

COLÉGIO SÃO LUIS
ENSINO MÉDIO
CURSO DE METODOLOGIA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
CATARINA SILVANI GUERRA

O PARADOXO DA MOBILIDADE ELÉTRICA:
Desafios energéticos e climáticos na transição global para veículos elétricos

São Paulo
2025

CATARINA SILVANI GUERRA

O PARADOXO DA MOBILIDADE ELÉTRICA:

Desafios energéticos e climáticos na transição global para veículos elétricos

Artigo apresentado como requisito para aprovação em “Estudos e Pesquisas
Supervisionados” na 2ª série do EM do Colégio São Luís

Orientador: Prof. André Leitão

São Paulo
2025

DEDICATÓRIA

A Yohanna, por todo incentivo e paciência. Este trabalho só foi possível porque você acreditou em mim quando eu duvidei, me motivou nos dias difíceis e esteve do meu lado em cada momento. Obrigada por ser minha força e meu apoio.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar este agradecimento expressando minha gratidão ao meu professor orientador, André. Obrigada por sua orientação atenta, pela paciência e pela confiança em me permitir trabalhar de forma autônoma, contribuindo para que este trabalho se desenvolvesse da melhor maneira possível.

À Giulia, porque sem ela este processo não teria sido o mesmo. Obrigada por me apoiar em todos os momentos, por estar ao meu lado nas conquistas e também nas dificuldades, comemorando comigo cada avanço e me dando as broncas necessárias quando eu precisava voltar ao foco. Sua presença, incentivo e amizade tornaram tudo mais leve e especial.

À Yohanna, por ser meu suporte constante e a pessoa que mais me ajudou durante esta caminhada. Obrigada por cada palavra de incentivo, pela paciência nos dias cansativos e por acreditar em mim até quando eu duvidava de mim mesma. Seu apoio e carinho foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Ao meu irmão, Felipe Silvani, por ter me apresentado e me ensinado a amar esse universo incrível dos carros. Se hoje este tema está aqui, é graças a você, à sua paixão compartilhada e ao quanto você me inspirou e me ajudou a enxergar a beleza e a profundidade desse mundo.

Aos meus pais, por serem meu porto seguro, as pessoas em quem mais confio e aquelas que sempre me oferecem apoio, amor e compreensão. Obrigada por estarem presentes em cada etapa da minha vida e por me derem a segurança necessária para seguir em frente e construir meus sonhos.

“It is time to stop our green worship of the electric car. It costs us a fortune, cuts little CO2 and surprisingly kills almost twice the number of people compared with regular gasoline cars.”

Bjørn Lomborg - 2015

RESUMO

O estudo propõe uma análise crítica sobre o conceito de mobilidade sustentável e questiona até que ponto o incentivo à eletrificação veicular tem sido acompanhado por políticas eficazes da descarbonização do setor automotivo e outras matrizes energéticas interligadas ao mesmo. O presente artigo abrange os conflitos da transição massiva que vem ocorrendo no planeta a favor dos veículos elétricos (EVs), procedendo a análise crítica dos aspectos negativos desta transição, fundamentando-se em relatórios, pesquisas, artigos e notícias remetidos. Conclui-se que, sem a efetiva descarbonização das matrizes energéticas e os programas de sustentabilidade necessários, a adoção de veículos elétricos não deixa de ser uma fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) igualmente relevante que amplifica os impactos ambientais alarmantes atuais. Desta forma, a “solução” da aplicação e transição global para EVs se apresenta como uma transposição de impactos quase igualmente severos ao planeta sem as devidas políticas de proteção à sustentabilidade global.

Palavras-chave: Transição; Energia; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The study proposes a critical analysis of the concept of sustainable mobility and questions to what extent the promotion of vehicle electrification has been accompanied by effective policies for the decarbonization of the automotive sector and other interconnected energy matrices. This article addresses the conflicts arising from the massive transition taking place worldwide in favor of electric vehicles (EVs), presenting a critical analysis of the negative aspects of this shift, based on reports, research papers, articles, and related news sources. It concludes that, without the effective decarbonization of energy matrices and the implementation of necessary sustainability programs, the adoption of electric vehicles remains a relevant source of greenhouse gas (GHG) emissions that amplifies the current alarming environmental impacts. Thus, the so-called “solution” of a global transition to EVs represents a mere transference of impacts that are nearly as severe for the planet, in the absence of proper global sustainability policies.

Keywords: Transition; Energy; Sustainability.

RESUMEN:

El estudio propone un análisis crítico sobre el concepto de movilidad sostenible y cuestiona hasta qué punto el fomento de la electrificación vehicular ha estado acompañado por políticas eficaces de descarbonización del sector automotriz y de otras matrices energéticas interconectadas. El presente artículo aborda los conflictos derivados de la transición masiva que se está produciendo en el mundo a favor de los vehículos eléctricos (EVs), realizando un análisis crítico de los aspectos negativos de dicha transición, basado en informes, investigaciones, artículos y noticias relacionadas. Se concluye que, sin una descarbonización efectiva de las matrices energéticas y sin la aplicación de los programas de sostenibilidad necesarios, la adopción de vehículos eléctricos sigue siendo una fuente relevante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que amplifica los actuales impactos ambientales alarmantes. De esta forma, la “solución” de la aplicación y transición global hacia los EVs se presenta como una transferencia de impactos casi igual de severos para el planeta, en ausencia de políticas adecuadas de protección a la sostenibilidad global.

Palabras clave: Transición; Energía; Sostenibilidad.

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EV – Carro Elétrico (Electric Vehicle)

WLTP – Procedimento Mundial Harmonizado de Teste de Veículos Leves
(Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure)

GEE – Gases de Efeito Estufa

ACV -- Análise do Ciclo de Vida

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação de ACV.....	48
--	-----------

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -- Resultados dos testes do WLTP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL	15
2.2 EMISSÕES DE CICLO DE VIDA DE EVS	18
2.2.1 EMISSÕES NA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE MINERAIS.....	20
2.2.2 EMISSÕES NA FABRICAÇÃO E MONTAGEM	23
2.2.3 EMISSÕES EM TRANSPORTE E LOGÍSTICA	28
2.2.4 EMISSÕES EM DESCARTE E RECICLAGEM INADEQUADOS	32
2.3 AUTONOMIA E EFICIÊNCIA	34
2.3.1 RESULTADOS DO WLTP	40
2.4 INFRAESTRUTURA E DEMANDA DA MOBILIDADE ELÉTRICA	43
3. METODOLOGIA	45
4. RESULTADOS	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

A crise climática atual exige transformações profundas em todos os setores produtivos. O setor de transporte responde apenas por quase um quarto das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, e apesar disso, ainda tornou-se um dos principais focos das políticas de mitigação de gases de efeito estufa (GEE). Nesse cenário, os veículos elétricos surgem como uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização do transporte rodoviário, ainda que essa opção deva ser acompanhada por medidas como mudança modal, aumento da eficiência energética e adoção de combustíveis de baixa emissão de carbono (IEA, 2024).

Entretanto, a eletrificação do transporte, embora reduzindo as emissões diretas da queima de combustível dos carros regulares, não é inteiramente sustentável. É necessário entender que a origem da eletricidade utilizada para alimentar esses veículos ainda depende fortemente de combustíveis fósseis — especialmente carvão e gás natural, que compõem cerca de 60% da matriz elétrica mundial (IEA, 2023). Assim, grande parte do benefício ambiental dos EVs é neutralizada por emissões indiretas provenientes das usinas termelétricas e outras matrizes não limpas ainda utilizadas mundialmente. Esta é uma face que se é precariamente conscientizada sobre no cenário atual de maciça transição automobilística global, prorrogando o problema e aumentando a demanda e produção cada vez mais dos poluentes carros elétricos por uma população que não sabe sequer seu contexto.

Diante desse paradoxo, este artigo de revisão analisa se a expansão dos veículos elétricos é realmente compatível com a atual estrutura energética global. Procura-se entender se a transição para carros elétricos, sem uma mudança significativa na geração de energia, pode acabar apenas trocando o local das emissões: dos escapamentos para as usinas.

O estudo propõe uma análise crítica sobre o conceito de “mobilidade sustentável” e questiona até que ponto o incentivo à eletrificação automotiva tem sido acompanhado por políticas eficazes de descarbonização da matriz elétrica, garantindo resultados climáticos positivos reais e duradouros.

Outros problemas não protagonistas, mas de grande importância para estudo e conscientização, questionam a origem dos componentes-base das baterias de lítio dos veículos elétricos como o cobalto, o níquel e o próprio lítio. O conflito surge na mineração e coleta destes minérios, resultando em impactos sociais e ambientais graves e estende-se até o fim de vida útil das baterias: o seu descarte.

O descarte inadequado das baterias de íon-lítio gera diversos problemas ambientais e sociais, considerando que apenas uma pequena fração desses resíduos é reciclada ou adequadamente tratada. Entre eles estão a contaminação do solo e das águas causada pela liberação de metais pesados e substâncias tóxicas; o risco de incêndios e explosões, devido à alta reatividade dos materiais; e a perda de matérias-primas valiosas, como lítio, níquel e cobalto, cuja reciclagem poderia reduzir os impactos ambientais e custos da mineração.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica tem como objetivo contextualizar os conceitos centrais que sustentam a discussão proposta neste artigo, oferecendo uma base científica para compreender os desafios da transição energética e seus reflexos na mobilidade elétrica. O processo de eletrificação do transporte, frequentemente apresentado como solução imediata para a redução das emissões globais de carbono, exige uma análise mais ampla, que considera não apenas as emissões diretas dos veículos, mas também os impactos associados à geração de energia, à produção de baterias e ao descarte de componentes.

Diversos estudos destacam que a descarbonização efetiva depende da transformação estrutural das matrizes energéticas, ainda fortemente sustentadas por fontes fósseis. Mesmo com os avanços tecnológicos e o aumento da participação das energias renováveis, o mundo permanece em um cenário de dependência energética que limita o potencial real dos veículos elétricos como alternativa limpa. Assim, compreender a transição energética e o comportamento das emissões ao longo do ciclo de vida dos veículos torna-se fundamental para avaliar, de forma crítica, a viabilidade ambiental da mobilidade elétrica em escala global.

2.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL

A transição energética é o processo de substituição das fontes fósseis por fontes limpas e renováveis, como solar, eólica e hídrica. Segundo o World Energy Outlook 2024 (IEA), mesmo com os avanços tecnológicos e os compromissos climáticos assumidos por diversos países, as fontes fósseis (não limpas e não renováveis) ainda representavam cerca de 61% da geração elétrica global. Esta dependência estrutural limita o potencial de descarbonização generalizada, dificultando a mesma para os veículos elétricos.

Vários estudos recentes ilustram que os veículos elétricos ainda não são uma solução definitiva do ponto de vista ambiental. Apesar do fato de a discussão global sobre transporte elétrico enfatizar a redução de emissões diretas, a vantagem climática dos veículos elétricos é realmente alcançada devido à usina de energia da

qual eles recebem energia. Se combustíveis fósseis geram a maior parte da energia, então a vantagem ambiental é virtual. Gastar esse recurso é uma banalidade fatal.

Um estudo, intitulado “AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS VEÍCULOS CONVENCIONAIS E ELÉTRICOS”, publicado na plataforma ResearchGate, fornece provas sólidas de que carros elétricos podem emitir mais dióxido de carbono em algumas partes do mundo ao longo de sua vida útil do que automóveis com motores de combustão interna. Nesse caso, a poluição não é eliminada, mas redistribuída: do cano de escape para uma usina termoeletrica. Assim, não é, de forma alguma, um fato que, se a usina for alterada, o motor do carro ainda será ecologicamente correto. Muito provavelmente, também seria necessário alterar a usina.

