudo na Europa, para apoiar políticas de sustentabilidade, ao permitir a análise sistemática dos efeitos ambientais associados a produtos, processos e serviços ao longo de todas as etapas de seu ciclo de vida.

No Brasil, segundo a própria Resolução, a ACV encontra respaldo normativo nas ABNT NBR ISO 14040:2009 (Princípios e estrutura) e ABNT NBR ISO 14044:2009 (Requisitos e orientações), que definem a metodologia oficial para identificação, compilação e avaliação dos impactos ambientais de um sistema de produto desde a extração dos recursos naturais até a disposição final. Dessa forma, a Resolução consolida a ACV como instrumento técnico-científico relevante para a formulação de políticas públicas e para a promoção de padrões de produção e consumo ambientalmente responsáveis no país (Conmetro, 2010).

Nesse contexto, a consolidação da ACV como instrumento normativo no ordenamento brasileiro fornece a base metodológica necessária para a análise específica das baterias de íon-lítio empregadas em veículos elétricos, permitindo examinar não somente sua fase de fabricação, mas também os impactos associados ao uso, à reutilização e às estratégias de fim de vida. Tal abordagem se revela especialmente relevante para a compreensão da logística reversa, sobretudo quando considerados modelos de uso em cascata, nos quais a bateria estende sua funcionalidade para além da mobilidade veicular.

3.2.4 Avaliação do Ciclo de Vida de Baterias de Íon-Lítio em Uso Cascata: Mobilidade Elétrica e Reutilização Estacionária

O estudo desenvolvido por Ahmadi *et al.* (2017) analisa o potencial de reaproveitamento das baterias de íon-lítio provenientes de veículos elétricos após o término de sua vida útil inicial, destacando os benefícios tecnológicos, econômicos e ambientais decorrentes de sua destinação a novas aplicações. Segundo os autores, essas baterias podem ser reinseridas em sistemas estacionários de armazenamento de energia, inclusive integradas a redes inteligentes, desempenhando funções como nivelamento de carga elétrica e fornecimento energético para usos residenciais e comerciais.

Os pesquisadores observam que estudos anteriores já indicavam a viabilidade técnica dessa segunda vida útil, bem como ganhos de eficiência em aplicações comerciais de armazenamento energético. Com base nisso, Ahmadi *et al.* (2017) realizam uma ACV das baterias inicialmente utilizadas em veículos elétricos e posteriormente reaproveitadas em sistemas estacionários, adotando uma unidade funcional capaz de integrar a energia fornecida durante a fase de mobilidade com aquela disponibilizada na etapa subsequente de reutilização.

A investigação compara diferentes cenários energéticos, contrapondo a mobilidade elétrica associada à reutilização das baterias em aplicações estacionárias alimentadas por energia limpa ao modelo convencional baseado em veículos a combustão interna combinado à geração de energia de pico proveniente do gás natural. Para essa análise, os autores consideram um período de oito anos de uso no veículo elétrico seguido por dez anos de aplicação estacionária, utilizando dados reais de consumo energético que variam conforme horário e sazonalidade, além de bases consolidadas de ACV.

Realizado na província de Ontário, no Canadá, o estudo incorpora variáveis relacionadas à matriz energética regional e aos processos de degradação das baterias ao longo do tempo. Sete categorias ambientais são examinadas por meio do método ReCiPe, cujos resultados indicam que a etapa de fabricação das baterias constitui o principal fator de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida estendido.

Apesar desse impacto inicial, Ahmadi *et al.* (2017) demonstram que o sistema em cascata, caracterizado pelo uso inicial na mobilidade elétrica seguido da reutilização em aplicações estacionárias, apresenta desempenho ambiental superior ao modelo tradicional de descarte após a primeira fase de utilização. A ampliação do tempo de uso contribui para diluir os impactos associados à produção das baterias, aumentando a eficiência ambiental global do sistema.

Os autores destacam ainda que o emprego de energia proveniente de fontes renováveis em ambas as etapas de utilização intensifica a redução dos impactos ambientais, especialmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo de combustíveis fósseis. Nesse sentido, a eletrificação da mobilidade configura avanço relevante na mitigação das emissões do setor de transportes, podendo ampliar seus benefícios por meio da extensão do ciclo funcional das baterias.

De acordo com Ahmadi *et al.* (2017), quando as baterias deixam de atender plenamente às exigências do uso automotivo, permanecem tecnicamente adequadas para aplicações estacionárias, cujas demandas operacionais diferem daquelas impostas aos veículos elétricos. Essa reutilização possibilita o aproveitamento mais eficiente da eletricidade gerada por fontes

renováveis, especialmente em períodos de baixa demanda energética ou em cenários marcados pela intermitência da geração solar e eólica, contribuindo para a estabilidade dos sistemas elétricos.

Ainda segundo os autores, o reaproveitamento das baterias posterga sua destinação final e reduz a pressão sobre os sistemas de reciclagem, ainda em consolidação em diversos países. Nesse contexto, o modelo em cascata fortalece estratégias de economia circular ao permitir múltiplas etapas de uso antes da reciclagem, ampliando o aproveitamento dos recursos incorporados às baterias.

A dinâmica desse ciclo de utilização estendido pode ser visualizada na Figura 2, que ilustra as etapas sucessivas de uso, reutilização e reciclagem das baterias de veículos elétricos no contexto da economia circular.

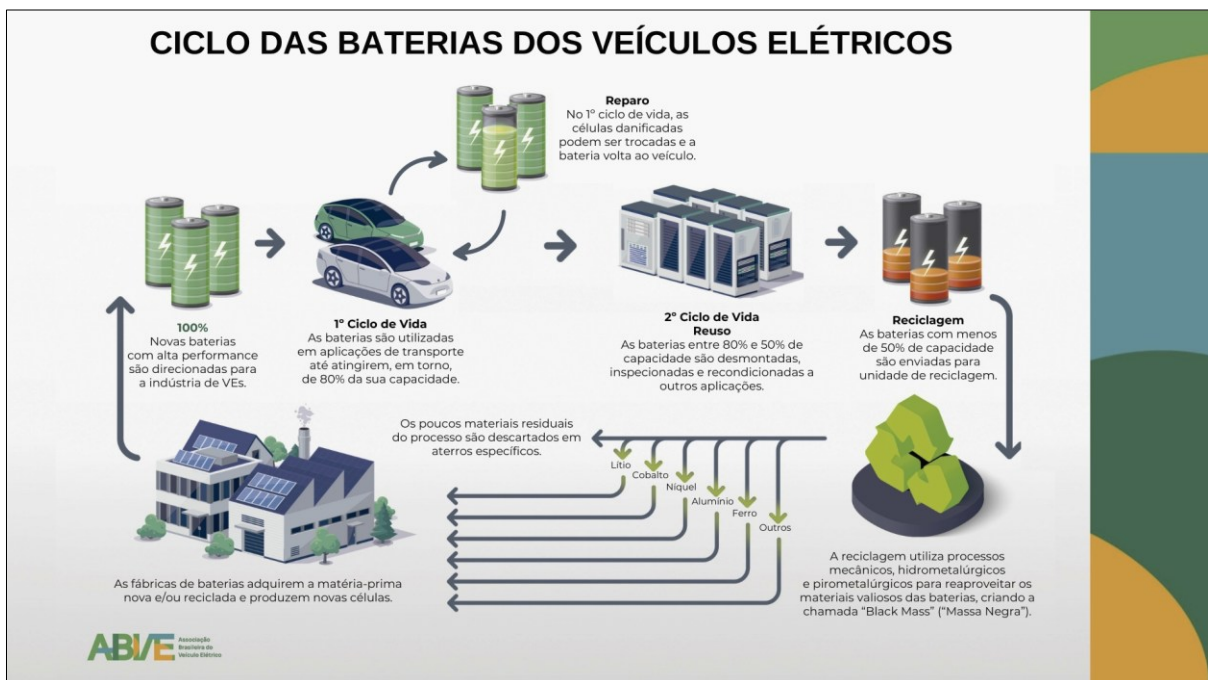


Figura 2 – Ciclo de vida estendido das baterias de veículos elétricos

Fonte: Extraída de ABVE (2024).

Extraí-se da Figura 2 que o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos ocorre de forma estendida, abrangendo o uso na mobilidade, a reutilização em aplicações estacionárias e a reciclagem final, favorecendo a recuperação de materiais estratégicos e a redução dos impactos ambientais da fabricação.

3.3 Mineração e Cadeia de Suprimento do Lítio

3.3.1 Descaracterização de Minas, Prevenção de Passivos Ambientais e a Mineração de Rejeitos de Tântalo como Estratégia de Reaproveitamento

O estudo apresentado por Indio do Brasil (2020) descreve o reaproveitamento de rejeitos de concentrado de lítio provenientes da produção de tântalo em duas barragens construídas a montante e desativadas desde 2018 no município de Nazareno, em Minas Gerais. A autora informa que o projeto, conduzido pela AMG Mineração S.A. e financiado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), tem como finalidade tanto a recuperação econômica do lítio quanto a descaracterização das barragens, cujo método construtivo foi proibido pela ANM após os rompimentos de Mariana e Brumadinho.

Segundo Indio do Brasil (2020), o financiamento do BNDES, no valor de R\$ 221 milhões, equivalente a 18% do investimento total, permitirá a produção anual de 90 mil toneladas de concentrado de lítio, ampliando em dez vezes a capacidade nacional então existente. Toda a produção prevista para os três primeiros anos já se encontra contratada para exportação à China, reforçando a inserção estratégica do Brasil na cadeia global de insumos destinados à energia renovável.

A autora destaca que o projeto contribui simultaneamente para a redução dos riscos associados às antigas estruturas de rejeitos e para o desenvolvimento socioeconômico regional, com geração de dois mil empregos indiretos durante a fase de obras e 130 postos diretos, priorizando trabalhadores de Nazareno e São Thiago. Além disso, registra-se a possibilidade de replicação da iniciativa em outros empreendimentos minerários, diante do potencial de reaproveitamento de rejeitos em aplicações industriais diversas, como materiais de construção e pavimentação (Indio do Brasil, 2020).

3.4 Produção Industrial e Composição Química das Baterias

3.4.1 Estrutura das Baterias Íon-Lítio

O estudo técnico sobre a composição das baterias de íons-lítio utilizadas em veículos elétricos, conforme Tiwari (2024), demonstra que esses dispositivos são formados por uma combinação complexa de materiais críticos e estratégicos. Segundo o autor, cada célula de bateria possui quatro elementos estruturais centrais – cátodo, ânodo, separador e eletrólito –, os

quais são integrados por coletores de corrente metálicos e protegidos por estruturas de aço e alumínio que compõem o módulo e o pacote final da bateria.

