



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

HENRY YUZO SASAKI AOYAGUE

IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO E
NO MEIO AMBIENTE

Rosana

2024

HENRY YUZO SASAKI AOYAGUE

IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO E
NO MEIO AMBIENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria de Curso de Engenharia de
Energia do Campus Experimental de Rosana,
Universidade Estadual Paulista, como parte dos
requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Francisco Resende
da Silva

Rosana - SP
2024

A638i

Aoyague, Henry Yuzo Sasaki

Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente / Henry Yuzo Sasaki Aoyague. -- Rosana, 2024
60 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: José Francisco Resende da Silva

1. Veículos elétricos. 2. Impactos energéticos e ambientais. 3. Sistema elétrico. 4. Análise do ciclo de vida. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

HENRY YUZO SASAKI AOYAGUE

IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO E
NO MEIO AMBIENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia.

Rosana, ____ / ____ / ____.

Componentes da Banca Examinadora:

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Jose Francisco Resende da Silva, Câmpus de Rosana, UNESP

Membro Titular: Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira, Câmpus de Rosana, UNESP

Membro Titular: Profa. Dra. Letícia Sabo Boschi, Câmpus de Rosana, UNESP

dedico este trabalho
de modo especial, aos meus pais, Frank e
Irma, e a Deus.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dar forças para finalizar o curso de Engenharia de Energia na UNESP. Sua orientação divina foi o alicerce da minha jornada acadêmica, e por isso lhe entrego toda a gratidão.

Agradeço minha família e meus amigos, que foram pilares fundamentais durante essa jornada. À minha família, em especial meus pais, Frank e Irma, expresso minha profunda gratidão por seu apoio inabalável ao longo de minha vida. Sem o amor e incentivo de vocês, nada disso seria possível.

Aos amigos que fiz na faculdade, Bruna e Lucas Laurindo, agradeço por estarem ao meu lado durante os desafios acadêmicos e pessoais. Sua amizade foi um presente inestimável.

Também sou imensamente grato aos professores, funcionários da universidade e a todas as pessoas da UNESP FEC que, de alguma forma, contribuíram para minha formação. Em especial, gostaria de destacar o Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado, que me concedeu a oportunidade de realizar uma iniciação científica, impulsionando minha carreira profissional. E ao Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva, meu orientador do TCC, agradeço por sua orientação, sabedoria e apoio ao longo desta jornada acadêmica.

Por fim, agradeço novamente a Deus por guiar meus passos, a minha família, amigos e mentores por serem fontes inesgotáveis de apoio e inspiração, e aos funcionários e pessoas da UNESP FEC por contribuírem para o meu crescimento acadêmico. Este trabalho é dedicado a todos vocês, como expressão de minha profunda gratidão."

“O conhecimento é o bem supremo, de valor inestimável.”

Sócrates

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os impactos da adoção de veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEV) e veículos elétricos a bateria (BEV) no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente, considerando diferentes cenários de penetração dessa tecnologia até 2030. A metodologia envolveu a caracterização da frota de veículos elétricos (EV), a modelagem da demanda de energia, a análise do ciclo de vida (ACV) dos veículos, com foco nas matérias-primas alumínio e lítio, e a avaliação integrada dos impactos ambientais e energéticos. Os resultados demonstram que, em 2023, os veículos *plug-in* vendidos foram responsáveis pela emissão de cerca de 157.028,203 toneladas de gás carbônico equivalente (CO_{2e}) e 138,470 toneladas de resíduos. Em 2030, no cenário otimista, a emissão de gás carbônico (CO₂) pode chegar a 861.863,716 toneladas para PHEVs e 1.791.337,031 toneladas para BEVs, com geração de resíduos de 704,688 e 1.718,734 toneladas, respectivamente. A demanda adicional de energia elétrica pode variar de 2.607 MWh/dia no cenário conservador, até 13.706 MWh/dia no cenário otimista em 2030. Atualmente, a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) é de 221.621 MW (maio/2024), com projeção de expansão para 254.341 MW até dezembro de 2028, segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Essa demanda adicional dos veículos *plug-in* representaria de 1,0% a 5,4% da capacidade total em 2028. Conclui-se que a inserção dos EVs trará desafios significativos para a capacidade e operação do sistema elétrico, demandando investimentos em expansão e modernização da rede. Por outro lado, representa uma oportunidade para acelerar a transição para uma matriz mais limpa e renovável, com destaque para as fontes eólica e solar.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. Impactos ambientais. Sistema elétrico. Análise do ciclo de vida

. Alumínio. Lítio.