Outro estudo publicado pela Royal Society of Chemistry confirma uma tendência semelhante. Argumenta que, mesmo considerando o maior potencial energético em relação aos motores de combustão interna, os carros com bateria podem ter emissões de 75% de um carro convencional durante o ciclo de vida, sob certas condições. Assim, mesmo em um veículo tão energeticamente eficiente, a pegada de carbono é crucial ao considerar, durante a fase de planejamento, também a produção de baterias e a própria geração de energia. Este trabalho enfatiza o fato de que um tipo de veículo como o carro elétrico precisa ser considerado em conjunto com todo o sistema energético que o possibilita.

Além disso, essa pesquisa publicada pela MDPI sugere que a quarta fonte de emissões de CO₂ depende do consumo de energia de um determinado país. Como resultado, a produção de tais modelos pode ter um impacto ambiental ainda maior do que os modelos recarregados. Tais conclusões apontam em uma direção: a cadeia ecológica em torno da utopia do carbono precisa ser atualizada para impulsionar uma safra elétrica, porque a mudança para tais tipos de transporte é vista como um modelo utópico, em vez de um método.

Embora a transição para fontes de energia limpas e renováveis seja amplamente reconhecida como essencial para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa, seu avanço ainda enfrenta barreiras técnicas, econômicas e territoriais significativas.

A intermitência das fontes solar e eólica continua sendo um desafio central, já que sua dependência de condições climáticas e sazonais exige sistemas de armazenamento e redes elétricas mais flexíveis para garantir o fornecimento constante. Essa necessidade aumenta tanto os custos quanto a complexidade operacional dos sistemas energéticos. Os investimentos iniciais para expandir as fontes renováveis e modernizar a infraestrutura de transmissão permanecem elevados: segundo a Agência Internacional de Energia, o investimento global em energia deverá alcançar US\$ 3,3 trilhões até 2025 (IEA, 2024).

Além disso, algumas dessas fontes ainda apresentam eficiência energética relativamente baixa quando comparadas às matrizes convencionais. Por exemplo, painéis solares fotovoltaicos convertem apenas 15% a 22% da energia solar incidente em eletricidade útil, enquanto turbinas eólicas atingem taxas entre 30% e 50% (IRENA, 2023). Em contraste, usinas termelétricas modernas podem alcançar eficiências de 40% a 60%, mostrando que, embora mais limpas, as renováveis ainda enfrentam limitações quanto ao aproveitamento energético.

Do ponto de vista econômico estrutural, a substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis exige transformações profundas em setores produtivos e na arrecadação pública, o que tende a gerar resistência política e social, especialmente em economias dependentes da exportação de energia como Rússia, Arábia Saudita ou Venezuela.

Por fim, existe o fator territorial, muitas vezes subestimado no debate sobre sustentabilidade. A geração solar, eólica e hidrelétrica em larga escala requer grandes áreas de ocupação, podendo atingir até 41,9 milhões de hectares até 2050, segundo estimativas do *Chatham House* (2023). No caso das hidrelétricas, o impacto é ainda mais intenso, devido à construção de grandes reservatórios e aos impactos nos ecossistemas locais. Esses desafios espaciais podem gerar conflitos com a agricultura e a preservação ambiental, evidenciando que a transição energética, embora necessária, precisa equilibrar cuidadosamente sustentabilidade e viabilidade econômica e territorial.

2.2 EMISSÕES DE CICLO DE VIDA DE EVS

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) representa uma metodologia consolidada para quantificar os impactos ambientais associados a um produto desde a extração das matérias-primas até seu descarte final. Essa abordagem holística é fundamental para compreender a real contribuição ambiental de tecnologias emergentes, como veículos elétricos, cujas baterias de íons de lítio desempenham um papel central na sustentabilidade do sistema. Diferentemente de análises que se restringem à emissão direta durante o uso, a ACV permite mapear todas as etapas do ciclo de vida, evidenciando que etapas como a extração de matérias-primas podem ser responsáveis por grande parte dos impactos ambientais associados ao produto final. Dessa forma, os estudos de ACV fornecem subsídios relevantes para o desenvolvimento de estratégias tecnológicas e políticas que busquem a redução global de emissões e o uso sustentável dos recursos naturais (Freitas, Marchenisi, 2022).

Sobre a bateria de íons de lítio do tipo NMC (níquel, manganês e cobalto), amplamente utilizada em veículos elétricos, os dados coletados em diversos estudos de ACV ressaltam que a fase de extração das matérias primas concentra cerca de 94% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de todo o ciclo de vida da bateria. Este dado é relevante por revelar que os impactos ambientais não se limitam ao uso da bateria ou à eletricidade consumida para sua recarga, embora essa etapa represente uma parcela das emissões indiretas. Portanto, a fase de fabricação das baterias envolve processos complexos e intensivos em energia, além do uso de materiais críticos e de alto impacto ambiental, tornando-se um ponto sensível para intervenções e melhorias tecnológicas que podem mitigar os impactos agregados (Freitas, Marchenisi, 2022).

Outro aspecto fundamental dos estudos de ACV para veículos elétricos é a constatação de que durante a etapa de uso, quando o veículo efetivamente opera, as emissões diretas de CO₂ são praticamente nulas, porém é preciso considerar as emissões indiretas derivadas da geração de energia elétrica para recarga das baterias. Contrariamente à percepção comum de que o uso dos veículos elétricos é a

principal fonte de emissões, apenas 4,41% do total de emissões de CO₂eq¹ ocorrem nesta fase (Freitas, Marchenisi, 2022).

“Com base na realização da ACV, é possível concluir que, embora boa parte da energia consumida no decorrer de seu ciclo de vida ocorra na etapa de uso, apenas 4,41% da emissão de CO₂e ocorre nesta etapa. Assim, embora os veículos elétricos sejam vistos como uma alternativa sustentável, por não emitir CO₂e diretamente durante seu uso, a ACV mostra a importância do estudo de todos os impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, uma vez que, além da emissão de CO₂e indireta pela produção da eletricidade, há impactos significativos no decorrer de todo o seu ciclo de vida, com a etapa de extração das matérias-primas concentrando 94% de todas as emissões de GEE, ou 80 ton.” (Freitas, Marchenisi, 2022. p. 16)

Essa evidência ressalta a necessidade de ampliar as análises ambientais para a matriz energética utilizada, de modo a avaliar a sustentabilidade real do uso do veículo em diferentes contextos e regiões, considerando a proporção de energias renováveis ou fósseis no mix energético (Freitas, Marchenisi, 2022).

Além disso, é importante destacar que a reciclagem e o descarte final das baterias representam etapas cruciais no ciclo de vida, com impactos ambientais relevantes, especialmente em relação ao consumo de água e geração de resíduos sólidos. A valorização dos materiais e o desenvolvimento de processos eficientes de reuso e reciclagem podem contribuir para reduzir a necessidade da extração de novas matérias-primas, diminuindo consequentemente os impactos ambientais associados. Políticas e práticas que incentivem a economia circular no âmbito das baterias de veículos elétricos são, portanto, essenciais para promover a sustentabilidade desta tecnologia e fortalecer sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas (Freitas, Marchenisi, 2022).

Por fim, a abordagem baseada na ACV evidencia que a sustentabilidade dos veículos elétricos não pode ser avaliada isoladamente pelo período de uso, mas deve considerar todo o ciclo de vida das baterias. A compreensão integrada das emissões e impactos ambientais em todas as etapas, desde a extração de minérios, fabricação

¹ **dióxido de carbono equivalente.** É uma métrica padronizada usada para medir e comparar o impacto de diferentes gases de efeito estufa (GEE) no aquecimento global, convertendo-os para uma quantidade equivalente de dióxido de carbono (CO₂). Essa conversão permite calcular a pegada de carbono de uma atividade, produto ou evento usando um único valor.

e uso até a destinação final, é indispensável para que decisões técnicas, econômicas e políticas possam ser tomadas com base científica robusta. Assim, a ACV constitui uma ferramenta imprescindível para ampliar a visão sobre a real contribuição dos veículos elétricos na redução das emissões globais de gases de efeito estufa, possibilitando o desenvolvimento de soluções tecnológicas e estratégicas que minimizem os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos (Freitas, Marchenisi, 2022).

2.2.1 EMISSÕES NA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE MINERAIS

O início do ciclo de vida de um veículo elétrico é marcado por uma fase extremamente intensiva em emissões de carbono e impactos ambientais consideráveis. Essa etapa está centrada na extração dos minerais críticos essenciais para a fabricação das baterias de íon-lítio, como lítio, cobalto, níquel, grafite e manganês. A mineração desses insumos é um processo naturalmente demandante de grandes quantidades de energia, o que resulta em significativa pegada ambiental. Por exemplo, a obtenção do lítio pode se dar por meio da evaporação de salmouras em extensas lagoas ou pela mineração de rochas em regiões como a Austrália, ambas modalidades que requerem vastos volumes de água e elevados consumos energéticos. Essa energia geralmente é proveniente de geradores movidos a diesel ou de redes elétricas baseadas majoritariamente em combustíveis fósseis, amplificando as emissões associadas ao processo extrativo (Aguiar, 2024).

Além disso, a extração de outro mineral crucial, o cobalto, está concentrada principalmente na República Democrática do Congo, país que enfrenta graves desafios sociais e ambientais associados à atividade mineradora. A produção de cobalto não só apresenta uma elevada pegada de emissões de gases de efeito estufa, como também está profundamente ligada a condições de trabalho precárias, muitas vezes envolvendo mão de obra infantil e riscos significativos para a saúde e segurança dos trabalhadores. Essas problemáticas sociais adicionam uma dimensão ética importante à discussão sobre a transição energética e o uso de motores elétricos. Após a fase de extração, os minérios precisam passar por um processamento complexo para atingir a pureza exigida nas células das baterias, o que envolve procedimentos termoquímicos como trituração, fusão e hidrometalurgia. Esses processos requerem o uso de altas temperaturas e, consequentemente, elevado gasto

energético, gerando mais emissões de carbono. Assim, o impacto ambiental dessa etapa não pode ser negligenciado no cálculo global das emissões (Aguiar, 2024)

Toda essa combinação de emissões anteriormente descrita é conhecida como “dívida de carbono” do veículo elétrico. Estudos indicam que as emissões geradas durante a fabricação das baterias podem representar algo entre 30% e 50% do total de gases de efeito estufa emitidos ao longo do ciclo de vida completo do automóvel. É importante destacar que ela está “dívida” só é efetivamente compensada se a bateria alcançar uma vida útil longa, percorrendo milhares de quilômetros durante o uso do veículo, momento no qual as emissões associadas à operação são significativamente menores em comparação aos veículos movidos a combustíveis fósseis. Essa dinâmica evidencia que o benefício ambiental dos carros elétricos está intrinsecamente ligado à eficiência dos processos de extração, produção e tempo de uso das baterias, ressaltando a complexidade da transição energética e a necessidade de políticas integradas que considerem tanto as emissões diretas quanto os impactos sociais e ambientais associados à cadeia produtiva desses minerais (Aguiar, 2024).