Ainda de acordo com Tiwari (2024), o cátodo pode apresentar composições químicas baseadas em níquel, manganês e cobalto (NMC) ou ainda a formulação fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4). Nas químicas NMC, predominantes em veículos que exigem maior densidade energética, encontram-se como metais essenciais o lítio, o níquel, o cobalto e o manganês. O autor destaca que essas substâncias são internacionalmente classificadas como elementos críticos, dada sua importância para o desempenho eletroquímico e para a transição energética global.

O ânodo, conforme explica Tiwari, é constituído principalmente por “grafite”, podendo conter adições de silício destinadas a elevar a capacidade de armazenamento energético. Esse componente é depositado sobre um coletor de “cobre”, enquanto o cátodo utiliza um coletor de “alumínio”, demonstrando que mesmo as camadas condutoras incorporam metais de alto valor. Entre ambos, situa-se o separador termoplástico de fluoreto de polivinilideno, responsável por impedir o contato direto entre os eletrodos e garantir estabilidade e segurança térmica. Todo o conjunto é imerso em um eletrólito líquido composto por sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos.

O autor também esclarece que cada célula possui uma carcaça de aço, enquanto o pacote de bateria é reforçado por estruturas adicionais de aço e alumínio, destinadas à proteção mecânica e ao controle térmico. Umesh Tiwari (2024), ao exemplificar com o Tesla Model 3, indica que uma bateria de cerca de 75 kWh demanda dezenas de quilogramas de níquel e grafite, além de quantidades relevantes de lítio, cobalto, manganês, alumínio e cobre, o que evidencia a complexidade material desses sistemas.

Conforme conclui Tiwari, essa diversidade de materiais evidencia que a bateria de um veículo elétrico não é um artefato simples, mas um sistema complexo que incorpora elementos de alto valor econômico e ambiental. Sob a perspectiva do Direito Ambiental brasileiro, especialmente à luz da PNRS, essa complexidade material reforça a necessidade de gestão adequada ao longo de todo o ciclo de vida do produto, em observância à responsabilidade compartilhada e à destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Nesse contexto, a logística reversa se apresenta como instrumento jurídico essencial para viabilizar a recuperação de metais estratégicos, reduzir impactos socioambientais e promover a economia circular no setor da eletromobilidade.

3.4.2 Impactos Ambientais da Cadeia Produtiva das Baterias de Íon-Lítio

Conforme analisa Anderson (2024), os impactos ambientais associados às baterias de íons-lítio revelam contradições importantes no discurso da transição energética. Embora amplamente promovidas como alternativas para reduzir as emissões de GEE, tais baterias geram danos expressivos desde a etapa de extração de seus componentes.

Anderson (2024) destaca que a mineração de lítio, especialmente quando realizada por métodos a céu aberto, provoca “degradação do solo, desmatamento e perda de habitat”, como ocorreu na expansão da mina de Greenbushes, na Austrália Ocidental, onde cerca de 350 hectares de vegetação nativa foram suprimidos, afetando espécies ameaçadas.

Em regiões áridas como o Triângulo do Lítio, o consumo intensivo de água agrava a escassez hídrica, exemplificado pelo caso do Salar de Atacama, que chega a utilizar aproximadamente 21 milhões de litros por dia. Também há registros de contaminação hídrica, como o vazamento químico ocorrido em 2009 na mina chinesa de Ganzizhou Rongda, que poluiu o rio Liqi, resultando na morte de peixes, destruição de pastagens e o falecimento de iaques que dependiam daquela fonte.

Anderson (2024) esclarece que os danos ambientais não se restringem ao lítio, alcançando igualmente outros metais essenciais das baterias, como o cobalto. Grande parte desse mineral é extraída na República Democrática do Congo, onde a mineração artesanal, intensificada pela elevação do preço internacional do metal, ocorre frequentemente sem equipamentos de proteção e em condições extremamente inseguras. A autora aponta que tais práticas geram contaminação do solo e da água, destruição de ecossistemas e exposição humana a resíduos tóxicos, com estudos registrando níveis elevados de cobalto em peixes de corpos d’água próximos às operações minerárias. Como o cobalto é considerado potencialmente carcinogênico, seu manejo inadequado representa riscos significativos para a saúde das populações e para a integridade ambiental das regiões afetadas.

De forma semelhante, a mineração de níquel também acarreta impactos severos. Ainda segundo Anderson (2024), o processo de extração e processamento do metal libera poeiras tóxicas e dióxido de enxofre, substâncias que provocam poluição atmosférica, problemas respiratórios e chuva ácida. As minas situadas em países com regulamentações frágeis – como Indonésia e Filipinas – são particularmente problemáticas, pois combinam desmatamento, degradação do solo, contaminação das águas e prejuízos à biodiversidade. A autora destaca que essas condições afetam diretamente comunidades pesqueiras e rurais, revelando que a cadeia produtiva das baterias de íons-lítio, embora tecnologicamente avançada, opera frequentemente

à custa de danos ambientais e sociais profundos. Assim, ela reforça que tais impactos exigem políticas rigorosas, tecnologias mais limpas e sistemas eficazes de logística reversa para mitigar os efeitos negativos ao meio ambiente e às populações vulneráveis.

À luz da abordagem jurídico-dogmática adotada nesta pesquisa, tais elementos permitem observar que a sustentabilidade da eletromobilidade está condicionada à internalização dos custos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva, especialmente por meio de instrumentos jurídicos capazes de regular o ciclo de vida das baterias e sua destinação pós-consumo, circunstância que evidencia a centralidade de mecanismos normativos voltados ao retorno, reaproveitamento e tratamento ambientalmente adequado desses sistemas tecnológicos após o esgotamento de sua funcionalidade original.

3.4.3 Rastreabilidade e Passaporte Digital das Baterias como Instrumentos de Responsabilidade Ambiental

Conforme explica Niedzinski (2024), a rastreabilidade das baterias de veículos elétricos se tornou essencial em um cenário regulatório global cada vez mais exigente, no qual a complexidade da cadeia produtiva demanda controle rigoroso sobre origem, composição, qualidade e histórico de fabricação. O autor ressalta que a produção de baterias de íons-lítio é altamente segmentada: fabricantes especializados produzem células prismáticas, cilíndricas ou do tipo bolsa, enquanto as montadoras integram essas células em módulos e pacotes completos. Diante do aumento da demanda e da entrada de novos agentes no setor, identificar com precisão onde um componente foi produzido, quais materiais contém e quais processos lhe deram origem tornou-se indispensável para garantir segurança, desempenho e conformidade com normas internacionais.

Niedzinski (2024) ainda esclarece a diferença entre “rastreabilidade” e “rastreamento”: a primeira documenta toda a história de fabricação, a origem das matérias-primas e a composição dos materiais; o segundo monitora o deslocamento, armazenamento e logística dos itens ao longo da cadeia. A rastreabilidade depende de sistemas digitais capazes de registrar informações desde a extração das matérias-primas até a fase final de montagem, sendo viabilizada por tecnologias como códigos de barras, QR Codes e, sobretudo, “marcas diretas de peças (DPMs)”, que são aplicadas diretamente em superfícies metálicas da bateria para garantir leitura após uso intensivo e exposição a diversos processos industriais. Esses códigos são lidos por scanners de imagem capazes de registrar dados de origem, composição, vida útil e histórico de fabricação, os quais são registros fundamentais para diagnósticos de falhas, prevenção de

defeitos e mitigação de riscos, especialmente em etapas sensíveis como o revestimento de eletrodos, em que pequenas imperfeições podem causar curtos-circuitos e incêndios.

O autor destaca ainda que o avanço regulatório mais relevante é o Passaporte Digital da Bateria, iniciativa liderada pela União Europeia, que será obrigatória a partir de 1º de fevereiro de 2027. O projeto, conduzido pelo *Battery Pass Consortium* – que inclui BMW, Audi, Mercedes-Benz, Northvolt, CATL, LG Energy Solution e a GS1 –, estabelece uma infraestrutura digital para registrar composição, materiais reciclados, desempenho, durabilidade e a cadeia de custódia completa de cada bateria. Nesse sistema, os “QR Codes” são essenciais para transmitir informações ao longo de toda a cadeia de suprimentos, aumentando a transparência, reduzindo custos de aquisição, ampliando as taxas de reciclagem e fortalecendo modelos de economia circular (Niedzinski, 2024).

Para que esse sistema funcione, Niedzinski (2024) enfatiza que tecnologias de leitura com alto alcance dinâmico (HDR/HDR+ – *High Dynamic Range*), amplo campo de visão e análise em tempo real – como o *Edge Intelligence* – são fundamentais para manter altas taxas de leitura mesmo em ambientes industriais de alta velocidade. Assim, o autor conclui que a rastreabilidade se torna uma ferramenta indispensável para garantir conformidade, segurança, produtividade e sustentabilidade na cadeia global das baterias de veículos elétricos.

A partir desse contexto, a rastreabilidade e o controle de origem dos materiais passam a assumir papel central não só em sua fase produtiva, mas em todas as etapas posteriores de reutilização, reciclagem e destinação final das baterias de veículos elétricos. As medidas provisórias adotadas pelo governo chinês evidenciam uma resposta regulatória estruturada ao desafio ambiental e econômico decorrente do descarte de baterias de veículos elétricos.

Ao instituir um sistema digital de “acompanhamento e controle” que abrange todo o ciclo de vida das baterias, da fabricação ao descarte, a China reforça a responsabilidade dos fabricantes e recicladores, amplia o controle estatal sobre a cadeia produtiva e reduz a informalidade na destinação desses resíduos. Tal iniciativa consolida a reciclagem como etapa estratégica da eletromobilidade, evidenciando que a rastreabilidade se configura como elemento estruturante da economia circular e da governança ambiental no setor de veículos elétricos (China2Brazil, 2026).

3.4.4 Omissão Normativa quanto ao Lítio na Agenda Regulatória da Agência Nacional de Mineração

No plano jurídico-normativo, observa-se que a Resolução nº 191/2024 da ANM aprova a Agenda Regulatória da ANM, autarquia federal responsável pela regulação e fiscalização da atividade minerária no Brasil, para o biênio 2025–2026, estabelecendo as prioridades de atuação do setor mineral brasileiro a partir de eixos temáticos gerais, como outorga, fiscalização, arrecadação e segurança de barragens.