ABSTRACT

This study aims to analyze the impacts of the adoption of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and battery electric vehicles (BEVs) on the Brazilian electrical system and the environment, considering different scenarios of penetration of this technology until 2030. The methodology involved the characterization of the electric vehicle (EV) fleet, energy demand modeling, life cycle assessment (LCA) of vehicles, focusing on aluminum and lithium, and the integrated assessment of environmental and energy impacts. The results show that, in 2023, plug-in vehicles sold were responsible for the emission of approximately 157,028.203 tons of carbon dioxide equivalent (CO_{2e}) and 138.470 tons of waste. In 2030, in the optimistic scenario, carbon dioxide (CO₂) emissions may reach 861,863.716 tons for PHEVs and 1,791,337.031 tons for BEVs, with waste generation of 704.688 and 1,718.734 tons, respectively. The additional electricity demand may vary from 2,607 MWh/day in the conservative scenario to 13,706 MWh/day in the optimistic scenario in 2030. Currently, the installed capacity of the National Interconnected System (SIN) is 221,621 MW (May/2024), with a projected expansion to 254,341 MW by December 2028, according to the Brazilian National Electric System Operator (ONS). This additional demand from plug-in vehicles would represent 1.0% to 5.4% of the total capacity in 2028. It is concluded that the insertion of EVs will bring significant challenges to the capacity and operation of the electrical system, requiring investments in network expansion and modernization. On the other hand, it represents an opportunity to accelerate the transition to a cleaner and more renewable energy matrix, with emphasis on wind and solar sources.

KEYWORDS: Electric vehicles. Environmental impacts. Electrical system. Life cycle assessment. Aluminum. Lithium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia.....	11
Figura 2 - Projeção das vendas de Veículos Elétricos (EV) de 2023 até 2035.....	20
Figura 3 - Comparação da quantidade de metais necessários para a fabricação de cada tipo de veículo.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vendas de Veículos Elétricos (EV) no Brasil (2012-2023).....	2
Tabela 2 - Vendas mensais de Veículos Elétricos (EV) no Brasil de 2012 a 2023.....	12
Tabela 3 - Vendas mensais de veículos <i>plug-in</i> no Brasil de 2010 a 2023.....	13
Tabela 4 - Características dos Veículos Elétricos Híbridos <i>Plug-in</i> (PHEV) e 100% Elétricos (BEV).	16
Tabela 5 - Projeção das vendas de Veículos Elétricos (EV) de 2023 até 2035.....	21
Tabela 6 - Projeção de Vendas de Veículos Híbridos <i>Plug-in</i> (PHEV) 2023 até 2035.....	21
Tabela 7 - Projeção de Vendas de Veículos Elétricos a Bateria (BEV) 2023 até 2035.....	22
Tabela 8 – Média de demanda dos principais metais por tipo de veículo (kg/veículo).....	25
Tabela 9 - Média de demanda de terras raras por tipo de veículo (g/veículo).....	25
Tabela 10 - Uso de recursos/emissões de poluentes por tonelada.	26
Tabela 11 - Consumo de alumínio, lítio e emissões de GEE em toneladas para produção de PHEV e BEV em 2030 sob diferentes cenários.....	29
Tabela 12 - Consumo de alumínio secundário, energia e emissões de GEE para produção PHEV e BEV em 2023.....	31
Tabela 13 - Evolução da capacidade instalada no SIN - maio 2024/ dezembro 2028 (MW)...	33

LISTA DE SÍMBOLOS

TC (%)	comprimento
CO ₂	gás carbônico
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
Mt	megatonelada
N/A	dados indisponíveis
Kg	quilograma
G	grama
CO ₂ e	gás carbônico equivalente
kWh	quilowatt-hora
km	quilômetro
t	tonelada
un.	unidade
Al	alumínio
Li	lítio
Al _{total}	quantidade de alumínio total
Li _{total}	quantidade de lítio total
CO ₂ Al	gás carbônico gerado pela produção de alumínio
CO ₂ eLi	gás carbônico equivalente gerado pela produção de lítio
CO ₂ e _{Total}	quantidade total de gás carbônico equivalente gerado
MWh	megawatt-hora
km/kWh	quilômetro por quilowatt-hora
kWh/dia	quilowatt-hora por dia
MW	megawatt