” Essa relação complexa entre as emissões iniciais associadas à fabricação das baterias e o período de uso dos veículos elétricos destaca a importância de uma abordagem holística para a transição energética. Não basta focar apenas na redução das emissões durante a operação dos veículos; é fundamental também considerar os impactos ambientais, sociais e econômicos que permeiam todas as etapas da cadeia produtiva, desde a extração dos minerais até o descarte e a reciclagem das baterias. Políticas públicas integradas e estratégias de sustentabilidade devem contemplar essa complexidade para garantir que os benefícios ambientais sejam reais e que os custos socioambientais não sejam transferidos para comunidades vulneráveis e territórios impactados pela mineração.” (Aguiar, 2024, p. 78)

Além dos impactos diretos da extração e processamento dos minerais, a cadeia de suprimentos global desses insumos enfrenta desafios relacionados à governança ambiental e social. Países ricos em reservas de lítio, como Argentina, Chile e Bolívia, o chamado Triângulo do Lítio, têm buscado equilibrar o desenvolvimento econômico com a proteção de ecossistemas frágeis e o respeito às comunidades indígenas locais. A exploração intensiva de recursos hídricos nas regiões áridas onde se localizam os selares ameaça a disponibilidade de água potável, elemento fundamental

para a agricultura e a sobrevivência das populações ribeirinhas. Consequentemente, a expansão da mineração deve ser acompanhada de políticas robustas de sustentabilidade e consulta prévia para mitigar conflitos socioambientais e promover a justiça ambiental (Borsa, 2024).

Na fase de manufatura das baterias, o avanço tecnológico tem buscado formas de reduzir a intensidade energética e as emissões decorrentes do processamento dos materiais. Tecnologias emergentes, como o uso de fontes renováveis para alimentar as plantas industriais e o desenvolvimento de processos químicos mais eficientes, têm potencial para diminuir a dívida de carbono associada à produção delas. Além disso, há esforços relevantes para diversificar a composição química das baterias, reduzindo o uso de minerais críticos cujas cadeias de abastecimento apresentam altos riscos socioambientais, como o cobalto. O objetivo é aumentar a segurança do fornecimento e diminuir impactos, mantendo a performance e a vida útil dos dispositivos (Borsa, 2024).

Outro aspecto fundamental para reduzir o impacto ambiental dos veículos elétricos está na reciclagem e reutilização das baterias em fim de vida. A reciclagem eficiente não só recupera os metais preciosos e minimiza a necessidade de nova extração, como também reduz a geração de resíduos tóxicos. Entretanto, a infraestrutura para reciclagem ainda é incipiente e desigual globalmente, em especial em países da América Latina, que concentram reservas minerais, mas enfrentam dificuldades para desenvolver cadeias industriais fechadas. Investimentos em pesquisa e inovação, regulamentações ambientais e incentivos econômicos são necessários para fortalecer o segmento e garantir circularidade no sistema de baterias (Borsa, 2024).

“Em uma perspectiva a longo prazo, mesmo que recicláveis, as reservas de lítio são limitadas e estão concentradas em determinadas regiões, o que pode resultar em possíveis faltas do recurso no futuro. Assim, Altiparmak (2022) pondera duas possíveis hipóteses: essa situação, hipotetizamos ainda, levará os Estados a buscarem segurança no fornecimento de lítio por meio do controle independente de suprimentos por meio de ações de política externa, resultando em conflitos interestatais semelhantes aos relacionados ao petróleo. Paradoxalmente, o aumento da interdependência na produção tecnológica baseada em lítio reduz o potencial de conflitos entre Estados devido aos benefícios econômicos derivados da cooperação. Essa

cooperação, no entanto, não implica colaboração, mas reflete as políticas dos Estados orientadas para a corrida por aumento de capital dentro de um sistema capitalista neoliberal” (Barbosa, 2024, *apud* Atilparmak, 2022, p. 51)

Além da dimensão ambiental, a transição para veículos elétricos traz enormes desafios sociais e econômicos para as regiões produtoras dos minerais. A concentração das reservas em poucos países resulta em dinâmicas complexas de cooperação e competição geopolítica, afetando a estabilidade e o desenvolvimento local. Por exemplo, a presença chinesa na América Latina tem se expandido significativamente por meio de investimentos diretos, o que reacende debates sobre soberania dos recursos, distribuição dos benefícios econômicos e a influência política externa. Paralelamente, governos regionais enfrentam o dilema entre acelerar a industrialização e preservar direitos das populações locais, exigindo políticas públicas integradas que promovam desenvolvimento sustentável e inclusão social (Borsa, 2024).

Finalmente, é importante destacar que o benefício climático esperado dos veículos elétricos depende também da matriz energética que os alimenta durante a sua operação. Em países onde a eletricidade ainda é majoritariamente gerada a partir de combustíveis fósseis, a redução das emissões será menor, diluindo parte dos ganhos ambientais da eletrificação do transporte. Assim, a descarbonização do setor elétrico, a ampliação da geração limpa e o fortalecimento de sistemas inteligentes de armazenamento e distribuição de energia são pilares essenciais para que o ciclo de vida dos veículos elétricos, desde a extração dos minerais até o uso final, alcance a real sustentabilidade ambiental (Borsa, 2024).

2.2.2 EMISSÕES NA FABRICAÇÃO E MONTAGEM

A fabricação de veículos elétricos (EVs) apresenta uma complexidade estrutural significativamente maior quando comparada à produção dos veículos com motor de combustão interna (ICVs). Enquanto a montagem dos motores a combustão é um processo amplamente consolidado, eficiente e otimizado ao longo de muitos anos, a produção dos componentes essenciais para os EVs, como baterias e motores elétricos, exige procedimentos mais intrincados e energeticamente demandantes. Essa complexidade decorre não apenas da necessidade de tecnologias avançadas, mas também das condições rigorosas que devem ser atendidas para garantir a qualidade,

segurança e durabilidade desses equipamentos, fatores que abrangem todo o processo produtivo desde a matéria-prima até a montagem final (Vargas, 2022).

Um exemplo claro desse desafio está na fabricação das baterias, que são peças fundamentais para o funcionamento dos veículos elétricos. As células das baterias são produzidas em grandes fábricas especialmente projetadas para atender a normas rigorosas de controle ambiental e de qualidade. As diversas etapas envolvem a secagem dos eletrólitos, o revestimento preciso dos ânodos e cátodos e, posteriormente, a formação e envelhecimento das células, processos esses que são altamente sensíveis a condições ambientais, especialmente ao controle de umidade e temperatura. A necessidade de manter ambientes equipados com sistemas de ar-condicionado sofisticados e baixos índices de umidade resulta em um consumo elevado de energia, ecoando diretamente no aumento da pegada ambiental da produção dessas baterias (Vargas, 2022).

Além do alto gasto energético inerente aos processos de fabricação, estudos da Federação Europeia para Transporte e Meio Ambiente apontam que as baterias produzidas para veículos elétricos em regiões como a Europa geram entre 75% e 100% mais emissões de CO₂ que as baterias padrão utilizadas em veículos convencionais. Tal índice evidencia que a produção das baterias constitui o principal vetor de emissões dentro do ciclo de vida dos EVs, colocando em evidência o impacto substancial da etapa produtiva na análise ambiental abrangente desses veículos. Este dado sugere que, apesar dos benefícios ambientais dos EVs durante o uso, sua fabricação demanda uma considerável quantidade de energia e recursos, o que reflete em emissões elevadas, especialmente em regiões onde a matriz energética ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis (Vargas, 2022).

As emissões não se restringem à fabricação das baterias, mas também se estendem à produção dos demais componentes do veículo, incluindo o chassi montado, o motor elétrico e os sistemas de alta tensão que compõem o conjunto do veículo elétrico. Quando consideradas todas essas etapas e componentes, estima-se que o processo de fabricação de um EV gere aproximadamente 28% mais emissões de gases de efeito estufa do que a fabricação de um veículo de combustão interna equivalente, o que intensifica o debate sobre a real sustentabilidade ambiental dos veículos elétricos em seu ciclo completo. Esse incremento nas emissões durante a

etapa produtiva levanta a necessidade fundamental de se analisar o ciclo de vida completo do veículo, abrangendo desde a extração das matérias-primas até a operação e descarte final (Mera, Bierker *et al*, 2023).

No ciclo do veículo, as emissões correspondentes à produção de baterias para BEVs e PHEVs, incluindo a extração e o processamento de matérias-primas, são apresentadas separadamente das emissões da produção do restante do veículo, indicadas como chassi e trem de força. Da mesma forma, as emissões correspondentes à produção do tanque de armazenamento de hidrogênio e da célula de combustível nos FCEVs são apresentadas separadamente. O ciclo do veículo também abrange a substituição de peças do veículo durante a vida útil.” (Mera, Bierker *et al*, 2023, p. 10).

Portanto, mesmo que os veículos elétricos sejam conhecidos por suas emissões zero durante a operação, essa vantagem ambiental só é efetivamente alcançada após certo tempo de uso, quando a compensação das altas emissões de fabricação se dá por meio do uso de energia de baixas emissões. Essa condição reforça que os benefícios ambientais dos EVs são progressivos, resultando de uma combinação entre a eficiência do veículo durante a operação e a origem da energia utilizada para carregá-lo. Não se pode, assim, avaliar os veículos elétricos isoladamente em sua operação, mas sim compreender sua pegada ambiental integrada ao seu ciclo total de vida (Vargas, 2022).

Outro ponto crucial nessa equação ambiental é a matriz energética que alimenta esses veículos. Em locais onde a eletricidade possui elevada participação de fontes renováveis, como a energia eólica, solar ou hidrelétrica, o tempo necessário para que o veículo elétrico compense as emissões derivadas de sua produção diminui significativamente, tornando a mobilidade elétrica uma alternativa mais sustentável num prazo relativamente curto. Por outro lado, em regiões onde a geração de energia elétrica depende majoritariamente de termelétricas movidas a carvão ou petróleo, os ganhos ambientais dos EVs podem ser consideravelmente reduzidos ou até eliminados, tornando-se imperativo que o avanço da mobilidade elétrica esteja alinhado com a descarbonização da matriz elétrica local (Vargas, 2022).

Dessa forma, para que a adoção dos veículos elétricos seja realmente benéfica do ponto de vista ambiental, é fundamental que políticas públicas, a indústria automotiva e os setores de energia trabalhem de forma integrada e estratégica.

Investimentos em tecnologias que otimizem os processos produtivos, diminuam o consumo energético durante a fabricação e promovam o uso eficiente das matérias-primas são essenciais para reduzir a pegada ambiental dos EVs. Além disso, é indispensável o incentivo à expansão das fontes renováveis e o desenvolvimento de sistemas inteligentes de gestão de energia para garantir que a eletricidade consumida pelos veículos venha de fontes de baixo carbono (Vargas, 2022).

Essas medidas conjuntas podem acelerar o processo pelo qual os veículos elétricos se tornam uma alternativa sustentável e viável frente aos veículos convencionais, superando a barreira das emissões elevadas no processo produtivo e consolidando-se como solução eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes. A transição para a mobilidade elétrica não deve ser vista somente na perspectiva do produto final, mas integrando toda a cadeia produtiva e de consumo de energia, garantindo, assim, um desenvolvimento verdadeiramente sustentável e alinhado às necessidades globais de preservação ambiental (Vargas, 2022).