A análise da cadeia produtiva das baterias de veículos elétricos evidencia a centralidade de materiais estratégicos, dentre os quais se destaca o lítio, cuja relevância decorre de sua aplicação direta na transição energética e no desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono. Entretanto, a referida norma não contempla qualquer menção expressa ao lítio, tampouco a outros minerais estratégicos ou a cadeias produtivas específicas, limitando-se à organização ampla da atividade minerária. Tal omissão evidencia que o planejamento regulatório vigente não incorpora, de forma explícita, substâncias minerais cuja importância vem sendo amplamente reconhecida no cenário internacional.

Dessa forma, constata-se um descompasso entre a relevância crescente do lítio no contexto da transição energética e a ausência de sua previsão na agenda regulatória da mineração brasileira, o que revela a necessidade de atualização dos instrumentos normativos para acompanhar as transformações tecnológicas, ambientais e econômicas contemporâneas.

3.5 Logística Reversa de Baterias de Veículos Elétricos

Conforme Wille (2012, p. 4), o conceito de logística reversa ainda se encontra em evolução e não dispõe de uma definição plenamente consolidada na literatura. Destaca-se que essa indefinição decorre das novas possibilidades de negócios e do interesse crescente de empresas e pesquisadoras na área, o que amplia progressivamente o campo de estudo. Desse modo, a logística reversa assume um caráter dinâmico e evolutivo, adaptando-se às transformações tecnológicas, econômicas e ambientais que influenciam suas práticas e fundamentos teóricos.

Nos termos do art. 3º, XII, da PNRS, a logística reversa é definida como instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final

ambientalmente adequada. Assim, trata-se de instrumento jurídico estruturante da PNRS, que concretiza a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e promove a internalização dos custos ambientais do pós-consumo. Nesse contexto, a logística reversa fortalece a economia circular, reduz impactos ambientais e assegura a reinserção organizada dos resíduos no fluxo produtivo.

3.5.1 Aplicação da Logística Reversa às Baterias de Íon-Lítio dos Veículos Elétricos

Conforme Thode Filho *et al.* (2015, p. 529–538), a PNRS estabelece diretrizes essenciais para a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil, definindo procedimentos voltados à prevenção da poluição, à redução da geração de resíduos e à minimização dos impactos ambientais. Nesse marco normativo, a logística reversa é reconhecida como instrumento estruturante, ao atribuir aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes a responsabilidade pelo retorno dos produtos após o uso, garantindo sua destinação ambientalmente adequada. Os autores ressaltam que esse mecanismo já se encontrava presente em setores como os de pilhas, baterias e pneus, nos quais a obrigação de recolhimento pós-consumo possui consolidação normativa anterior.

De maneira complementar, a gestão dos resíduos sólidos é apresentada como questão de caráter transversal, na medida em que seus impactos não se restringem a um único campo, mas incidem simultaneamente sobre as dimensões ecológica, econômica e social da sustentabilidade. Essa transversalidade evidencia que as decisões relacionadas aos resíduos influenciam tanto a proteção ambiental quanto a dinâmica econômica e as condições sociais, demonstrando a interdependência entre esses três domínios no contexto do desenvolvimento sustentável (Jugend *et al.*, 2022, p. 1492).

Em reforço à abordagem preventiva adotada pelo Direito Ambiental contemporâneo, a Lei de Prevenção da Poluição de 1990 (*Pollution Prevention Act of 1990*), legislação federal dos Estados Unidos, estabelece a obrigatoriedade de apresentação de relatórios anuais sobre redução na fonte e reciclagem de substâncias químicas tóxicas. A norma tem por finalidade priorizar a prevenção da poluição, orientando a redução do uso e da geração de substâncias perigosas na origem, bem como o aperfeiçoamento dos processos produtivos e das práticas gerenciais, consolidando uma abordagem preventiva de proteção ambiental aplicável à gestão de resíduos tecnológicos (Estados Unidos, 1990).

Nesse contexto, a aplicação da logística reversa às baterias de íon-lítio utilizadas em veículos elétricos se revela particularmente relevante, uma vez que tais dispositivos concentram

materiais estratégicos e apresentam riscos ambientais específicos ao final de sua vida útil, exigindo enquadramento jurídico adequado quanto à sua natureza e classificação no âmbito da gestão de resíduos.

3.5.2 Enquadramento Jurídico-Ambiental das Baterias de Íon-Lítio como Resíduos

As baterias de lítio, ao final de sua vida útil, podem ser enquadradas como resíduos perigosos, em razão de suas características de inflamabilidade e reatividade. Segundo a Environmental Protection Agency (EPA), a maioria das baterias de íon-lítio e das baterias primárias de lítio atualmente em uso tende a apresentar códigos de periculosidade associados à inflamabilidade (D001) e à reatividade (D003), o que justifica sua classificação como resíduo perigoso no momento do descarte (Conama, 2022; EPA, s.d.).

A agência esclarece que a responsabilidade pela identificação da periculosidade das baterias descartadas recai sobre o gerador do resíduo, excetuadas aquelas provenientes de uso residencial. Destaca-se, ainda, que a diversidade de composições químicas e de projetos das baterias de lítio, bem como a possível presença de carga residual, dificultam a identificação segura das unidades que apresentam risco no descarte. Diante desse cenário, recomenda-se que as baterias de lítio sejam gerenciadas com cautela ao longo de todo o seu ciclo de vida, sendo tratadas, no contexto empresarial, como resíduos perigosos nos termos das regulamentações federais aplicáveis aos chamados “resíduos universais” (EPA, s.d.).

Nesse contexto, episódios recentes envolvendo o transporte de baterias de íon-lítio reforçam os riscos associados ao manuseio e à circulação inadequados desses sistemas ao longo da cadeia logística. A investigação divulgada pelo National Transportation Safety Board (NTSB) sobre os incêndios ocorridos a bordo do navio cargueiro Genius Star XI revelou que condições climáticas adversas e o acondicionamento inadequado de unidades de sistemas de armazenamento de energia em baterias de íon-lítio permitiram o deslocamento de 41 unidades nos porões de carga, resultando em deformação estrutural interna e na ocorrência de fuga térmica em três delas, o que desencadeou dois incêndios durante a travessia pelo Oceano Pacífico Norte. Embora não tenham sido registrados feridos ou danos ambientais diretos, o caso evidencia os “riscos intrínsecos ao transporte dessas baterias”, destacando a necessidade de medidas técnicas e normativas rigorosas para garantir sua estabilidade e segurança ao longo de toda a cadeia logística (NTSB, 2025).

No contexto da eletromobilidade, as baterias de íons-lítio empregadas em veículos elétricos demandam a adoção de programas estruturados de recolhimento e reciclagem, tanto

em razão dos riscos associados ao pós-consumo quanto da escassez relativa dos minerais utilizados em sua fabricação. Nesse sentido, Moreira (2023) destaca que o incentivo a tais programas pelo poder público, seguido de sua implementação pelo setor privado, constitui medida estratégica para assegurar o reaproveitamento de materiais críticos e reduzir a pressão sobre cadeias extrativas intensivas. O autor observa que, embora a taxa global de reciclagem das baterias de íons-lítio ainda seja reduzida, estimada em cerca de 5%, há expectativa de que, em médio prazo, esse índice se aproxime daquele já consolidado para as baterias de chumbo-ácido, tanto no Brasil quanto em outros países (Moreira, 2023).

Desse modo, o enquadramento das baterias de íon-lítio como resíduos perigosos evidencia a necessidade de instrumentos jurídicos específicos capazes de assegurar sua gestão ambientalmente adequada, reforçando a centralidade da logística reversa como mecanismo preventivo indispensável à sustentabilidade da eletromobilidade.

3.5.3 Desafios Nacionais

3.5.3.1 Infraestrutura Limitada de Reciclagem

As baterias de lítio que equipam a “maior parte dos veículos eletrificados (elétricos e híbridos)” podem ser recicladas em sua totalidade, conforme divulgado pela ABVE, indicando que essa tecnologia de reciclagem já está difundida globalmente e também presente no Brasil por meio de empresas especializadas atuantes no setor (ABVE, 2024). Apesar de as baterias automotivas ainda não terem alcançado a fase de reciclagem em larga escala no país em virtude de sua durabilidade (10 a 15 anos), a ABVE destaca que as mesmas tecnologias de reciclagem aplicadas a dispositivos eletrônicos, como celulares e notebooks, podem ser utilizadas para recuperar “100% dos materiais componentes”, contribuindo para a preservação ambiental e a redução de riscos e prejuízos ao meio ambiente.

A entidade exemplifica que empresas brasileiras já operam nesse segmento, coletando e processando baterias usadas, o que sinaliza a disponibilidade de capacidade técnica e infraestrutura nacional para atender, no momento oportuno, ao mercado automotivo em expansão. Dessa forma, infere-se que a limitação atualmente observada no Brasil não é de natureza técnica, mas essencialmente temporal, decorrente do estágio ainda inicial do ciclo de vida das baterias veiculares em circulação (ABVE, 2024).

3.5.3.2 Processos de Reciclagem das Baterias de Veículo Elétrico e Recuperação da *Black Mass*

A ABVE informa que a reciclagem das baterias de veículos eletrificados envolve um processo industrial no qual os materiais são segregados após a trituração das unidades, possibilitando o reaproveitamento de diferentes frações. Entre os produtos resultantes desse procedimento, destacam-se os materiais plásticos, os metais comuns – como alumínio e cobre – e os metais de maior valor econômico, especialmente lítio, cobalto e níquel (ABVE, 2024).

Esses metais de maior valor se concentram em um resíduo conhecido como *black mass* (massa negra), caracterizado por sua forma pulverulenta e coloração escura, que posteriormente passa por processos específicos de separação para viabilizar sua reutilização na fabricação de novas baterias. A entidade ressalta que tais elementos podem ser reciclados sucessivamente, preservando seu valor estratégico ao longo do tempo. Ainda segundo a ABVE, observa-se crescente interesse internacional por esse material, com a atuação de empresas globais e o estabelecimento de parcerias e *joint ventures* por parte de montadoras voltadas à reciclagem de baterias de veículos eletrificados (ABVE, 2024).

A viabilização em larga escala desse processo, contudo, depende da existência de infraestrutura industrial de reciclagem capaz de operar em escala comercial, como demonstram experiências internacionais recentemente consolidadas, a exemplo de unidades industriais especializadas na produção e no processamento de *black mass*.