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Justificativa	2
3	Objetivos.....	3
3.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	3
4	Revisão bibliográfica	4
4.1	<i>Avaliação do ciclo de vida.....</i>	4
4.2	<i>Veículos Elétricos</i>	5
4.3	<i>Análise Crítica.....</i>	5
4.4	<i>Produção dos principais metais utilizados na fabricação de veículos elétricos.....</i>	7
4.4.1	<i>Alumínio.....</i>	7
4.4.2	<i>Cobre</i>	8
4.4.3	<i>Ferro</i>	8
4.4.4	<i>Cobalto</i>	9
4.4.5	<i>Lítio</i>	10
4.5	<i>Considerações Finais</i>	10
5	Metodologia.....	11
5.1	<i>Caracterização da frota de veículos elétricos</i>	11
5.1.1	<i>Projeção da inserção dos veículos elétricos no mercado brasileiro.....</i>	13
5.2	<i>Modelagem da demanda de energia e análise do ciclo de vida dos veículos elétricos</i> <i>15</i>	
5.3	<i>Avaliação integrada dos impactos ambientais e energéticos</i>	17
5.3.1	<i>Objetivo e escopo da ACV</i>	17
5.3.1.1	<i>Sistema de produto e fronteira do sistema.....</i>	17
5.3.1.2	<i>Avaliação de impactos</i>	18
5.4	<i>Limitações do estudo</i>	18
5.5	<i>Análise dos resultados e conclusões.....</i>	18

6	Resultados e discussão.....	18
6.1	<i>Projeção dos Cenários</i>	<i>19</i>
6.2	<i>Estimativa de demanda adicional de energia.....</i>	<i>22</i>
6.3	<i>Análise do ciclo de vida.....</i>	<i>24</i>
6.3.1	Produção do veículo	24
6.3.1.1	Etapa de extração e produção do Alumínio e lítio.....	26
6.3.1.2	Emissão de Gases do Efeito Estufa e geração de resíduos	26
6.3.2	Fase de uso do veículo.....	30
6.3.3	Fim de vida.....	30
6.3.4	Reciclagem do veículo.....	31
6.4	<i>Análise da capacidade do sistema elétrico e na matriz de geração.....</i>	<i>32</i>
7	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS	38
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	42
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO MODELO PREDITIVO DESENVOLVIDO EM PYTHON.....	43
	ANEXO A – SÉRIE HISTÓRICA DE VENDAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL 2012 a 2024	46

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelo rápido desenvolvimento da civilização humana tem se tornado um dos temas mais relevantes no contexto social e político global, durante os últimos anos. Sendo o setor de transportes um dos principais responsáveis pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) no mundo, tendo sido responsável por 25% das emissões globais em 2018 (SANCHES, 2021).

Diante deste cenário, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE do setor de transportes, os Veículos Elétricos (EV) surgem como uma alternativa promissora para este fim, além de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis (ONOHARA, 2022; PEREIRA, 2019).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu cerca de 2,2 bilhões de toneladas de GEE em 2019, com o setor de energia, que engloba o consumo de combustíveis no setor de transportes, responsável por 19% dessas emissões e a segunda maior fonte de emissões de GEE, atrás apenas dos setores de mudança de uso da terra e da agropecuária, que representaram 72% das emissões. Além disso, o setor de transportes foi responsável por 47% das emissões de GEE do setor de energia (ISIS, 2022). Desse modo, a eletrificação da frota veicular brasileira apresenta um grande potencial para contribuir com as metas de redução de emissões estabelecidas pelo governo brasileiro em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (DOS SANTOS et al., 2021).

Apesar de ainda incipiente, a mobilidade elétrica vem ganhando espaço no Brasil nos últimos anos. De acordo com os dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) (2024) apresentados na Tabela 1, as vendas de EVs no Brasil apresentaram um crescimento significativo entre 2019 e 2023. Em 2019, foram vendidas 11.858 unidades, número que saltou para 93.927 em 2023, representando um aumento de 692,10% no período. Esse salto pode ser atribuído a uma combinação de fatores, como maior oferta de modelos, redução dos preços dos veículos, expansão da infraestrutura de recarga e incentivos governamentais.

Independentemente dos motivos e razões, ao analisar os dados da ABVE, é evidente o crescimento contínuo na adoção de EVs. Em 2017, observou-se um aumento significativo nas vendas de EVs, com um crescimento de 202,11%, seguido por um aumento de 198,69% no ano seguinte. Mesmo considerando esses valores como *outliers* (valores atípicos que se desviam significativamente dos demais dados), é possível notar que o crescimento nos anos subsequentes manteve-se acima de 40%, evidenciando uma tendência consistente de expansão no mercado de EVs.

Além disso, é possível observar um crescimento exponencial nas vendas totais anuais ao

longo do período, partindo de apenas 117 unidades em 2012 e atingindo 93.927 unidades em 2023. Isso demonstra a rápida adoção dessa tecnologia no mercado brasileiro.