Além disso, o relatório sublinha a importância de que a implementação e expansão da infraestrutura para produção de baterias e veículos elétricos no Brasil estejam alinhadas a práticas sustentáveis, especialmente na mineração e processamento dos materiais críticos como lítio, cobalto e níquel. O desenvolvimento dessas cadeias produtivas deve considerar não apenas os aspectos ambientais relacionados à extração e refino, mas também os impactos sociais nas regiões envolvidas. Ao adotar uma abordagem responsável e integrada, o Brasil pode minimizar significativamente os impactos negativos, fortalecendo ao mesmo tempo a competitividade da cadeia nacional de veículos elétricos. Essa sustentabilidade na produção é crucial para maximizar os benefícios ambientais dos veículos elétricos (BEVs) ao longo de seu ciclo de vida e garantir que o crescimento do setor automotivo no país não ocorra às custas de danos ambientais ou sociais, contribuindo para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável e alinhado às metas climáticas.

Adicionalmente, é fundamental que a expansão da infraestrutura para produção de baterias e veículos elétricos no Brasil seja conduzida com base em práticas sustentáveis rigorosas, especialmente no que tange à mineração e ao processamento dos materiais críticos como lítio, cobalto e níquel. A extração desses minerais, se

realizada sem critérios ambientais e sociais adequados, pode gerar impactos significativos, como degradação ambiental, contaminação de recursos hídricos e danos às comunidades locais. Dessa forma, é imprescindível que o desenvolvimento dessas cadeias produtivas considere a adoção de tecnologias limpas, a mitigação dos impactos ambientais e o respeito aos direitos das populações afetadas, garantindo uma abordagem integrada e responsável (Mera, Bierker *et al*, 2023).

Além disso, a adoção de processos para reciclagem e reutilização de baterias deve ser incentivada como uma estratégia para reduzir a dependência da extração de matérias-primas virgens e mitigar os impactos ambientais durante todo o ciclo de vida das baterias. A sustentabilidade da cadeia produtiva, portanto, não deve estar restrita à fase de produção, mas contemplar todo o ciclo, da extração até o fim da vida útil dos componentes, ampliando o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de recursos naturais (Mera, Bierker *et al*, 2023).

Esse alinhamento entre sustentabilidade ambiental, responsabilidade social e desenvolvimento econômico fortalece a competitividade da indústria nacional de veículos elétricos, evitando que o crescimento desse setor ocorra às custas de danos socioambientais. Ademais, a incorporação desses princípios é estratégica para que o Brasil alcance suas metas climáticas e consolide sua posição no mercado global, beneficiando-se da crescente demanda por tecnologias limpas e sustentáveis. Dessa forma, a implementação de políticas públicas e investimentos direcionados a promover práticas responsáveis na cadeia produtiva dos veículos elétricos é crucial para assegurar um desenvolvimento verdadeiramente sustentável, que combina avanços tecnológicos com justiça social e preservação ambiental (Mera, Bierker *et al*, 2023).

Em suma, o papel dos veículos elétricos na mitigação das mudanças climáticas depende tanto da eficiência energética durante seu uso quanto das práticas sustentáveis adotadas na fabricação dos seus componentes, especialmente as baterias. Reduzir o impacto ambiental da produção e associar a operação do veículo a matrizes energéticas limpas são elementos indispensáveis para que os EVs cumpram seu potencial como agentes de transformação da mobilidade urbana e da redução significativa das emissões de poluentes, contribuindo decisivamente para um futuro mais sustentável (Vargas, 2022).

2.2.3 EMISSÕES EM TRANSPORTE E LOGÍSTICA

A cadeia de suprimentos global para a produção de veículos elétricos representa um desafio significativo e, muitas vezes, subestimado em termos de emissões de gases de GEE. A natureza altamente descentralizada dessa cadeia contribui para a complexidade e para a elevada pegada de carbono associada ao ciclo de vida desses veículos. Por exemplo, as principais partes de um veículo elétrico são fabricadas em diferentes partes do mundo: as baterias, componentes essenciais para a operação desses veículos, frequentemente são produzidas na China; os motores e outros componentes mecânicos podem ser fabricados na Alemanha; o desenvolvimento do software de controle pode ocorrer nos Estados Unidos; e a montagem final pode ser realizada em outro continente, geralmente próximo aos mercados consumidores. Essa dispersão geográfica impõe uma necessidade de um sistema logístico mundialmente interconectado, com operações que garantem o transporte eficiente e rápido entre os diferentes elos da cadeia (Castro, 2019).

Além disso, essa logística é altamente dependente do transporte marítimo e rodoviário, que por sua vez consome uma parcela expressiva dos combustíveis fósseis mais poluentes: óleo combustível pesado e diesel. Dados indicam que quase metade da produção global desses combustíveis é direcionada ao transporte dos componentes e produtos acabados ao longo da cadeia de suprimentos de veículos elétricos. O trajeto inclui o transporte das matérias-primas extraídas nas minas para as refinarias, o deslocamento dos materiais processados até as fábricas que produzem as células das baterias, a movimentação dessas células para as plantas de montagem e, finalmente, a entrega dos veículos prontos para os centros de distribuição e mercados consumidores espalhados pelo mundo. A grande dependência do transporte marítimo de longa distância, utilizando navios porta-contêineres movidos a óleo combustível pesado, e do transporte rodoviário por caminhões movidos a diesel, cria um cenário em que as emissões acumuladas em cada etapa são significativas e impactam fortemente na sustentabilidade do produto (Castro, 2019).

Assim, o benefício ambiental geralmente atribuído aos veículos elétricos, especialmente em relação à redução das emissões locais de poluentes no transporte urbano, é mitigado ou incluso contrabalançado pelas emissões da cadeia global que

os produz e distribui. Cada elo dessa cadeia logística adiciona camadas de emissões ao chamado "orçamento de carbono" do veículo, elevando o seu impacto total de carbono. O transporte marítimo de longa distância, devido à sua magnitude de consumo energético e tipo de combustível utilizado, é um dos maiores contribuintes para esse orçamento. Isso evidencia um paradoxo: veículos desenvolvidos para mitigar os impactos ambientais do transporte rodoviário urbano hoje dependem de uma logística internacional fortemente carbonizada para viabilizar sua produção e comercialização (Castro, 2019).

Esse quadro gera um dilema para o setor: para que os veículos elétricos cumpram efetivamente sua função de reduzir o impacto climático do setor de transporte, é imprescindível repensar e transformar as cadeias de suprimentos globais que os sustentam. Para isso, medidas precisam ser adotadas em nível múltiplo. Primeiramente, é necessário desenvolver cadeias de suprimentos regionais que reduzam a distância e o número de etapas no processo produtivo, minimizando as emissões geradas pelo transporte de materiais e componentes ao redor do globo. Investir na regionalização da cadeia produtiva também pode estimular economias locais e melhorar a resiliência da cadeia, além de contribuir para a redução do custo total (Oliveira, 2023).

Paralelamente, a descarbonização dos setores de transporte pesado que suportam essa cadeia de suprimentos é fundamental. Isso inclui a substituição progressiva dos combustíveis fósseis convencionais por fontes de energia renovável e limpa, como o uso de biocombustíveis avançados, hidrogênio verde e eletrificação dos modais de transportes pesado, seja marítimo, ferroviário ou rodoviário. Programas governamentais e políticas públicas que promovam subsídios para infraestrutura de recarga, oferta e desenvolvimento de tecnologias, certificação e regulamentação socioambiental são essenciais para acelerar essa transição (Castro, 2019). A instalação de infraestrutura de recarga pública e privada, especialmente em centros urbanos e regiões estratégicas, permite uma melhor integração dos veículos elétricos às operações logísticas (Oliveira, 2023).

Além desses aspectos, o desenvolvimento tecnológico também desempenha papel crucial. Empresas têm investido na melhoria da eficiência veicular, como a adoção de caminhões mais leves e com consumo otimizado, e no desenvolvimento

de veículos com capacidades flexíveis que se adaptam melhor às necessidades operacionais específicas, contribuindo para a redução do impacto ambiental e dos custos operacionais. No Brasil, por exemplo, empresas como a Coca-Cola FEMSA vêm implementando frotas de veículos elétricos para atendimento em grandes centros urbanos, com o objetivo de reduzir significativamente a emissão de poluentes e alcançar sustentabilidade nas operações logísticas. A Amazon, por sua vez, integra inovação tecnológica com sua estratégia de sustentabilidade, investindo em veículos elétricos para entregas na Europa e explorando métodos alternativos como bicicletas de carga elétrica e centros de micromobilidade para áreas urbanas densas, contribuindo para a mitigação das emissões (Oliveira, 2023).

Por fim, é importante destacar que a sustentabilidade dos veículos elétricos no transporte de cargas vai além da simples mudança da matriz energética dos veículos, envolvendo uma visão holística que inclui o uso de energia limpa e renovável em toda a cadeia, a criação de políticas de incentivo econômico e regulatório, o desenvolvimento de infraestrutura alinhada às necessidades desse mercado e a adoção de boas práticas operacionais. A geração de energia renovável é especialmente fundamental para garantir que a operação dos veículos elétricos traga benefícios ambientais reais a longo prazo, evitando que esses sejam apenas "verde por fora" enquanto a cadeia produtiva permaneça altamente poluente (Castro, 2019).

Desta maneira, para maximizar os benefícios climáticos e ambientais da adoção dos veículos elétricos, é necessário promover uma transformação integrada da cadeia de suprimentos global e local, com esforços conjuntos entre governos, empresas e sociedade civil, construindo uma logística sustentável e uma economia de baixo carbono. Somente assim será possível assegurar que o impacto positivo dos veículos elétricos no meio ambiente ultrapasse as barreiras impostas pela globalização da cadeia produtiva e pelas emissões associadas ao transporte pesado (Castro, 2019).

A adoção dos veículos elétricos no setor de transporte de carga representa um avanço significativo no caminho para a sustentabilidade ambiental, especialmente em grandes centros urbanos como São Paulo. Contudo, a implementação dessas tecnologias enfrenta diversas barreiras, tais como o elevado custo dos veículos e das baterias, a necessidade de renovação das baterias durante a vida útil do veículo, além

da carência de uma infraestrutura pública adequada para o recarregamento dos veículos elétricos. Essas dificuldades técnicas e econômicas dificultam a expansão das frotas elétricas, exigindo esforços coordenados entre empresas, governo e sociedade para superá-las (Castro, 2019).

Para que a eletrificação do transporte de carga seja efetiva, é crucial que políticas públicas específicas sejam formuladas, levando em consideração as particularidades do setor logístico e as condições urbanas locais. Medidas regulatórias, como a criação de certificações para empresas que adotam veículos elétricos e flexibilização das categorias de habilitação para motoristas, podem incentivar a adoção da tecnologia. Além disso, a revisão da legislação municipal relacionada à circulação de veículos em áreas restritas é necessária para que os incentivos realmente impactem o uso dos veículos elétricos no transporte urbano em São Paulo (Oliveira, 2023).

Outro aspecto fundamental para o sucesso da transição é o investimento em infraestrutura de recarga pública e a criação de microcentros de distribuição urbana, que facilitam a operação dos veículos elétricos e aumentam a eficiência das entregas. O estímulo à oferta de veículos por parte das montadoras também é uma medida importante, pois a baixa disponibilidade de modelos específicos para o transporte de carga limita as opções para as empresas que desejam migrar para frotas mais sustentáveis (Oliveira, 2023).

Além dos desafios técnicos e logísticos, é fundamental garantir que a geração de energia utilizada para recarregar os veículos seja oriunda de fontes limpas e renováveis. Caso contrário, o benefício ambiental da eletrificação pode ser comprometido pela emissão de gases de efeito estufa resultante da produção de eletricidade. Assim, a integração entre políticas de energias renováveis e a eletrificação do transporte é essencial para consolidar uma economia de baixo carbono e garantir a sustentabilidade do sistema de transporte no longo prazo (Castro, 2023).