A entrada em operação comercial, em 2025, da planta de *black mass* da Badische Anilin- und Soda-Fabrik (BASF), em Schwarzheide, na Alemanha, conforme divulgado pela própria empresa, representa um avanço relevante na consolidação da reciclagem industrial de baterias de íon-lítio no contexto da economia circular. Trata-se de uma das maiores instalações comerciais desse tipo na Europa, com capacidade anual de processamento de até 15.000 toneladas de baterias em fim de vida útil e de resíduos oriundos da produção, o que corresponde a aproximadamente 40.000 baterias de veículos elétricos por ano (BASF, 2025).

Segundo a BASF (2025), o empreendimento evidencia a maturidade tecnológica já alcançada pelos processos de recuperação de materiais estratégicos, demonstrando a viabilidade técnica e econômica da reciclagem em escala industrial como etapa estruturante do ciclo de vida das baterias. Ao permitir a reinserção de metais críticos na cadeia produtiva, a iniciativa contribui para a redução da dependência de matérias-primas virgens, a mitigação de impactos ambientais associados à mineração e o fortalecimento de modelos produtivos compatíveis com os princípios da sustentabilidade e da logística reversa no setor da eletromobilidade.

Nesse contexto, a *black mass* passou a adquirir relevância econômica no mercado internacional, sendo reconhecida, desde 2024, como commodity regulada em bolsas como a Bolsa de Metais de Londres, com preços entre R\$ 20,00 e R\$ 30,00 por quilograma, e com um mercado global avaliado em US\$ 14,4 bilhões em 2024, com projeção de alcançar US\$ 51,7 bilhões até 2032, impulsionando a estruturação de empresas brasileiras voltadas à reciclagem de baterias e à mineração urbana (Tratamento de Água, 2025).

3.6 Projetos de Lei e Marco Regulatório da Reciclagem de Baterias

3.6.1 A Logística Reversa das Baterias de Veículos Elétricos no Projeto de Lei nº 2.327/2021

No contexto da logística reversa das baterias de veículos elétricos, a aprovação do Projeto de Lei (PL) nº 2.327/2021 pela Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal reforça a diretriz de priorização da reciclagem e do reaproveitamento dos componentes das baterias de veículos elétricos no âmbito da PNRS. A proposição reconhece a relevância ambiental da logística reversa e reafirma o papel dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes na implementação do sistema, em consonância com o modelo já previsto na Lei nº 12.305/2010 (Agência Senado, 2024).

3.6.1.1 Conteúdo normativo do Projeto de Lei nº 2.327/2021

O PL nº 2.327/2021 propõe alteração pontual na PNRS, mediante o acréscimo do § 9º ao art. 33, com a finalidade de disciplinar a logística reversa das baterias de veículos elétricos. O dispositivo proposto estabelece que a logística reversa dessas baterias deverá priorizar sistemas de reciclagem dos materiais componentes, visando ao seu reaproveitamento como insumo na fabricação de novas baterias (Brasil, 2021).

3.6.1.2 Elementos da Logística Reversa Extraídos do Texto do Projeto de Lei nº 2.327/2021

A partir do conteúdo normativo do PL nº 2.327/2021, é possível identificar, de forma expressa, os elementos centrais relacionados à logística reversa das baterias de veículos elétricos. O texto legal delimita como objeto da logística reversa as baterias utilizadas em veículos elétricos e estabelece como diretriz prioritária a adoção de sistemas de reciclagem dos materiais componentes. A finalidade dessa priorização consiste no reaproveitamento dos materiais recuperados como insumo na fabricação de novas baterias, reforçando a lógica de

retorno dos resíduos ao ciclo produtivo, conforme o modelo já previsto no art. 33 da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2021).

Observa-se, contudo, que o PL nº 2.327/2021 não avança na definição de aspectos operacionais da logística reversa, uma vez que não dispõe sobre procedimentos técnicos, critérios de implementação, metas quantitativas, prazos, instrumentos de fiscalização ou mecanismos específicos de controle. Dessa forma, os elementos normativos extraídos do texto permanecem circunscritos ao plano das diretrizes gerais, mantendo a execução concreta da logística reversa das baterias de veículos elétricos vinculada à estrutura já existente na PNRS (Brasil, 2021).

3.6.1.3 Análise da Justificativa do Projeto de Lei nº 2.327/2021

Na Justificação, o autor do PL nº 2.327/2021 fundamenta a proposição no crescimento do uso de veículos elétricos e na necessidade de enfrentar a destinação ambientalmente adequada das baterias ao final de sua vida útil, estimada em aproximadamente quinze anos. O projeto reconhece que, embora os veículos elétricos não emitam dióxido de carbono durante a fase de uso, subsiste preocupação ambiental relevante quanto ao destino das baterias após o esgotamento de sua vida útil (Brasil, 2021).

A justificação descreve de forma objetiva a “composição material das baterias de veículos elétricos”, destacando que elas são constituídas majoritariamente por alumínio, aço e plástico, além de conterem matérias-primas metálicas específicas, tais como “grafite, níquel, cobalto, manganês e lítio”. A justificação exemplifica que uma bateria com aproximadamente 400 quilogramas pode conter, entre outros elementos, cerca de 100 kg de grafite, 32 kg de níquel, 11 kg de cobalto, 10 kg de manganês e 6 kg de lítio (Brasil, 2021).

Nessa seara, a justificação do PL nº 2.327/2021 aponta a reciclagem como mecanismo capaz de recuperar parte dessas matérias-primas, associando a logística reversa à possibilidade de reaproveitamento dos materiais como insumos produtivos. Vincula ainda essa recuperação à viabilização da tecnologia dos veículos elétricos e à garantia da destinação ambientalmente adequada dos rejeitos, nos termos do art. 33, inciso II, da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2021).

3.6.1.4 Limites Normativos do Projeto de Lei nº 2.327/2021

Apesar dos fundamentos ambientais e produtivos apresentados na justificativa, o conteúdo normativo do PL nº 2.327/2021 se mantém restrito à fixação de uma diretriz geral.

Não há, no texto legal, detalhamento de mecanismos jurídicos operacionais capazes de assegurar a implementação concreta da logística reversa das baterias de veículos elétricos.

Do ponto de vista da logística, o PL adota técnica legislativa de intervenção mínima, limitando-se ao acréscimo de um parágrafo ao art. 33 da Lei nº 12.305/2010. Dessa forma, reforça a importância da reciclagem no âmbito da logística reversa, mas mantém sua efetivação dependente da estrutura já prevista na PNRS, sem enfrentar questões relacionadas à regulamentação específica ou à padronização nacional do sistema.

3.7 O Projeto de Lei nº 2.132/2025 e Circularidade das Baterias de Veículos Elétricos

3.7.1 Conteúdo Normativo do Projeto de Lei nº 2.132/2025

O PL nº 2.132/2025, disciplina a circularidade das baterias utilizadas em veículos elétricos e institui a “Política Nacional de Circularidade das Baterias”, estabelecendo um regime jurídico específico voltado à gestão do ciclo de vida desses produtos. O art. 1º delimita o objeto da lei e prevê, em seu parágrafo único, a aplicação subsidiária da Lei nº 12.305/2010, desde que não haja conflito com as disposições específicas do novo diploma legal (Brasil, 2025).

A proposição apresenta estrutura normativa própria, organizada em capítulos, com disposições gerais, definição de conceitos, objetivos, princípios, instrumentos e mecanismos institucionais, evidenciando uma abordagem sistematizada da temática da circularidade das baterias de veículos elétricos (Brasil, 2025).

3.7.2 Elementos da Circularidade das Baterias Extraídos do Texto Legal

O PL nº 2.132/2025 define, de forma expressa, os conceitos centrais que estruturam o regime jurídico da circularidade das baterias. São estabelecidas definições normativas para bateria, circularidade, economia circular, economia de baixo carbono, extração sustentável de resíduos minerais, passaporte de bateria, produtos pós-consumo, recuperação de valor, reparo, remanufatura, retenção de valor, reuso, veículos elétricos ou híbridos e vida útil (Brasil, 2025).

A circularidade é concebida como o alinhamento das ações de produtores, comercializadores e consumidores aos princípios da economia circular, orientando a gestão das baterias ao longo de todo o seu ciclo de vida. O texto normativo contempla estratégias como reutilização, reparo, remanufatura, reuso, recuperação de valor e reciclagem, superando a lógica exclusiva do descarte ao final da vida útil (Brasil, 2025).

3.7.3 Objetivos e Princípios da Política Nacional de Circularidade das Baterias

O art. 3º do PL nº 2.132/2025 explicita os objetivos da norma, destacando a prevenção e a redução dos efeitos negativos do descarte de baterias sobre o meio ambiente e a saúde humana, a redução da geração de resíduos, o uso eficiente e sustentável dos recursos naturais e minerais, o incentivo à pesquisa, ao desenvolvimento e à inovação, bem como a promoção da transição para uma economia circular de baixo carbono (Brasil, 2025).

Os princípios elencados no art. 4º reforçam essa orientação, ao enfatizar a eliminação de resíduos, a retenção de valor das baterias, a eficiência na gestão dos recursos minerais, a publicidade das informações ao longo de toda a vida útil da bateria, a proteção do meio ambiente ecologicamente equilibrado, a segurança dos usuários e trabalhadores e a saúde ocupacional na cadeia produtiva voltada à circularidade das baterias (Brasil, 2025).

3.7.4 Instrumentos e Estrutura Institucional da Política de Circularidade das Baterias

O PL nº 2.132/2025 estabelece como instrumentos da circularidade das baterias a Política Nacional de Circularidade das Baterias, a extração sustentável de resíduos minerais e a rastreabilidade. A política instituída tem como objetivo planejar e fomentar a transição para a circularidade das baterias, devendo contemplar medidas de fomento para todas as etapas da cadeia produtiva, estimular a geração de capacidades tecnológicas nacionais e envolver os entes federados subnacionais (Brasil, 2025).

O texto atribui deveres específicos aos fabricantes e ao Poder Público. Aos fabricantes, impõe-se a obrigação de informar os materiais e suas quantidades empregados na fabricação das baterias e de comprovar a origem desses materiais, certificando-os quanto à sustentabilidade e ao respeito aos direitos humanos. Ao Poder Público, cabe definir padrões de sustentabilidade das baterias, estabelecer metas de recuperação de valor e promover a participação de cooperativas locais ou regionais nas atividades de extração sustentável de resíduos minerais (Brasil, 2025).

3.7.5 Rastreabilidade e Passaporte de Bateria

O PL nº 2.132/2025 introduz a rastreabilidade da bateria como obrigação compartilhada entre fabricantes e usuários, por meio do “passaporte de bateria” e de outros instrumentos certificáveis. O “passaporte de bateria” é definido como registro digital individualizado,

contendo informações relevantes sobre o ciclo de vida da bateria, com vistas à remanufatura, ao reuso e à recuperação de valor (Brasil, 2025).