Exemplos práticos de empresas que já implantaram frotas de veículos elétricos demonstram que, apesar dos desafios, é possível avançar rumo a operações logísticas mais sustentáveis. Empresas como a Amazon e a Coca-Cola FEMSA Brasil estão investindo em veículos elétricos e tecnologias inovadoras para reduzir as

emissões de carbono, evidenciando o compromisso corporativo com a sustentabilidade ambiental. Esses casos ilustram que, com o suporte adequado, a adoção de veículos elétricos pode ser ampliada e se tornar uma prática comum no setor de transporte (Castro, 2023).

Por fim, é importante destacar que a sustentabilidade no transporte vai além da adoção de veículos elétricos, englobando uma transformação cultural e estrutural que inclui a eficiência energética, o planejamento urbano e a conscientização social. A sustentabilidade deve ser incorporada como um hábito nas organizações e na sociedade, buscando preservar os recursos naturais e garantir um ambiente saudável para as futuras gerações. Nesse sentido, os veículos elétricos representam uma ferramenta valiosa, mas precisam estar inseridos em uma estratégia mais ampla de desenvolvimento sustentável (Castro, 2023).

2.2.4 EMISSÕES EM DESCARTE E RECICLAGEM INADEQUADOS

A fase final do ciclo de vida dos veículos elétricos, em especial no que se refere às baterias, constitui uma das principais preocupações ambientais associadas a essa tecnologia. As baterias são responsáveis por uma parcela significativa da pegada de carbono total do produto, o que torna imprescindível uma avaliação minuciosa de seu descarte e reciclagem. Embora a escala exata do problema ainda seja difícil de estimar, sabe-se que os níveis efetivos de reciclagem de baterias de íon-lítio são atualmente muito baixos, devido a limitações técnicas e econômicas que impedem a adoção em larga escala desses processos (Almeida, 2024).

A reciclagem inadequada dessas baterias gera impactos ambientais diretos e indiretos. Entre as consequências imediatas, destaca-se o vazamento de metais pesados e eletrólitos tóxicos, que contaminam o solo e a água subterrânea, representando riscos significativos à saúde humana e aos ecossistemas. Além disso, há impactos menos evidentes, porém igualmente relevantes, como as emissões de gases de efeito estufa decorrentes da perda de materiais valiosos durante o descarte. Essa perda implica a necessidade de reiniciar processos primários de extração e beneficiamento mineral, que são altamente intensivos em energia e responsáveis por elevadas emissões de carbono (Almeida, 2024).

Do ponto de vista tecnológico, os métodos tradicionais de reciclagem, como a pirometalurgia, que envolve a utilização de fornos a carvão para fundição dos metais, apresentam elevados níveis de emissão, o que compromete os benefícios ambientais esperados da reciclagem. Alternativas mais avançadas, como a hidrometalurgia, embora apresentem menor intensidade energética e menor impacto ambiental, ainda não estão amplamente implementadas, em virtude de desafios técnicos, econômicos e regulatórios (Almeida, 2024).

Assim, o paradigma da economia circular para baterias de veículos elétricos ainda não está consolidado, resultando na necessidade de contabilizar a pegada de carbono de cada nova bateria produzida, o que compromete a sustentabilidade ambiental do ciclo produtivo como um todo. Dessa forma, o desenvolvimento e a implementação de processos eficientes, economicamente viáveis e de baixo carbono para reciclagem e reutilização de baterias assumem papel crítico na mitigação da pegada ambiental global associada aos veículos elétricos a longo prazo. A consolidação dessas práticas representa um elemento-chave para a viabilidade sustentável da transição energética no setor automotivo (Almeida, 2024).

Complementando a análise, é fundamental destacar que a legislação vigente no Brasil, especialmente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), oferece um arcabouço legal importante para a gestão adequada das baterias usadas de veículos elétricos e híbridos. Embora ainda não exista uma norma específica focada nas baterias de íon-lítio, a aplicação dos instrumentos previstos na lei, como a logística reversa, a responsabilidade compartilhada entre produtores, distribuidores, consumidores e o poder público, e o estabelecimento de planos de gerenciamento de resíduos sólidos, constitui um passo importante para garantir o descarte responsável e a minimização dos impactos ambientais (Silva, 2019).

Além disso, o caráter progressivo da adoção de veículos elétricos no Brasil permite ao país uma janela valiosa para desenvolver e implementar soluções inovadoras e adaptadas à sua realidade, evitando repetir erros já observados em mercados mais maduros, como os europeus. Essa dinâmica proporciona uma oportunidade ímpar para o Brasil criar um sistema pioneiro e sustentável de tratamento das baterias, integrando, por exemplo, incentivos financeiros e creditícios

para estimular a correta destinação e a pesquisa em tecnologias de reciclagem (Silva, 2019).

Outro ponto crucial é a educação e o engajamento dos consumidores, que devem compreender a importância da devolução das baterias esgotadas aos pontos de coleta ou aos próprios fabricantes, o que pode ser facilitado por mecanismos como o contrato de leasing para as baterias, separando-as do veículo e promovendo a responsabilidade compartilhada na cadeia de valor. Essa estratégia não apenas assegura o retorno das baterias para reciclagem ou reaproveitamento, mas também contribui para a redução dos riscos à saúde pública e à contaminação ambiental (Silva, 2019).

Em suma, para a efetiva mitigação dos impactos ambientais associados às baterias de veículos elétricos, é imprescindível a articulação entre políticas públicas robustas, inovação tecnológica, incentivos econômicos, e uma conscientização social ampla. O avanço rumo à circularidade desses produtos será decisivo para consolidar a sustentabilidade da mobilidade elétrica e garantir que a substituição dos veículos a combustão não resulte em novos desafios ambientais significativos (Silva, 2019).

Dessa forma, o futuro da mobilidade elétrica no Brasil e no mundo dependerá da capacidade de integrar esforços multissetoriais para transformar a concepção, uso e descarte das baterias, promovendo a economia circular efetiva, a redução da pegada de carbono e a conservação dos recursos naturais para as gerações futuras (Silva, 2019).

2.3 AUTONOMIA E EFICIÊNCIA

A autonomia e a eficiência energética são dois dos principais aspectos operacionais dos veículos elétricos que apresentam vantagens e desafios. O motor elétrico tem uma eficiência muito superior ao motor a combustão, convertendo cerca de 85 por cento da energia da bateria em movimento, enquanto motores a combustão alcança rendimento entre 22 por cento e 30 por cento. Essa diferença tão expressiva se deve ao fato de que, nos automóveis a combustão, grande parte da energia é dissipada sob a forma de calor e atrito interno do motor. Já os motores elétricos possuem menos perda energética ao converter eletricidade em movimento, aproveitando melhor a energia armazenada (Onohara, Onohara, 2022).

Essa eficiência faz com que os veículos elétricos consumam energia de forma mais estável e constante, especialmente em condições urbanas, cenário em que frenagens regenerativas e velocidades moderadas prevalecem. Por outro lado, a densidade energética das baterias, mesmo com avanços tecnológicos significativos, ainda é muito inferior à da gasolina, o que limita de maneira considerável a autonomia dos carros elétricos. Em média, a autonomia dos veículos elétricos varia entre 100 e 200 km, dependendo do modelo, estilo de condução e utilização de acessórios como o ar-condicionado. Esse fator impõe limitações ao uso em trajetos mais longos, o que não acontece com veículos a combustão que possuem maior autonomia e contam com ampla disponibilidade de postos de abastecimento ao longo de rodovias (Onohara, Onohara, 2022).

Além da limitação de autonomia, condições externas como frio intenso, uso frequente de climatização e condução em alta velocidade contribuem para aumentar o consumo de energia da bateria, reduzindo sua vida útil e aumentando a frequência das recargas. Em regiões muito frias, por exemplo, parte considerável da energia é desviada para aquecer o habitáculo e manter a temperatura da bateria em níveis operacionais, o que reduz drasticamente a autonomia prática. Esses elementos podem fazer a autonomia real ser até quatro vezes menor do que a anunciada pelos fabricantes. Outro aspecto importante é o tempo necessário para recarregar a bateria. Embora os eletropostos possam abastecer aproximadamente 80 por cento da bateria em cerca de 30 minutos, o consumo equivalente a uma recarga completa de 24 kWh corresponde ao uso de um chuveiro elétrico durante sete horas. Este tempo, junto com a necessidade de uma infraestrutura de recarga mais ampla, gera ansiedade nos usuários e representa um desafio para a disseminação dos veículos elétricos no Brasil. Diferentemente do abastecimento rápido dos carros a combustão, o processo de recarga depende não apenas da tecnologia da bateria, mas também da capacidade elétrica disponível em residências, condomínios, postos de energia e centros urbanos (Onohara, Onohara, 2022).

Portanto, apesar da eficiência energética do motor elétrico ser superior, os fatores ligados à autonomia reduzida, tempo de recarga e dependência das baterias ainda representam obstáculos significativos. A superação desses desafios dependerá da evolução tecnológica e da expansão da rede de recarga no país. Nesse contexto, observa-se também que os veículos elétricos apresentam uma significativa vantagem

no que diz respeito à manutenção. Comparados aos automóveis a combustão, eles possuem menos peças móveis, não necessitam de sistemas de lubrificação, nem do complexo sistema de marchas dos carros tradicionais. Isto resulta em menor custo e frequência de manutenção para os usuários, tornando os carros elétricos economicamente interessantes a longo prazo, apesar do custo inicial mais elevado. Ao eliminar a necessidade de trocas constantes de óleo, filtros e correias, e reduzindo o desgaste de freios devido ao sistema de frenagem regenerativa, os veículos elétricos representam uma economia considerável em manutenção preventiva e corretiva (Bastos, 2024).

Porém, a principal limitação técnica dos veículos elétricos está nas baterias de lítio que, além de terem uma densidade energética menor, apresentam desgaste com o decorrer dos ciclos de carga e descarga. A vida útil da bateria depende do tipo de carregamento e da forma como o veículo é utilizado, o que gera incertezas sobre o custo-benefício para muitos consumidores, especialmente em países emergentes onde o investimento inicial representa uma parcela significativa da renda familiar. Além disso, a fabricação dessas baterias envolve consumo elevado de energia e impactos ambientais que devem ser considerados. O processo de extração de metais como lítio, cobalto e níquel pode gerar danos socioambientais significativos, incluindo degradação de solos, contaminação de recursos hídricos e condições de trabalho precárias em regiões mineradoras. A infraestrutura de abastecimento também constitui um ponto crucial para o aumento da frota de veículos elétricos. Atualmente, o Brasil conta com poucos eletropostos distribuídos em regiões limitadas, o que restringe o uso dos veículos elétricos principalmente em viagens de longa distância. Para expandir o uso desses veículos, é necessário investimento em pontos de recarga acessíveis e rápidos, o que também depende de políticas públicas e incentivos governamentais (Bastos, 2024).

No âmbito legislativo, há movimentos no Brasil para limitar o uso dos automóveis a combustão. O projeto de lei que estabelece a proibição da comercialização e circulação desses veículos indica a tendência de uma transição para a eletromobidade, alinhada à redução das emissões de gases poluentes. Essa iniciativa acompanha decisões internacionais, como a Alemanha, que fixou prazos para a retirada dos veículos combustíveis em consonância com os objetivos do Acordo de Paris. Países como Noruega e Reino Unido também estabeleceram metas

ambiciosas para eletrificar sua frota, mostrando que a mobilidade sustentável tornou-se uma estratégia global de mitigação climática. Além disso, para que os veículos elétricos se popularizem no país, é fundamental o investimento em fontes renováveis de energia e a ampliação da capacidade do setor elétrico. Como a recarga dos carros é feita pela rede elétrica, o aumento do consumo desses veículos implica equilíbrio e desenvolvimento da matriz energética, evitando sobrecargas e interrupções no fornecimento. Isso reforça a necessidade de planejamento estratégico integrado entre mobilidade e energia, com foco em confiabilidade, segurança energética e ampliação do acesso à eletricidade (Bastos, 2024).

Por fim, a transição para veículos elétricos requer não apenas tecnologia, mas uma mudança estrutural no sistema de transporte e energia do Brasil. A combinação de incentivos financeiros, subsídios, redução de tributos e criação de condições favoráveis para o consumidor são caminhos apontados para estimular a adoção desses veículos compactos e menos poluentes. Programas de financiamento inclusivos, estímulos à expansão da rede de recarga e campanhas educativas podem acelerar a aceitação social dos veículos elétricos, sobretudo em centros urbanos onde o impacto ambiental da mobilidade é mais evidente. Somente com ações convergentes será possível superar os obstáculos técnicos e financeiros atualmente existentes e criar um ambiente propício ao desenvolvimento tecnológico nacional no setor automotivo (Cavacllano, 2020)

Complementando a análise sobre a autonomia e eficiência dos veículos elétricos, destaca-se a relevância da integração dos veículos elétricos com sistemas inteligentes de transporte para a otimização do desempenho energético. A implementação de sistemas avançados de gerenciamento de energia, associada a protocolos de comunicação veículo-veículo e veículo-infraestrutura, possibilita estratégias de controle adaptativas que maximizam a eficiência da bateria e minimizam o consumo energético durante operações em condições dinâmicas do trânsito urbano. Sistemas inteligentes podem, por exemplo, prever congestionamentos, alternar modos de condução automaticamente e até mesmo sugerir rotas que otimizem o uso energético, contribuindo para maior autonomia e eficiência operacional dos veículos elétricos (Cavacllano, 2020).

Adicionalmente, a matriz energética brasileira, predominantemente composta por fontes renováveis, especialmente hidrelétricas, constitui um fator crucial na avaliação do ciclo de vida ambiental dos veículos elétricos. Este contexto confere um diferencial favorável ao perfil de emissões indiretas dos veículos elétricos no território nacional, reduzindo substancialmente a pegada carbônica associada à eletrificação do transporte terrestre. Entretanto, a exploração e o processamento dos materiais críticos empregados nas baterias de íons-lítio, como lítio, cobalto e níquel, apresentam desafios socioambientais significativos, incluindo impactos ecossistêmicos e aspectos ligados à justiça ambiental. A cadeia global de suprimentos dessas matérias-primas envolve países com legislações ambientais frágeis e condições laborais vulneráveis, demandando esforços internacionais de governança e certificação. Neste cenário, a pesquisa em tecnologias emergentes, tais como baterias de estado sólido e sistemas baseados em sódio, visa desenvolver soluções com maior densidade energética, melhor ciclo de vida operacional e menor risco ambiental, contribuindo para a sustentabilidade tecnológica dos veículos elétricos (Cavacllano, 2020).

No domínio da mitigação da poluição atmosférica urbana, os veículos elétricos promovem redução das emissões locais de poluentes criteriosos como material particulado, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. Além disso, mitigam a poluição sonora decorrente da operação silenciosa dos motores elétricos, o que contribui para a melhoria da qualidade de vida na esfera metropolitana, especialmente em áreas densamente povoadas e sensíveis, como zonas hospitalares e escolares. No tocante à infraestrutura de recarga, a expansão da rede de eletropostos, contemplando instalações residenciais, comerciais e públicas, associada a sistemas de carregamento inteligente e tecnologias bidirecionais, torna-se estratégica. Tais sistemas permitem a flexibilização da demanda energética, integração eficiente com a rede elétrica e potencial armazenamento distribuído, elevando a resiliência do sistema elétrico e promovendo sinergias com fontes intermitentes de energia renovável, como solar e eólica (Bastos, 2024)

A política pública constitui vetor essencial para a difusão dos veículos elétricos, por meio de instrumentos econômicos, regulatórios e normativos. A concessão de incentivos fiscais, subsídios para aquisição e instalação de pontos de recarga, além de restrições direcionadas a veículos com altos índices de emissão, demonstram eficácia comprovada em escalas internacionais para acelerar a transição para a

mobilidade sustentável. Em países europeus e asiáticos, políticas integradas resultaram em crescimento acelerado da frota elétrica, criando condições econômicas favoráveis para que consumidores migrassem gradualmente para tecnologias limpas. O setor automotivo, em alinhamento com políticas de inovação e desenvolvimento tecnológico, necessita promover a ampliação da oferta e a diversificação de modelos de veículos elétricos, a fim de atender diferentes segmentos de mercado, como utilitários, transporte coletivo e veículos populares. Parcerias estratégicas entre montadoras, fornecedores de baterias e instituições governamentais fomentam a cadeia produtiva, geram impactos socioeconômicos positivos e impulsionam a competitividade tecnológica nacional (Onohara, Onohara, 2022).

Finalmente, a disseminação do conhecimento científico e a sensibilização da população, por meio de campanhas educativas e ações de engajamento social, são fundamentais para assegurar a aceitação social e o engajamento coletivo na adoção das tecnologias de mobilidade elétrica. A transformação cultural é tão importante quanto o avanço tecnológico, uma vez que consumidores precisam compreender os benefícios econômicos, ambientais e sociais da eletromobilidade. A convergência entre avanços tecnológicos, políticas públicas robustas, infraestrutura adequada e transformação cultural sustenta o progresso rumo a sistemas de transporte eletromobilizados, energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis (Bastos, 2024).

Complementando o panorama, a gestão integrada da cadeia de suprimentos de materiais críticos para baterias surge como um desafio estratégico. A diversificação das fontes de aprovisionamento, o estabelecimento de práticas de mineração responsáveis e a promoção da reciclagem eficiente de baterias usadas são medidas imprescindíveis para garantir a sustentabilidade ambiental e a segurança de abastecimento do setor de veículos elétricos no Brasil. A implementação de cadeias circulares, em que materiais são recuperados e reinseridos no processo produtivo, reduz custos, dependência externa e impactos socioambientais (Bastos, 2024).

Outra dimensão relevante refere-se à adaptabilidade das redes de distribuição elétrica diante do aumento da demanda por recarga veicular. O investimento em sistemas inteligentes de monitoramento e controle da rede, aliados a tecnologias de armazenamento distribuído e microrredes, permite mitigar riscos de sobrecarga,

otimizar o uso da energia gerada por fontes renováveis e assegurar a qualidade e confiabilidade do fornecimento aos consumidores finais. A mobilidade elétrica também desempenha papel vital na redução dos impactos sociais associados à poluição do ar e ao trânsito congestionado nas áreas urbanas brasileiras. A combinação dos benefícios ambientais com a melhoria da acessibilidade e a redução dos custos operacionais dos veículos pode contribuir para a inclusão social e a promoção de padrões urbanos mais sustentáveis e saudáveis (Cavaclano, 2020).

No que se refere à pesquisa e desenvolvimento, o estímulo à inovação tecnológica no setor automotivo nacional é crucial para consolidar o Brasil como um ator relevante no mercado global de mobilidade elétrica. Incentivos para centros de pesquisa, fomento a startups e cooperação internacional potencializam a criação de soluções adaptadas às características locais, acelerando a competitividade e a geração de empregos qualificados. Além disso, políticas industriais voltadas à formação de mão de obra especializada em engenharia elétrica, ciência dos materiais, química e computação são fundamentais para que o país avance no desenvolvimento de tecnologias próprias, reduzindo dependências externas. Por último, a elaboração de indicadores de desempenho e monitoramento sistemático do impacto da eletromobilidade é essencial para a formulação de políticas públicas eficazes. A transparência na governança, aliada à participação de múltiplos atores, governo, setor privado, academia e sociedade civil, garante um processo dinâmico e responsivo, capaz de superar desafios e consolidar uma transição justa e sustentável para a mobilidade elétrica no Brasil (Cavaclano, 2020).

2.3.1 RESULTADOS DO WLTP

A autonomia de um veículo elétrico é um dos critérios fundamentais para a sua avaliação e escolha por parte dos utilizadores, sendo uma medida da distância que o veículo pode percorrer com uma única carga da bateria. A autonomia WLTP, calculada segundo o procedimento WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure), é um parâmetro padronizado e recomendável para comparar veículos, pois estima o consumo energético e as emissões de forma mais próxima ao comportamento real do dia a dia. Este método considera variáveis como velocidades médias, acelerações, desacelerações e o uso dos sistemas auxiliares do veículo,

incluindo o ar-condicionado, sendo atualmente o padrão adotado em Portugal e na União Europeia para a homologação dos veículos (Sousa, 2021).

Todavia, apesar de a autonomia WLTP apresentar valores mais realistas do que os processos anteriores, estes valores ainda correspondem a um cenário laboratorial idealizado. Na prática, diversos fatores externos e internos influenciam a autonomia efetiva, e entre estes destaca-se de forma significativa a temperatura ambiente. Em condições de frio, o desempenho da bateria sofre uma diminuição considerável, dado que as baterias de íon-lítio, comuns nos EVs têm uma reação química dependente da temperatura. Em baixas temperaturas, ocorre uma redução da mobilidade dos íons dentro da bateria, causando maior resistência interna, o que reduz a capacidade útil da bateria e consequentemente a autonomia do veículo (Sousa, 2021).

Além disso, em épocas frias, o desempenho do veículo é afetado pelo consumo adicional de energia para o aquecimento do habitáculo, dado que ao contrário dos veículos a combustão interna, que aproveitam o calor residual do motor, os EVs dependem de sistemas elétricos dedicados para proporcionar o conforto térmico. Esse aquecimento consome uma parcela significativa da carga disponível, diminuindo ainda mais a autonomia. Também é importante considerar que o aquecimento da própria bateria pode ser necessário para manter a bateria em condições operacionais eficientes e seguras, o que acarreta consumo energético adicional (Sousa, 2021).

Estudos e observações reportam que a autonomia real dos EVs pode sofrer uma redução de até 25% em condições de frio intenso, implicando que a autonomia estimada pelo WLTP pode ser superestimada em até um quarto. Este fator torna-se crucial para os utilizadores que dependem da autonomia para planeamento das suas viagens, principalmente em contextos de utilizadores domésticos ou regime urbano, onde a autonomia é um critério chave para a decisão de compra e de substituição do veículo a combustão (Sousa, 2021).

Neste sentido, faz-se necessária uma compreensão profunda dos critérios que influenciam a decisão na escolha de um EV. Os critérios quantitativos, como autonomia, consumo energético, capacidade da bateria, potência e preço, são geralmente mensuráveis e considerados na escolha do veículo. Porém, aspectos

qualitativos, que muitas vezes são subjetivos, como conforto, tecnologia e segurança, são transformados em critérios quantitativos correlacionados para facilitar essa avaliação. A atribuição de pesos a esses critérios pode alterar significativamente o ranking dos modelos disponíveis, sendo o Lexus UX 300e e o Opel Corsa-e exemplos de modelos avaliados favoravelmente em estudos de multicritério, com impactos sensíveis à variação de pesos atribuídos à autonomia e preço (Sousa, 2021).