A norma prevê que a rastreabilidade deve permitir ao Poder Público fiscalizar o cumprimento do art. 33 da Lei nº 12.305/2010, bem como assegurar o acesso às informações técnicas essenciais sobre as baterias, em consonância com as normas de proteção e informação ao consumidor (Brasil, 2025).

No plano internacional, observa-se a adoção de instrumentos semelhantes como suporte à economia circular, baseados na atribuição de identificação digital às baterias, com dados sobre produção, composição, uso e desempenho. Esses mecanismos ampliam a transparência e a rastreabilidade ao longo da cadeia produtiva, permitindo a verificação de padrões ambientais, sociais e de governança (Optel Group, s.d.).

Além disso, o acesso a informações técnicas detalhadas possibilita a definição de estratégias mais eficientes de reutilização, remanufatura e reciclagem, contribuindo para a gestão ambientalmente adequada desses resíduos. Nesse contexto, o passaporte de bateria é instrumento relevante para a consolidação da economia circular, ao promover maior eficiência, transparência e sustentabilidade na gestão das baterias de veículos elétricos.

3.7.6 Análise da Justificação do Projeto de Lei nº 2.132/2025

Na Justificação, o autor fundamenta a proposição no crescimento acelerado da eletrificação da frota brasileira e na necessidade de prevenir impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado das baterias ao final de sua vida útil, estimada entre quinze e vinte anos. O texto reconhece que a eletrificação dos veículos pode se tornar ambientalmente danosa caso não sejam adotadas medidas adequadas para a gestão das baterias inutilizadas (Brasil, 2025).

A justificação destaca que a PNRS carece de disposições mais detalhadas sobre a circularidade dos produtos, lacuna que se torna especialmente relevante no caso das baterias de veículos elétricos, em razão de seu peso elevado e da presença de metais de valor, como “lítio, cobalto, manganês e níquel”. São indicadas como possibilidades de aproveitamento das baterias ao final da vida útil a reutilização em aplicações estáticas e a extração sustentável de resíduos minerais, com a recuperação dos minérios para novos ciclos produtivos (Brasil, 2025).

O PL nº 2.132/2025 associa essas estratégias à lógica da economia circular, destacando a substituição do modelo linear de extração, consumo e descarte por um sistema orientado à eficiência no uso dos recursos naturais, à redução dos impactos ambientais da mineração e à

mitigação das mudanças climáticas, em consonância com os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris (Brasil, 2025).

A partir da análise empreendida², observa-se que o Projeto de Lei nº 2.132/2025 apresenta abordagem normativa ampla e estruturada sobre a circularidade das baterias de veículos elétricos, ao instituir política nacional específica, definir conceitos, objetivos, princípios e instrumentos, e atribuir deveres a fabricantes e ao Poder Público. O projeto eleva a densidade normativa em relação a proposições anteriores, embora a efetividade de diversos comandos permaneça condicionada à regulamentação posterior (Brasil, 2025).

3.8 Governança Institucional e Iniciativas no Amazonas

3.8.1 A Fábrica da BYD em Manaus e a Produção de Baterias de Ferro-Lítio

A unidade da BYD Indústria de Baterias, instalada em Manaus desde o segundo semestre de 2020, integra a estratégia do grupo BYD de expansão da produção de baterias voltadas à mobilidade elétrica e ao armazenamento de energia no Brasil. Conforme relata Lorenzon (2024), a instalação industrial de Manaus se encontra preparada para a produção da *Blade Battery*, tecnologia baseada em fosfato de ferro-lítio, destacada pela empresa por sua maior eficiência, segurança, durabilidade e menor custo.

Atualmente, a operação da unidade é integralmente direcionada à produção de “módulos de baterias para ônibus elétricos”, com capacidade anual de até “54 mil módulos”, destinados à unidade de Campinas (SP), onde são montados os chassis dos veículos. Segundo informações da própria empresa, essa produção estaria associada à redução estimada de “31 milhões de toneladas de CO₂”, em consonância com a estratégia corporativa de menor pegada de carbono. A produção em Manaus é “majoritariamente B2B³”, utiliza “componentes importados da China” e depende de logística baseada no transporte por cabotagem até o Porto de Santos, além de destacar o desenvolvimento local de tecnologias voltadas ao armazenamento de energia e comunicação adaptadas às condições climáticas da região amazônica (Lorenzon, 2024).

² Trata-se de análise de caráter normativo e aplicado, baseada na estrutura dos Projetos de Lei examinados, nos termos do recorte metodológico adotado neste trabalho.

³ Os carregadores de bateria para bateria (B2B) são dispositivos de carregamento avançados projetados para carregar uma bateria auxiliar a partir da bateria principal do veículo. Ao contrário dos carregadores tradicionais, os carregadores B2B utilizam um método mais sofisticado, garantindo que a bateria auxiliar receba uma carga devidamente regulada, adaptada ao seu tipo e condição específicos. Disponível em: <https://www.simplysplitcharge.co.uk/blogs/news/essential-guide-to-battery-to-battery-charger-kits>. Acesso em: 22 jan 2026.

3.8.2 O Papel da Suframa na Industrialização e Logística Sustentável

A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e impõe a necessidade de instrumentos capazes de assegurar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos, inclusive daqueles de maior complexidade tecnológica, como as baterias de veículos elétricos (Brasil, 2010).

No contexto do PIM, a unidade de produção de baterias da BYD contribui para o crescimento da cadeia de eletromobilidade no Brasil, com a fabricação de módulos e baterias para veículos elétricos, o que torna ainda mais premente a necessidade de sistemas de logística reversa estruturados para o adequado tratamento desses produtos ao final de sua vida útil (Lorenzon, 2024).

Nesse cenário, o Plano de Logística Sustentável da Superintendência da Zona Franca de Manaus (Suframa) apresenta diretrizes compatíveis com os objetivos da PNRS, especialmente no que se refere à racionalização de recursos, à gestão de resíduos e à eficiência dos fluxos logísticos (Suframa, s.d.).

À luz desses instrumentos normativos, a aplicação de tais diretrizes à realidade da produção de baterias em Manaus se revela pertinente para a estruturação da logística reversa das baterias de veículos elétricos, ao reforçar a internalização dos custos ambientais pelos agentes econômicos envolvidos e ao promover uma governança logística que considere a redução de impactos ambientais em toda a cadeia, em consonância com o princípio do poluidor-pagador (Brasil, 2010; Suframa, 2016; Lorenzon, 2024).

3.9 Estrutura Normativa Estadual

3.9.1 Vigência das Normas Estaduais e Enquadramento Jurídico da Logística Reversa no Estado do Amazonas

As normas estaduais que disciplinam a gestão de resíduos sólidos e a logística reversa no estado do Amazonas se encontram em vigor e integram o ordenamento jurídico ambiental atualmente aplicável. A Lei Estadual nº 4.659, de 27 de agosto de 2018, dispõe sobre o cadastro para compra, venda ou troca de cabo de cobre, alumínio, baterias e transformadores destinados à reciclagem no estado do Amazonas, estabelecendo obrigações administrativas específicas aos agentes que realizam esse tipo de operação. Nos termos do referido diploma legal, é obrigatória a realização de cadastro específico de compra, venda ou troca, com a identificação do vendedor

e do comprador, bem como a indicação da data da operação, da quantidade e da origem dos materiais comercializados, incluindo expressamente as baterias.

A lei prevê, ainda, a aplicação de penalidades administrativas em caso de descumprimento, consistentes em multa e apreensão do material, dispondo que entrou em vigor após o decurso de cento e oitenta dias de sua publicação. Observa-se, contudo, que a norma não diferencia espécies de baterias nem estabelece tratamento específico para baterias de veículos elétricos, limitando-se ao controle administrativo da comercialização de materiais destinados à reciclagem, nos exatos termos em que se encontra redigida.

No plano da política pública ambiental, a Lei Estadual nº 4.457, de 12 de abril de 2017, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas (PERS/AM), permanece igualmente vigente e constitui o marco normativo estruturante da gestão e do gerenciamento de resíduos sólidos no âmbito estadual. A lei elenca a logística reversa entre os instrumentos da política estadual, ao lado da responsabilidade compartilhada, dos termos de compromisso e dos acordos setoriais. No capítulo específico dedicado à logística reversa, o diploma legal define esse instrumento como instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada, conforme disposto no art. 28.

A norma legal estabelece, ainda, a obrigação de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes estruturarem e implementarem sistemas de logística reversa mediante o retorno dos subprodutos residuais e das embalagens após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.

A regulamentação desses dispositivos ocorre por meio do Decreto estadual nº 50.890, de 16 de dezembro de 2024, que regulamenta especificamente o art. 31 da PERS/AM. O decreto dispõe sobre a exigência de sistemas de logística reversa de produtos e embalagens após o uso do consumidor no âmbito do estado do Amazonas, aplicando-se aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos. Entre aqueles sujeitos à obrigatoriedade de estruturação e implementação de sistemas de logística reversa, o decreto inclui expressamente as pilhas e baterias, inclusive automotivas.

O diploma regulamentar estabelece, ainda, que o cumprimento das obrigações relativas à logística reversa será exigido como condicionante para a emissão ou renovação da licença ambiental, além de prever a apresentação de Planos de Logística Reversa no prazo de até doze meses após a sua publicação, revogando expressamente as disposições em contrário, em especial o Decreto Estadual nº 47.117, de 7 de março de 2023. Não há, entretanto, no texto do

decreto, diferenciação entre tipos de baterias nem referência específica às baterias de íon-lítio utilizadas como baterias de tração em veículos elétricos, limitando-se a regulamentação às categorias de produtos expressamente elencadas.

No contexto amazônico, tais desafios assumem contornos mais complexos, na medida em que a disponibilidade de infraestrutura para o tratamento de resíduos perigosos ainda se apresenta de forma limitada em determinadas áreas. Esse cenário pode ampliar a exposição a riscos ambientais e sociais associados à destinação inadequada desses materiais. Ademais, as particularidades institucionais e logísticas da região indicam a relevância de soluções descentralizadas e compatíveis com as especificidades locais, de modo a favorecer a gestão ambientalmente adequada desses resíduos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve por objetivo analisar o enquadramento jurídico das baterias de veículos elétricos no ordenamento brasileiro, à luz do Direito Ambiental, especialmente no contexto da expansão da eletromobilidade e dos desafios associados à gestão de seus resíduos. Ao longo do estudo, evidenciou-se que, embora os veículos elétricos representem importante alternativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, sua cadeia produtiva e o ciclo de vida de suas baterias não estão isentos de impactos ambientais relevantes.

A análise técnica demonstrou que as baterias de íons de lítio possuem composição complexa, envolvendo metais críticos e substâncias potencialmente perigosas, cuja extração, processamento e descarte demandam elevado consumo energético e apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Sob a perspectiva jurídica, verificou-se que tais características são compatíveis com os critérios de classificação de resíduos perigosos, especialmente quando consideradas as situações de manuseio inadequado, armazenamento impróprio e descarte irregular.

Nesse contexto, constatou-se que a PNRS (Lei nº 12.305/2010), embora represente importante marco regulatório, não contempla de forma específica as baterias de veículos elétricos, evidenciando a existência de lacuna normativa relevante. Ainda assim, a interpretação sistemática da legislação vigente, aliada aos princípios da prevenção e do poluidor-pagador, bem como à orientação jurisprudencial do STJ quanto à responsabilidade civil objetiva por danos ambientais, permitem sustentar o enquadramento dessas baterias como resíduos perigosos, exigindo tratamento jurídico diferenciado.

A partir dessa constatação, a pesquisa avançou para a análise de instrumentos capazes de viabilizar a gestão ambientalmente adequada desses resíduos, destacando-se a engenharia reversa como paradigma relevante na reestruturação da cadeia produtiva. Tal abordagem, em consonância com os fundamentos da logística reversa previstos na PNRS, possibilita a recuperação de materiais, a redução de impactos ambientais e a reinserção dos componentes em novos ciclos produtivos, contribuindo para a consolidação de práticas alinhadas à economia circular.

No plano normativo, verificou-se que já existem iniciativas legislativas voltadas ao enfrentamento dessa problemática. O PL nº 2.327/2021 propõe a alteração da PNRS, com vistas à inclusão das baterias de veículos elétricos no regime de logística reversa, priorizando a reciclagem e o reaproveitamento de seus componentes. Por sua vez, o PL nº 2.132/2025

apresenta abordagem mais abrangente, ao instituir a Política Nacional de Circularidade das Baterias, prevendo instrumentos como rastreabilidade, metas de reaproveitamento e incentivos à reciclagem. Tais propostas evidenciam o reconhecimento, no âmbito legislativo, da insuficiência do modelo atual e da necessidade de tratamento normativo específico para esses resíduos.

No que se refere ao estado do Amazonas, destacam-se desafios adicionais relacionados à logística e à infraestrutura para a gestão de resíduos, o que torna ainda mais relevante a implementação de instrumentos eficazes de coleta, transporte e destinação final das baterias. Nesse contexto, a aplicação das diretrizes da PNRS se mostra fundamental para viabilizar soluções compatíveis com as especificidades regionais.

Diante desse cenário, foram apresentadas proposições voltadas ao aperfeiçoamento do marco regulatório, com destaque para a necessidade de inclusão das baterias de veículos elétricos no regime de logística reversa obrigatória, a implementação de sistemas de rastreabilidade, a padronização de procedimentos técnicos de destinação final e o incentivo à reciclagem e ao reaproveitamento de materiais. Tais medidas são essenciais para assegurar a efetividade da gestão desses resíduos e evitar a transferência dos custos ambientais à coletividade.

Dessa maneira, a presente pesquisa contribui para o campo do Direito Ambiental ao evidenciar a lacuna normativa existente na disciplina das baterias de veículos elétricos no ordenamento jurídico brasileiro e ao propor diretrizes técnico-jurídicas voltadas ao seu adequado enquadramento e gestão, em consonância com os princípios estruturantes da proteção ambiental e com os objetivos da PNRS.

Por fim, conclui-se que a consolidação da eletromobilidade como alternativa sustentável depende não somente da substituição tecnológica dos veículos movidos a combustíveis fósseis, mas da construção de um arcabouço jurídico capaz de garantir a gestão ambientalmente adequada de seus resíduos. Nesse contexto, o avanço das propostas legislativas em tramitação e o aperfeiçoamento das normas existentes se tornam indispensáveis para assegurar que os benefícios ambientais da mobilidade elétrica não sejam comprometidos pela inadequada destinação de suas baterias, consolidando, assim, um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

REFERÊNCIAS

ANM. Resolução da Agência Nacional de Mineração nº 191, de 18 de dezembro de 2024. Aprova a Agenda Regulatória da Agência Nacional de Mineração (ANM) para o biênio 2025/2026. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/governanca-regulatoria/agenda-regulatoria/agenda-regulatoria-2024-2026/documentos-agenda-regulatoria/resolucoes-portarias-1/resolucao-anm-no-191-2024.pdf/view>. Acesso em: 30 abr. 2026.

AGÊNCIA SENADO. Comissão de Meio Ambiente aprova projeto que prioriza reciclagem de baterias de veículos elétricos. Brasília: Senado Federal, 30 out. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/08/30/projeto-que-prioriza-reciclagem-de-baterias-eletricas-vai-a-camara>. Acesso em: 18 jan. 2025.

AHMADI, Leila; YOUNG, Steven B.; FOWLER, Michael; FRASER, Roydon A.; ACHACHLOUEI, Mohammad Ahmadi. Life cycle assessment of Li-ion batteries for electric vehicles reuse in stationary applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 111-124, 2017. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017IJLCA..22..111A/abstract>. Acesso em: 20 nov. 2025.

AMAZONAS. Decreto nº 47.117, de 7 de março de 2023. Regulamenta a logística reversa de embalagens em geral no Estado do Amazonas e dá outras providências. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=443102>. Acesso em: 30 abr. 2026.

AMAZONAS. Decreto nº 50.890, de 16 de dezembro de 2024. Regulamenta o art. 31 da Lei Estadual nº 4.457/2017, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/AM), e estabelece diretrizes para a implementação da logística reversa no Estado do Amazonas. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=470720>. Acesso em: 30 abr. 2026.

AMAZONAS. Lei nº 1.532, de 6 de julho de 1982. a Política Estadual da Prevenção e Controle da Poluição, Melhoria e Recuperação do Meio Ambiente e de Proteção aos Recursos Naturais, e dá outras providências. Disponível em: https://legisla.imprensaoficial.am.gov.br/diario_am/12/1982/7/7161. Acesso em: 29 mar 2025.

AMAZONAS. Lei nº 4.659, de 27 de agosto de 2018. Dispõe sobre cadastro para compra, venda ou troca de cabo de cobre, alumínio, baterias e transformadores para reciclagem no Estado do Amazonas. *Diário Oficial do Estado do Amazonas*, Manaus, 27 ago. 2018. Disponível em: <https://sapl.al.am.leg.br/norma/10165>. Acesso em: 30 abr. 2026.

AMAZONAS. Lei nº 4.457, de 12 de abril de 2017. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Amazonas – PERS/AM e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Amazonas*, Manaus, 12 abr. 2017. Disponível em: https://legisla.imprensaoficial.am.gov.br/diario_am/12/2017/4/1053. Acesso em: 30 abr. 2026.

ANDERSON, Kara. The harmful effects of our lithium batteries. *Greenly Earth*, 23 de julho de 2024. Disponível em: <https://greenly.earth/en-gb/blog/industries/the-harmful-effects-of-our-lithium-batteries>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ABVE. Baterias de lítio de veículos eletrificados podem ser até 100% recicladas. Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 28 de agosto de 2024. Disponível em: <https://abve.org.br/baterias-de-veiculos-eletrificados-podem-ser-100-recicladas/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

ABVE. ABVE aprimora classificação dos veículos eletrificados a partir de janeiro: veja os números. Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 10 de fevereiro de 2025. Disponível em: <https://abve.org.br/abve-aprimora-classificacao-dos-eletrificados-a-partir-de-janeiro-veja-os-numeros/>. Acesso em: 15 fev. 2026.

ABVE. Veículos plug-in se consolidam, puxam o mercado de eletrificados e chegam a 81% em outubro. Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 7 de novembro de 2025. Disponível em: <https://abve.org.br/veiculos-plug-in-se-consolidam-puxam-o-mercado-de-eletrificados-e-chegam-a-81-em-outubro/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

ABVE. A transição para veículos elétricos no Brasil oferece uma economia de US\$ 250 bilhões. Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 20 de janeiro de 2026. Disponível em: <https://abve.org.br/a-transicao-para-veiculos-eletricos-no-brasil-oferece-uma-economia-de-us-250-bilhoes-r-139-trilhao/>. Acesso em: 13 fev. 2026.

BARAN, Renato.; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. BNDES Setorial, n. 33, Rio de Janeiro, mar. 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1489>. Acesso em: 30 abr. 2026.

BARBIERI, José Carlos. Desenvolvimento sustentável: Das origens à agenda 2030. Petrópolis-RJ: Editora Vozes, 2020. Edição do Kindle.

BARROS, Rodrigo. Seis dos dez veículos elétricos mais vendidos no país são da BYD. CNN Brasil, 3 de novembro de 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/auto/seis-dos-dez-veiculos-eletricos-mais-vendidos-no-pais-sao-da-byd/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

BASF. BASF starts commercial operation of Black Mass plant for Battery Recycling in Schwarzheide, Germany. Badische Anilin- und Soda-Fabrik, News release, 3 jun. 2025. Disponível em: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2025/06/p-25-112>. Acesso em: 29 jan. 2026.

BECKHAUSER, Elisa Fiorini. A Natureza como Sujeito de Direitos no Paradigma do Estado de Bem Viver: Análise das inovações aportadas pela Constituição do Equador de 2008. Erechim-RS: Editora Deviant, 2020. Edição do Kindle.

BEDNARSKI, Caio. Indústria Automotiva Nacional é Referência Mundial no uso de Energia Limpa. AutoData, 28 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.autodata.com.br/noticias/2023/06/28/industria-automotiva-nacional-e-referencia-mundial-no-uso-de-energia-limpa/58152/> Acesso em: 18 jul 2025.

BENJAMIN, Antonio Herman; FERREIRA, Helene Sivini; CANOTILHO, José Joaquim Gomes; ARAGÃO, Maria Alexandra de Souza; AYALA, Patryck de Araújo; MACHADO, Paulo Affonso Leme; BIANCHI, Patrícia Nunes Lima; LEITE, José Rubens Morato. Direito constitucional ambiental brasileiro. 6ª ed. São Paulo: Saraiva, 2015. Edição do Kindle.