A Tabela 1 (modificada com o intuito de apresentar somente os valores mais relevantes) apresenta os resultados dos testes de autonomia de diversos veículos elétricos conforme o procedimento WLTP, evidenciando a diferença entre a autonomia declarada pelos fabricantes e a distância efetivamente alcançada em condições práticas de uso. Os valores apresentados ilustram o desvio percentual entre os dados laboratoriais e o desempenho real, permitindo uma análise comparativa do comportamento dos modelos em situações cotidianas. Essa comparação é fundamental, uma vez que fatores externos, como temperatura, uso de climatização e estilo de condução, podem reduzir significativamente a autonomia dos veículos, tornando essencial para os consumidores e investigadores a avaliação do desempenho real dos EVs em diferentes contextos urbanos e rodoviários. (ELEKTREK, 2025)

Quadro 1 – Resultados dos testes do WLTP

Modelo do carro	WLTP (Declarado)	Distância alcançada (mi.)	Desvio percentual
Peugeot E-3008	510	347	-31,96%
Peugeot E-5008	488	361	-26,02
Tesla Model 3	702	530,8	-24,39%
VW ID7 GTX Tourer	571	440,2	-22,91%
Porsche Macan	552	428,6	-22,36%
Audi Q6 e-tron	616	480,8	-21,95%
Volvo EX30	472	370,9	-21,42%
BMW i5 Touring	497	392,4	-21,05%
Ford Explorer	525	437	-16,76%

(Autoria própria, 2025)

Com base na análise apresentada, conclui-se que a autonomia dos veículos elétricos, embora mensurada de forma padronizada pelo procedimento WLTP, deve ser interpretada com cautela pelos utilizadores. Os valores laboratoriais fornecem uma referência útil para comparação entre modelos, mas não refletem integralmente as

condições reais de utilização, especialmente em contextos urbanos ou sob variações climáticas significativas. Fatores como baixa temperatura ambiente, consumo energético para aquecimento do habitáculo e necessidade de aquecimento da própria bateria podem reduzir de forma relevante a autonomia efetiva, impactando diretamente o planejamento das viagens e a percepção de confiabilidade do veículo. Dessa forma, a avaliação da autonomia deve considerar tanto os dados padronizados quanto as condições práticas de uso para uma escolha mais consciente e adequada às necessidades do utilizador.

2.4 INFRAESTRUTURA E DEMANDA DA MOBILIDADE ELÉTRICA

A expansão da frota de veículos elétricos (EVs) representa uma transformação significativa na mobilidade urbana mundial, incluindo o Brasil, e traz consigo a necessidade urgente de uma infraestrutura robusta e adequada. Para que essa transição ocorra de forma eficiente e sustentável, é fundamental o desenvolvimento de redes de recarga avançadas, redes elétricas inteligentes (smart grids) e sistemas eficazes de armazenamento de energia. Conforme destacado pela IRENA (2024), o rápido crescimento dos EVs pode exercer pressão sobre o sistema elétrico, especialmente em horários com alta concentração de recargas simultâneas, potencialmente provocando picos significativos na demanda de energia (Santos, Araujo *et al*, 2021).

No contexto brasileiro, essa questão ganha ainda mais relevância devido à crescente adoção de veículos elétricos e híbridos, que dependem de uma rede de recarga capacitada para atender à demanda sem gerar sobrecargas no sistema elétrico. Investimentos em infraestrutura são essenciais para viabilizar essa expansão, conforme demonstrado pelas iniciativas privadas, como a implantação de estações de recarga ultrarrápida pela EDP no estado de São Paulo, em parceria com grandes montadoras automotivas. Esse esforço integrado busca não somente atender à demanda crescente, mas também estimular práticas de recarga que minimizem impactos no sistema energético. Entretanto, a eletromobilidade traz também desafios ambientais relevantes, especialmente relacionados à cadeia de produção das baterias dos veículos elétricos. A extração e o processamento de metais estratégicos, tais como lítio, níquel e cobalto, essenciais para a fabricação dessas baterias, levantam

preocupações ambientais que precisam ser avaliadas e geridas com responsabilidade para garantir a sustentabilidade do setor (Santos, Araujo *et al*, 2021).

Assim, o desenvolvimento da eletromobilidade no Brasil demanda um conjunto articulado de ações que incluam a ampliação e modernização da infraestrutura de recarga, a implementação de redes inteligentes que otimizem o consumo de energia e estímulos para o uso racional da rede, além do compromisso com práticas sustentáveis na cadeia produtiva das baterias. Essa abordagem integrada é fundamental para que a transição para os veículos elétricos contribua efetivamente para a redução das emissões de gases poluentes e o fortalecimento da matriz energética brasileira predominantemente renovável (Santos, Araujo *et al*, 2021).

No contexto internacional, a expansão da eletromobilidade tem ocorrido de forma acelerada, impulsionada por políticas públicas robustas, investimentos significativos em infraestrutura e avanços tecnológicos constantes. Países como Noruega, China, Estados Unidos e membros da União Europeia lideram essa transição, estabelecendo metas ambiciosas para a substituição de veículos fósseis por elétricos e investindo em redes de recarga capilares e inteligentes, capazes de suportar o aumento expressivo da frota de veículos elétricos (Subiñás, 2024).

A Noruega, por exemplo, já planeja a proibição da venda de veículos movidos a combustão interna até 2025, amparada por uma vasta rede de recarga pública e incentivos fiscais atrativos que transformaram o país no maior mercado per capita de veículos elétricos do mundo. Na China, o apoio estatal expressivo se materializa em subsídios, regulamentações e programas coordenados para a fabricação e adoção massiva de veículos elétricos, além de investimentos em redes de recarga ultrarrápidas e integradas a sistemas de energia renovável. Em escala global, a integração dos veículos elétricos às redes elétricas inteligentes é fundamental para gerenciar a demanda energética de maneira eficiente e sustentável. Tecnologias como smart grids, sistemas de armazenamento distribuído e carregamento inteligente (smart charging) são cada vez mais empregadas para mitigar os impactos dos picos de consumo e possibilitar a utilização de fontes renováveis, como solar e eólica, na recarga dos veículos. Além disso, a preocupação com a sustentabilidade na cadeia produtiva das baterias tem impulsionado pesquisas e políticas para a reciclagem, reutilização e uso de materiais menos críticos ambientalmente, visando minimizar os

impactos ambientais e garantir a segurança do fornecimento de matérias-primas essenciais (Subiñãs, 2024).

Portanto, no cenário internacional, a combinação de políticas públicas eficazes, inovação tecnológica e compromisso ambiental tem criado um ambiente propício para a expansão sustentável da eletromobilidade, servindo de referência para países como o Brasil na elaboração de estratégias coerentes e integradas para essa transformação no setor de transportes (Subiñãs, 2024).

3. METODOLOGIA

O presente estudo adota uma metodologia qualitativa ativa, caracterizada pela análise crítica e argumentativa das fontes, em que o pesquisador não se limita à

observação, mas atua de forma interventiva na interpretação dos dados. O desenho do estudo é exploratório-descritivo, visando mapear e descrever sistematicamente os desafios associados aos veículos elétricos (EVs), integrando múltiplas perspectivas para uma compreensão aprofundada do fenômeno. A pesquisa fundamenta-se em análise documental secundária, permitindo a construção de um panorama amplo sobre o tema.

A coleta de dados foi conduzida por meio de seleção criteriosa de fontes, privilegiando relevância e credibilidade. Foram incluídos: relatórios técnicos e publicações de organizações internacionais, como a Agência Internacional de Energia e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente; estudos comparativos de desempenho automotivo provenientes de instituições especializadas; e artigos jornalísticos que documentam falhas técnicas, impactos socioambientais e desenvolvimento da infraestrutura de EVs.

O procedimento de análise contemplou triangulação de fontes, combinando evidências técnicas, comparativas e jornalísticas, de modo a validar argumentos e identificar inconsistências entre expectativas e desempenho real. A análise incluiu: análise temática para identificar riscos relevantes, como autonomia limitada, sobrecarga da rede elétrica, impacto da mineração e emissões do ciclo de vida; análise comparativa crítica, confrontando dados laboratoriais, indicadores WLTP e contexto macroenergético global; e síntese interpretativa, integrando os resultados para construir uma narrativa coerente sobre os desafios sistêmicos dos EVs.

Para assegurar rigor científico, foram adotadas estratégias de validação, incluindo confirmação de dados críticos por múltiplas fontes, justificativa clara da relevância de cada referência e transparência procedimental, permitindo replicabilidade da pesquisa. Reconhecem-se limitações, como potencial viés decorrente da seleção de fontes compatíveis com a tese crítica e dificuldade de generalização a partir de casos isolados, mitigadas pelo uso predominante de dados técnicos confiáveis e evidências replicáveis, garantindo consistência analítica.

4. RESULTADOS

Os resultados do presente estudo indicam que as Análises do Ciclo de Vida dos veículos elétricos apresentam valores de emissões superiores ao que normalmente é difundido no debate público e em discursos institucionais. Embora os veículos elétricos sejam amplamente promovidos como alternativa ambientalmente superior aos veículos a combustão, verificou-se que a sua pegada ambiental completa, especialmente considerando a extração de matérias-primas, a fabricação das baterias e os processos industriais envolvidos, neutraliza parcialmente os benefícios esperados após a substituição dos motores de combustão interna. Assim, constata-se que a redução de emissões atribuída aos veículos elétricos é real, porém limitada quando analisada sob uma perspectiva total do ciclo completo.

Além disso, corroborou-se a tese de que a transição global para veículos elétricos depende diretamente de uma transformação simultânea das matrizes energéticas nacionais. A adoção massiva de veículos elétricos, por si só, não garante a redução efetiva de emissões se os sistemas elétricos continuarem baseados majoritariamente em fontes fósseis. Em diversos países, a energia utilizada para recarregar as baterias ainda provém de usinas termoeletricas movidas a carvão, gás natural ou petróleo, o que implica emissões indiretas significativas. Observa-se, portanto, que a eletrificação da frota, sem a descarbonização paralela da matriz energética, pode resultar em ganhos ambientais modestos ou insuficientes para atender às metas climáticas internacionais estabelecidas.

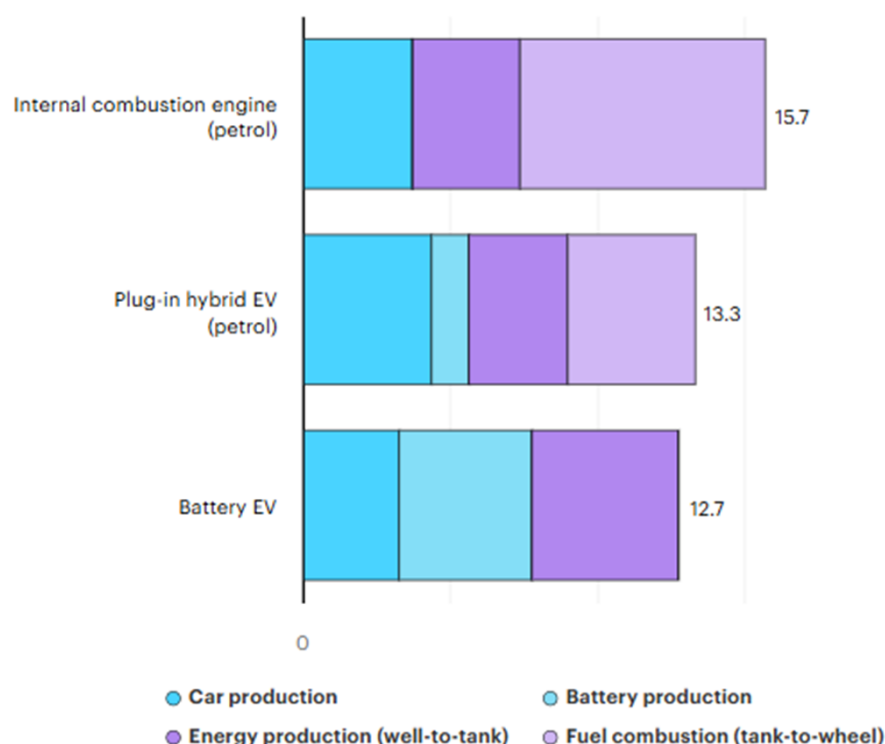
Esses resultados sugerem que políticas públicas e estratégias industriais devem ser estruturadas de forma integrada, com prioridade tanto para tecnologias de mobilidade elétrica quanto para a expansão de energias limpas e renováveis. Conclui-se que a eficácia ambiental dos veículos elétricos não reside exclusivamente na mudança do modal de transporte, mas no alinhamento entre mobilidade, infraestrutura energética e modelos de produção sustentáveis. Essa perspectiva reforça a necessidade de abordagens sistêmicas e de planejamento global, reconhecendo que a transição para os veículos elétricos representa um passo relevante, porém insuficiente se não acompanhada por uma transformação profunda das bases energéticas mundiais.