BOBBIO, Norberto. A era dos direitos. Tradução de Carlos Nelson Coutinho; apresentação de Celso Lafer. 2ª ed. Rio de Janeiro: Atlas/GEN, 2022.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 16 maio 2025.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm. Acesso em: 12 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 21 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 30 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 30 abr. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Minerais estratégicos para a transição energética. 12 nov. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/brasil-lider-mundial-na-transicao-energetica/transicao-energetica/minerais-estrategicos-para-transicao-energetica>. Acesso em: 31 mar. 2026

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Logística Reversa. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/logistica-reversa>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Protocolo de Quioto, [s.d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 22 set. 2025.

BRASIL. Ministério Público Federal. Recomendação nº 30, de 3 de setembro de 2025. Recomenda à Agência Nacional de Mineração (ANM) a suspensão e revisão de autorizações de pesquisa e lavra de lítio no Vale do Jequitinhonha (MG). Belo Horizonte: Procuradoria da República em Minas Gerais, 2025. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/09/litio-mg-mpf.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei nº 2.132, de 2025. Disciplina a circularidade de baterias utilizadas em veículos elétricos e institui a Política Nacional de Circularidade das Baterias. Brasília, 2025. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg->

getter/documento?dm=9946141&ts=1760540176363&disposition=inline. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei nº 2.327, de 2021. Altera a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar da logística reversa para baterias de veículos elétricos. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=8983394>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Superior Tribunal de Justiça. Recurso Especial nº 1.374.284/MG. Relator: Ministro Luis Felipe Salomão. Segunda Seção. Julgado em 27 ago. 2014. Diário da Justiça Eletrônico, Brasília, DF, 5 set. 2014.

BRASIL. Tribunal Regional Federal da 6ª Região. Agravo de Instrumento nº 6010277-90.2025.4.06.0000/MG. Relatora: Genevieve Grossi Orsi. Julgado em: 12 nov. 2025. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/jurisprudencia/trf-6/5297862296/inteiro-teor-5297862298>. Acesso em: 13 abr. 2026.

BYD. BYD inicia operações em sua fábrica de baterias de fosfato de ferro-lítio no Brasil. Build Your Dreams, Manaus, 1 de setembro de 2020. Disponível em: <https://www.byd.com/br/news/2020/09/byd-inicia-operacoes-em-sua-fabrica-de-baterias-de-fosfato-de-ferro-litio-no-brasil>. Acesso em: 7 nov. 2025.

CAMPOS, Luísa. Comunidades do Vale do Jequitinhonha sofrem com impactos socioambientais da “corrida do lítio”. Caritas Regional Minas Gerais, 4 de junho de 2024. Disponível em: <https://mg.caritas.org.br/noticias/comunidades-do-vale-do-jequitinhonha-sofrem-com-impactos-socioambientais-da-corrida-do-litio>. Acesso em: 7 out. 2025.

CAPELL, Claudio; CARVALHO, Rodrigo. Carros Elétricos: a revolução da mobilidade sustentável. 2025. Edição do Kindle.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. Texto para Discussão nº 1606. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2011. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/91332>. Acesso em: 30 abr. 2026.

CARVALHO, Doralina Rodrigues. Do lítio ao lixo: devastação no Vale do Jequitinhonha. Brasil de Fato, Mineração, 6 de dezembro de 2024. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2024/12/06/do-litio-ao-lixo-devastacao-no-vale-do-jequitinhonha>. Acesso em: 30 abr. 2026.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; FERREIRA, Tiago Toledo. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, 2010. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/335073361.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2025.

CHAMARELLI, Renata. PNUMA: o mundo precisa superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso. Nações Unidas Brasil, 28 de fevereiro de 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/261852-pnuma-o-mundo-precisa-superar-era-do-desperdicio-e-transformar-o-lixo-em-recurso>. Acesso em: 1 maio 2025.

CONAMA. Anexo 6 - Resíduos Sólidos Industriais. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/sqa_p2r2_1/_arquivos/anexo_6__gt_mapeamento_106.pdf. Acesso em: 30 abr. 2026.

CONMETRO. Resolução nº 4, de 15 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 2010. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/resc000236.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CORDANI, Umberto G.; MARCOVITCH, Jacques; SALATI, Eneas. Avaliação das ações brasileiras após a Rio-92. *Estudos Avançados*, v. 11, n. 29, p. 399-408, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141997000100019>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CÓRDULA, Eduardo Beltrão de Lucena; NASCIMENTO, Glória Cristina Cornélio do. A Hermenêutica Do Meio Ambiente: Concepções, Percepções e Problemas. Disponível em: <https://www.revistaeea.org/pf.php?idartigo=1848>. Acesso em: 30 mar. 2025.

CORNELL LAW SCHOOL. Reverse engineering. *Wex Legal Dictionary*. Disponível em: https://www.law.cornell.edu/wex/reverse_engineering. Acesso em: 16 abr. 2026.

EPA. Lithium-ion battery recycling: frequently asked questions. Washington, DC: Environmental Protection Agency, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/lithium-ion-battery-recycling-frequently-asked-questions#hazwaste>. Acesso em: 14 jan. 2026.

ESTADOS UNIDOS. Pollution Prevention Act of 1990. Public Law 101-508, 5 nov. 1990. Disponível em: <https://www.epa.gov/p2/pollution-prevention-act-1990>. Acesso em: 17 dez. 2025.

CHINA2BRAZIL. China cria sistema digital para rastrear reciclagem de baterias de veículos elétricos. *Exame*, 16 de janeiro de 2026. Disponível em: <https://exame.com/mundo/china-cria-sistema-digital-para-rastrear-reciclagem-de-baterias-de-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 7 fev. 2026.

GARCÍA, Mayela Sánchez . Lítio: o que é, de onde vem e quais as consequências de sua extração. Associação Interamericana para a Defesa do Ambiente, 2023. Disponível em: <https://aida-americas.org/es/blog/litio-o-que-e-de-onde-vem-e-quais-consecuencias-de-sua-extracao>. Acesso em: 13 nov. 2025.

GATES, Bill. Como evitar um desastre climático: As soluções que temos e as inovações necessárias. São Paulo: Companhia das Letras, 2021. Edição do Kindle.

GAUTO, Marcelo. Eletrificação: poluindo mais para poluir menos? Parte 1 – Baterias. *Eixos*, 5 de julho de 2022. Disponível em: <https://eixos.com.br/transicao-energetica/eletrificacao-poluindo-mais-para-poluir-menos-parte-1-baterias/>. Acesso em: 9 nov. 2025.

GEOTAB. Quanto tempo duram as baterias de um carro elétrico? Veja o que a análise de 10 mil VEs revela. *Geotab*, 19 de agosto de 2025. Disponível em: <https://www.geotab.com/pt-br/blog/degradacao-da-bateria-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 3 out. 2025.

GOULART, Raul. Tipos de Carros Elétricos: BEV, PHEV e HEV – Qual Escolher?, 2023. Disponível em: <https://voolta.com.br/blog/tipos-de-carros-eletricos-bev-phev-hev/>. Acesso em: 30 jul. 2025

GRANZIERA, Maria Luiza Machado. Direito ambiental. 5ª ed. Indaiatuba-SP: Foco, 2019. Edição do Kindle.

GRANZIERA, Maria Luiza Machado. Direito ambiental. 6ª ed. Indaiatuba-SP: Foco, 2024. Edição do Kindle.

GUARNIERI, Patricia. Logística Reversa: Em Busca do Equilíbrio Econômico e Ambiental. 2ª ed. Joinville-SC: Clube de Autores, 2013. Edição do Kindle.

GUITARRARA, Paloma. Conferência de Estocolmo. Brasil Escola, [s.d.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/estocolmo-72.htm>. Acesso em 30 de abril de 2025.

INDIO DO BRASIL, Cristina. Reaproveitamento de rejeitos de lítio reforçará pauta de exportações. Agência Brasil, 17 mar. 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-03/reaproveitamento-de-rejeitos-de-litio-reforcara-pauta-de-exportacoes>. Acesso em: 20 nov. 2025.

INMETRO; CONPET. Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV: Tabelas de consumo e eficiência energética – Ano 2025. Atualização de 29 out. 2025. Brasília:

Inmetro, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/mascara-pbev-2025-mar-11.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2025.

INMETRO. Análise de Impacto Regulatório sobre Baterias para Veículos Elétricos Leves. Nota Técnica nº 5/2024/Diqre-Dconf-Inmetro. Duque de Caxias, RJ, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/analise-de-impacto-regulatorio/realizadas/2024/baterias-para-veiculos-eletricos-leves/nt-diqre-005-2024_air-baterias-veiculos-eletricos-leves.pdf. Acesso em: 2 out. 2025.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 9 fev. 2026.

IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 9 fev. 2026.

IEA. EV Battery Supply Chain Sustainability. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e75c9a13-3753-4677-933f-c7f9ae38cfdb/EVBatterySupplyChainSustainability.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2026.

IPAM AMAZÔNIA. O que é o Protocolo de Quioto? [s.d.]. Disponível em: <https://ipam.org.br/entenda/o-que-e-o-protocolo-de-quioto/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

JUGEND, Daniel; BEZERRA, Barbara Stolte; SOUZA, Ricardo Gabbay de. Economia circular: uma rota para a sustentabilidade. São Paulo, SP: Actual, 2022. Edição do Kindle.

LAGO, André Aranha Corrêa do. Conferências de desenvolvimento sustentável. Brasília, DF: FUNAG, 2013. Disponível em: <https://funag.gov.br/loja/download/1047-conferencias-de-desenvolvimento-sustentavel.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2025.

LANDRIGAN, Dan. Thomas Davenport makes the first electric car in America in 1834. New England Historical Society, [s.d.]. Disponível em: <https://newenglandhistoricalsociety.com/thomas-davenport-makes-the-first-electric-car-in-america-in-1834/>. Acesso em: 10 dez. 2025.

LEFF, Enrique. Saber ambiental: Sustentabilidade, Racionalidade, Complexidade, Poder. Rio de Janeiro: Editora Vozes, 2001.

LEITE, José Rubens Morato; AYALA, Patryck de Araújo. Direito Ambiental e Sustentabilidade. São Paulo: Saraiva, 2021.

LOPES, Dario Rais; MARTORELLI, Martha; VIEIRA, Aguiar Gonzaga. Mobilidade urbana: conceito e planejamento no ambiente brasileiro. Curitiba: Appris, 2020. Edição do Kindle.

LORENZON, Giovanni. BYD Baterias eleva produção ao ritmo da menor pegada de carbono no Brasil. Monitor Mercantil, 13 nov. 2024. Disponível em: <https://monitormercantil.com.br/byd-baterias-eleva-producao-ao-ritmo-da-menor-pegada-de-carbono-no-brasil/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

LOURENÇO, Joaquim Carlos. Gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil: panorama, conceitos, aplicações e perspectivas. 1ª ed. Campina Grande, PB: Edição do autor, 2019. Edição do Kindle.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. Direito ambiental brasileiro. 26ª ed. São Paulo: Malheiros, 2022.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. Direito ambiental brasileiro. 29ª ed. São Paulo: JusPodivm, 2023.

MANZINI, Enzo; VEZZOLI, Carlo. Desenvolvimento de produtos sustentáveis. Tradução de Astrid de Carvalho. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

MENDONÇA, Francisco de Assis; DIAS, Mariana Andreotti. Meio ambiente e sustentabilidade. Curitiba: Intersaberes, 2019. Edição do Kindle.

MINÉRIOS & MINERALES. Lítio no Brasil: para que serve, reservas, principais mineradoras e preço. Revista Minérios & Minerales, 14 de julho de 2025. Disponível em: <https://revistaminerios.com.br/litio-brasil-reservas-principais-mineradoras-preco/>. Acesso em: 4 out. 2025.

MOREIRA, Nathan dos Santos. Eletromobilidade: estado atual dos veículos elétricos e das baterias de íons lítio (BILs). 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/19267>. Acesso em: 14 jan. 2026.

MURTA, Raíssa de Oliveira. Direito constitucional ambiental: uma síntese. *Âmbito Jurídico*, 2019. Disponível em: <https://ambitojuridico.com.br/direito-constitucional-ambiental-uma-sintese/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

NEOCHARGE. Bateria de carro elétrico: conheça tudo sobre. [s.d.]. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 28 set. 2025.

NIEDZINSKI, James. Why EV battery traceability is fundamental to scalability with throughput and quality. Cognex, 28 maio 2024. Disponível em: <https://www.cognex.com/en/tools-and-resources/resource-center/why-ev-battery-traceability-is-fundamental-to-scalability-with-throughput-and-quality>. Acesso em: 24 fev. 2026.

OLIVEIRA, Gesner; FERREIRA, Artur Villela. Nem negacionismo nem apocalipse: economia do meio ambiente – uma perspectiva brasileira. São Paulo: BEI Editora, 2021. Edição do Kindle.

OLIVEIRA, Marina Paula. O avanço da exploração do lítio no Vale do Jequitinhonha (MG) e a reprodução das desigualdades e dependências internacionais. *Carta Internacional*, v. 19, n. 1, e1416, 2024. DOI: 10.21530/ci.v19n1.2024.1416. Disponível em: <https://cartainternacional.abri.org.br/Carta/article/view/1416>. Acesso em: 2 abr. 2026.

OPTEL GROUP. Uma ferramenta importante para um processo de reciclagem e descarte mais sustentável. Disponível em: <https://www.optelgroup.com/pt-br/blog/uma-ferramenta-importante-para-um-processo-de-reciclagem-e-descarte-mais-sustentavel/>. Acesso em: 22 mar. 2026.

ONU. Our Common Future (Relatório Brundtland). Organização das Nações Unidas, 1987. Disponível em: <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Organização das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

ONU. Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (Declaração de Estocolmo). Organização das Nações Unidas, 1972. Disponível em: <https://www-un-org.translate.goog/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acesso em: 30 abr. 2026.

PATRIARCHA-GRACIOLLI, Suelen Regina. Acordos mundiais estabelecidos na Rio-92: uma reflexão do panorama atual. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 10, n. 3, p. 69-81, 2015. DOI: 10.34024/revbea.2015.v10.1885. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/1885>. Acesso em: 30 abr. 2026.

PEREIRA, Cleitiano. O desafio do crescimento sustentável através da economia verde: uma análise da aplicação do conceito no Estado de São Paulo. São Paulo: Dialética, 2023. Edição do Kindle.

PEREIRA, Gustavo Simas; MARTINS, Harley Moraes; SILVA, Hudson Santos da. Logística reversa: 10 anos de Política Nacional de Resíduos Sólidos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Frapello Publishing, 2022. Edição do Kindle.

WILLIAMS, Georgia. 7 biggest lithium-mining companies in 2025. Investing News, 8 jan. 2026. Disponível em: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/lithium-investing/top-lithium-producers/>. Acesso em: 30 abr. 2026.

PROTA DE SÁ, Ítalo. Gases do efeito estufa e mudanças climáticas. Campo Grande, MS, 2021. Edição do Kindle.

QUIRINO, Rafael. Carro elétrico: desafios e soluções para a mobilidade urbana. 2023. Edição do Kindle.

REDCLIFT, Michael R. Desenvolvimento sustentável (1987-2005): um oxímoro atinge a maioria. EcoDebate, 2012. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2012/02/23/desenvolvimento-sustentavel-1987-2005-um-oximoro-atinge-a-maioridade-artigo-de-michael-r-redclift/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

REIS, Clóvis. Direito ao desenvolvimento sustentável: reflexões a partir de Ignacy Sachs. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/redu/article/view/8472/4958>. Acesso em: 17 maio 2025.

SANDERSON, Henry; SCHIPANI, Andres. Bolivia makes first shipment of lithium to China. Financial Times, Londres, 17 ago. 2016. Disponível em: <https://www.ft.com/content/78be1902-645c-11e6-a08a-c7ac04ef00aa>. Acesso em: 29 set. 2025.

SANTOS, Max Mauro Dias. Veículos elétricos e híbridos: fundamentos, características e aplicações. São Paulo: Érica, 2022. Edição do Kindle.

SARTORI, Márcia Aparecida; TAVARES, Sergio Marcus Nogueira; PINATO, Tassiane Boreli. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: práticas para o alcance da Agenda 2030. São Paulo: UESP, 2020. Edição do Kindle.

SCHVAMBACH, Amabilly. Efeito da implantação do Plano de Mobilidade Urbana do município de Brusque/SC na emissão de gases de efeito estufa. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Clima e Ambiente) — Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2718>. Acesso em: 4 jul. 2025.

SÉRVIO, Gabriel. Quem inventou o primeiro carro e quando foi feito. Olhar Digital, São Paulo, 6 de setembro de 2023. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2023/09/06/carros-e-tecnologia/quem-inventou-o-primeiro-carro-e-quando-foi-feito/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SIMPLY SPLIT CHARGE. Essential guide to battery to battery charger kits. Reino Unido, [s.d.]. Disponível em: <https://www.simplysplitcharge.co.uk/blogs/news/essential-guide-to-battery-to-battery-charger-kits>. Acesso em: 23 jan. 2026.

SNE RESEARCH. From Jan to June in 2025, global EV battery usage posted 504.4 GWh, a 37.3% YoY growth. Seul: SNE Research, 4 ago. 2025. Disponível em: https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/468/page/0. Acesso em: 15 out. 2025.

SOUZA, Luciana Cordeiro de. O meio ambiente na Constituição Federal. Revista da Faculdade de Direito Padre Anchieta, Jundiá, ano V, n. 9, nov. 2004. Disponível em: <https://revistas.anchieta.br/index.php/RevistaDireito/article/view/183>. Acesso em: 29 abr. 2025.

SUFRAMA. Plano de logística sustentável da SUFRAMA. Manaus: Superintendência da Zona Franca de Manaus, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/capa/plano-de-logistica-sustentavel-pls/pls-suframa.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2026.

TELLES, Dirceu D'Alkmin. Resíduos sólidos: gestão responsável e sustentável. São Paulo: Blucher, 2022. Edição do Kindle.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. The history of the lithium-ion battery. Thermo Fisher Scientific Blog, 2019. Disponível em: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/the-history-of-the-lithium-ion-battery/>. Acesso em: 7 nov. 2025.

THODE FILHO, Sérgio; MACHADO, Carlos José Saldanha; VILANI, Rodrigo Machado; PAIVA, Julieta Laudelina; MARQUES, Mônica Regina da Costa. A logística reversa e a Política Nacional de Resíduos Sólidos: desafios para a realidade brasileira. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 529–538, set./dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117019322>. Acesso em: 13 nov. 2025.

TIETZMANN E SILVA, José Antônio. Elementos de direito ambiental. Prefácio de Paulo Affonso Leme Machado. 2020. Edição do Kindle.

TIRONI, Thomas. Baterias de carros elétricos: descarte correto custa menos que a mineração. O Globo, Rio de Janeiro, 5 out. 2024. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/736082/descarte-de-bateria-custo-menor/>. Acesso em: 31 maio 2025.

TIWARI, Umesh. What are electric car batteries made of? Malvern Panalytical, 2024. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/br/learn/knowledge-center/insights/what-are-electric-car-batteries-made-of>. Acesso em: 27 nov. 2025.

TRATAMENTO DE ÁGUA. Reciclagem de massa negra pode gerar US\$ 51 bi até 2032. 5 maio 2025. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/reciclagem-massa-negra/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

TRENNEPOHL, Terence. Manual de direito ambiental. 11ª ed. São Paulo: SaraivaJur, 2024. Edição do Kindle.

UKPANA, Inemesit. Is lithium mining bad for the environment? Stats and facts. GreenMatch, 15 jul. 2024. Disponível em: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/is-lithium-mining-bad-for-the-environment>. Acesso em: 30 set. 2025.

NTSB. Improperly secured lithium-ion batteries cause fires aboard cargo vessel. Washington, DC, press release, 18 dez. 2025. Disponível em: <https://www.nts.gov/news/press-releases/Pages/NR20251218.aspx>. Acesso em: 14 jan. 2026.

VEGA-MURATALLA, Victor Osvaldo; RAMÍREZ-MÁRQUEZ, César.; LIRA-BARRAGÁN, Luis Fernando; PONCE-ORTEGA, José Maria. Review of lithium as a strategic resource for electric vehicle battery production: availability, extraction, and future prospects. Resources, Basel, v. 13, n. 11, p. 148, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources13110148>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/13/11/148>. Acesso em: 13 nov. 2025.

WILLE, Mariana Muller; BORN, Jeferson Carlos. Logística reversa: conceitos, legislação e sistema de custeio aplicável. Revista de Administração e Ciências Contábeis, Curitiba, n. 8, 2012. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-cc-adm/pdf/n8/LOGISTICA-REVERSA.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2026.

WORLD BANK. Climate-smart mining: minerals for climate action. Washington, DC: World Bank, 2024. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>. Acesso em: 9 out. 2025.