Figura 2 – comparação de ACV (considerando-se 5 anos de uso) entre carros elétricos, híbridos e a combustão, representando somente 19% a menos de emissões de GEE de carros a combustão e a bateria.

Breakdown of total emissions

lifetime  per vehicle km

tCO₂-eq/vehicle



(Fonte: IEA, 2025)

A figura 2 ilustra a comparação das emissões de ciclos de vida, considerando cinco anos de uso, entre veículos elétricos, híbridos e a combustão. Observa-se que, embora os veículos elétricos apresentem desempenho ambiental superior, a diferença relativa em termos de emissões de gases de efeito estufa representa apenas cerca de 19% a menos em relação aos veículos movidos exclusivamente a combustíveis fósseis. Este resultado reforça que o impacto positivo dos veículos elétricos, apesar existente, é limitado quando se analisa todo o ciclo de vida, sobretudo devido às emissões associadas à produção das baterias e à composição energética das matrizes que alimentam o processo de recarga. Em síntese, os resultados sinalizam que a eletrificação veicular não constitui solução isolada para a descarbonização global e que sua efetividade ambiental depende da integração com políticas energéticas estruturais, investimentos em fontes renováveis e aprimoramento tecnológico ao longo da cadeia produtiva, aspecto essencial para que

a transição energética alcance resultados substancialmente superiores aos observados atualmente.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que, embora os veículos elétricos apresentem desempenho superior em termos de redução de emissões ao longo do ciclo de vida, essa vantagem permanece limitada diante dos desafios estruturais ainda presentes, como a elevada pegada ambiental inerente à produção das baterias e as diferenças energéticas resultantes da matriz de geração elétrica. A análise evidencia ganhos ambientais, porém em magnitude inferior ao discurso amplamente difundido, reforçando que a transição para tecnologias automotivas de baixa emissão não pode ser interpretada como solução isolada. Esses achados sugerem que políticas ambientais eficazes devem contemplar não apenas a expansão da eletrificação veicular, mas também a descarbonização das matrizes energéticas, o avanço tecnológico no desenvolvimento de baterias e o fortalecimento de estratégias de gestão ambiental ao longo de toda a cadeia produtiva.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo indicam que as Avaliações de Ciclo de Vida (ACVs) dos veículos elétricos apresentam emissões superiores ao que geralmente se reconhece no debate global, revelando que parte dos ganhos ambientais esperados com a transição para essa tecnologia acaba sendo atenuada. Além disso, reforça-se que a efetividade dessa transição depende diretamente de uma reestruturação profunda das matrizes energéticas. Enquanto a maior parte dos países continuar a depender de fontes fósseis como base de sua geração elétrica, o carregamento das baterias continuará associado a emissões indiretas, o que limita o potencial real de

descarbonização e evidencia que a mudança tecnológica, isoladamente, não é suficiente para garantir sustentabilidade ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL. *Baterias de lítio exigem reciclagem adequada para evitar contaminação ambiental*. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/baterias-litio-exigem-reciclagem-adequada>. Acesso em: 20 set. 2025.

AGUIAR, C. B. O. *A ordem do discurso do desenvolvimento sustentável e o lítio verde*. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/19225>. Acesso em: 31 out. 2025

ALL ABOUT BATTERY TECH. *Lithium-ion battery recycling for EVs*. Disponível em: <https://allaboutbatterytech.com/lithium-ion-battery-recycling-for-evs/>. Acesso em: 20 set. 2025.

ALMEIDA, A. L. S. *Problemáticas ambientais ligadas a eletrificação automotiva: uma revisão bibliográfica sistemática*. Ourinhos, 2024. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/9fc6ebc7-7b71-425f-9d84-fc89c0279c55>. Acesso em: 31 out. 2025.

BASTOS, R. A. *Análise da eficiência energética de um carro elétrico na cidade de São Paulo*. Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a96d9367-0db1-4110-8f24-3e5f2861c56e>. Acesso em: 31 out. 2025.

BIEKER, G. *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. Communications Earth & Environment, 2021. Acesso em: 15 set. 2025.

BLOOMBERGNEF. *Electric Vehicle Outlook 2024*. BloombergNEF, 2024. Acesso em: 16 set. 2025.

BORSA, J. G. *O lítio na transição energética: implicações econômicas e estratégias para a economia política internacional*. Porto Alegre, 2024. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/26989/1/2024_2_JULIA_GARCIA_BORSA_TCC.pdf. Acesso em: 31 out. 2025.

CARDOSO, D. O. M. OLIVEIRA, R. D. S. *Logística sustentável: veículos elétricos e a redução em emissão do CO₂*. Guarulhos, 2024. Disponível em: <https://rgti.fatecguarulhos.edu.br/ojs33/index.php/rgti/article/view/55>. Acesso em: 31 out. 2025.

CAVAGLLANO, L. *Análise da viabilidade técnica e econômica da substituição de veículos a combustão interna por veículos elétricos e veículos elétricos híbridos no Brasil*. Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/d9810ec5-e134-435f-b6a4-6167879c26ec>. Acesso em: 31 out. 2025.

EKOENERGETYKA. *Does Cold Weather Affect the Performance of Your Electric Vehicle (EV)?*. Disponível em: <https://ekoenergetyka.com/blog/does-cold-weather-affect-the-performance-of-your-electric-vehicle-ev/>. Acesso em: 27 out. 2025.

ENERGYLAST. *Are lithium batteries recyclable?*. Disponível em: <https://energylast.com/battery-lifecycle/are-lithium-batteries-recyclable/>. Acesso em: 15 set. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. *Regulation on batteries and waste batteries*. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

FINANCIAL EXPRESS. *Improper disposal of batteries contributes to over 40% of the hazardous chemicals in landfills*. Disponível em: <https://www.financialexpress.com/business/express-mobility-improper-disposal-of-batteries-contributes-to-over-40-of-the-hazardous-chemicals-in-landfills-with-major-risks-of-groundwater-contamination-3700409/>. Acesso em: 16 set. 2025.

FREITAS, F. T. MARCHESINI, M. M. P. *A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítios nos veículos elétricos*. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ProdutoProducao/article/view/121904>. Acesso em: 31 out. 2025.

GRIDSERVE. *What is WLTP and How Does it Impact the Real-World Range of My Electric Car?*. Disponível em: <https://www.gridserve.com/what-is-wltp-and-how-does-it-impact-the-real-world-range-of-my-electric-car/>. Acesso em: 27 out. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). *Reciclagem de baterias e o desafio da mobilidade elétrica no Brasil*. Disponível em: <https://www.iema.org.br/reciclagem-de-baterias-mobilidade-eletrica>. Acesso em: 15 set. 2025.

INSIDEEVS. *EV Range Loss in Cold: Heat Pump Data*. Disponível em: <https://insideevs.com/news/747374/ev-range-loss-cold-heat-pump-data/>. Acesso em: 27 out. 2025.

INSIDEEVS. *EV Winter Range Test Norway 2025*. Disponível em: <https://insideevs.com/news/747548/ev-winter-range-test-norway-2025/>. Acesso em: 27 out. 2025.

INSIDEEVS. *How Cold Affects Electric Vehicles*. Disponível em: <https://insideevs.com/features/703378/how-cold-affects-electric-vehicles/>. Acesso em: 27 out. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *World Energy Transitions Outlook 2024*. Abu Dhabi,, 2024. Acesso em: 17 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024. Acesso em: 15 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024. Acesso em: 17 set. 2025.

MERA, Z. BIEKER, G. REBOUÇAS, A. B. CIEPLINSKI, A. *Comparação das emissões de gases efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil*. Washington, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-PORT-v4.pdf>. Acesso em: 31 out. 2025.

NOSSA, V. et al. *A comparative life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Portugal*. Journal of Cleaner Production, v. 232, p. 1236–1250, 2019. Acesso em: 15 set. 2025.

OEM LITHIUM BATTERIES. *What are the environmental impacts of battery disposal?*. Disponível em: <https://www.oem-lithium-batteries.com/what-are-the-environmental-impacts-of-battery-disposal/>. Acesso em: 15 set. 2025.

ONOHARA, E. Y. ONOHARA, M. M. *Entre A Eficiência Energética De Carro Elétrico E De Carro À Combustão: uma análise dos impactos socioambientais e financeiros*. Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://www.revistas.editoraenterprising.net/index.php/regmpe/article/view/439/657>. Acesso em: 31 out. 2025.

PV MAGAZINE. *Lithium-ion recycling rates far higher than some statistics suggest*. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2019/07/12/lithium-ion-recycling-rates-far-higher-than-some-statistics-suggest/>. Acesso em: 17 set. 2025.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY (RSC). *Environmental and social challenges of battery disposal*. Disponível em: <https://pubs.rsc.org>. Acesso em: 15 set. 2025.

SANTOS, G. R. ARAUJO, K. K. M. SANTOS, P. A. *O impacto da eletromobilidade: veículos elétricos, meio ambiente e a infraestrutura energética do Brasil*. Disponível em: <https://share.google/zW8ZK9H4XhsRlo6uF>. Acesso em: 31 out. 2025.

SILVA, M. R. R. *A política nacional de resíduos e sólidos e o descarte de bateria dos veículos elétricos e híbridos*. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/items/fcb80c5e-858d-4b60-857f-9164b760c9bb>. Acesso em: 31 out. 2025.

SOUSA, F. M. L. *Metodologia para a seleção de um veículo elétrico doméstico*. Portugal, 2011. Disponível em: <https://share.google/SCFYQAFiOyDVPOxm3>. Acesso em: 31 out. 2025.

SOVACOOOL, B. K.; AXSEN, J.; KEMPEN, M. *The whole system barrier to the electrification of road transport*. Nature Energy, v. 4, p. 1–3, 2019. Acesso em: 17 set. 2025.

SUBIÑAS, D. S. *Estratégias para a gestão da demanda energética mediante a otimização do carregamento de veículos elétricos*. Campinas, 2024. Disponível em: <https://share.google/7ZXtV92xgawLu1pnO>. Acesso em: 31 out. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Lithium-ion battery recycling*. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/lithium-ion-battery-recycling>. Acesso em: 16 set. 2025.

VARGAS, E. C. *Estudo desenvolvimento e montagem do veículo elétrico EV- IF SC II*. Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2920>. Acesso em: 31 out. 2025.