Tabela 1 - Vendas de Veículos Elétricos (EV) no Brasil (2012-2023).

Ano	Vendas	TC (%)
2012	117	-
2013	491	319,66%
2014	855	74,13%
2015	846	-1,05%
2016	1091	28,96%
2017	3296	202,11%
2018	3970	20,45%
2019	11.858	198,69%
2020	19.745	66,51%
2021	34.990	77,21%
2022	49.245	40,74%
2023	93.927	90,73%

Fonte: Adaptado de ABVE (2024). TC (%): taxa de crescimento.

Políticas públicas como a isenção de impostos (IPI, ICMS e IPVA) para a compra de EVs e incentivos à instalação de infraestrutura de recarga têm contribuído para impulsionar esse mercado (VOOLTA, 2023). E, ainda que os EVs representem uma parcela muito pequena da frota nacional atual, considerando que o mercado total de veículos EVs no Brasil gira em torno de 2 milhões de unidades por ano, a participação dos elétricos e híbridos saltou de irrisórios 0,006% em 2012 para cerca de 4,7% em 2023 (VONBUN, 2015), reforçando cada vez a necessidade de estudos sobre os impactos que os veículos elétricos terão, não só apenas no meio ambiente, mas também no sistema elétrico.

2 JUSTIFICATIVA

Diante deste cenário, a adoção em larga escala de EVs no Brasil traz consigo uma série de desafios e impactos que precisam ser cuidadosamente analisados. Um dos principais aspectos a serem considerados é o impacto dessa transição no sistema elétrico brasileiro, uma vez que a maior penetração de veículos elétricos irá demandar um aumento significativo na geração e distribuição de eletricidade. Nesse sentido, é fundamental avaliar como a matriz elétrica brasileira, atualmente com grande participação de fontes renováveis como hidrelétricas e biomassa, irá se comportar frente a essa nova demanda.

Além dos impactos no sistema elétrico, é essencial analisar os impactos ambientais

associados a todo o ciclo de vida dos EVs, desde a extração dos materiais para a fabricação das baterias até o seu descarte e reciclagem. Estudos apontam que, dependendo da matriz elétrica utilizada para carregar as baterias, os EVs podem ter um potencial de aquecimento global maior do que veículos a combustão ao longo do seu ciclo de vida (MATTEI; PARRÉ, 2021). Portanto, uma avaliação abrangente considerando as especificidades do contexto brasileiro é necessária.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar os impactos da adoção de veículos elétricos a bateria e veículos elétricos híbridos *plug-in* no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente, considerando diferentes cenários de penetração dessa tecnologia no mercado nacional.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados aos veículos elétricos, seus impactos no sistema elétrico e no meio ambiente;
- Conduzir uma análise do ciclo de vida de veículos elétricos adaptados para o contexto brasileiro, avaliando a demanda de energia primária e o potencial de aquecimento global;
- Analisar diferentes cenários de penetração de veículos elétricos no mercado brasileiro e seus impactos na matriz elétrica nacional;
- Discutir os resultados obtidos e suas implicações para o planejamento energético e ambiental do Brasil.

A relevância deste estudo se dá pela necessidade de se compreender de forma abrangente e sistêmica os potenciais impactos, positivos e negativos, da eletrificação da frota veicular no Brasil. Com a crescente pressão global para a descarbonização e a busca por uma maior eficiência energética, é fundamental que o Brasil esteja preparado para lidar com as transformações no setor de transportes.

Ao fornecer uma análise detalhada do ciclo de vida dos veículos elétricos no contexto brasileiro, considerando a matriz energética e cadeia produtiva do alumínio e lítio, este trabalho poderá contribuir para melhor entendimento dos reais impactos do EVs. Do ponto de vista acadêmico, esta pesquisa se insere em um campo ainda pouco explorado no Brasil, que é a avaliação dos impactos ambientais da mobilidade elétrica considerando todo o ciclo de vida. Ao utilizar metodologias consagradas internacionalmente, como a Avaliação do Ciclo de Vida

(ACV), e adaptá-las para a realidade nacional, espera-se avançar o conhecimento científico sobre o tema e estimular novos estudos na área.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi conduzida com base nos principais conceitos relacionados à análise do ciclo de vida de veículos elétricos e seus impactos ambientais. Foi explorado o estado-da-arte da metodologia de ACV e seus principais indicadores, assim como os conceitos relacionados a EVs e algumas de suas tecnologias.

4.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Segundo Baran (2012) e Sanches (2021) a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia desenvolvida ao longo de décadas que se tornou referência para mapear os impactos ambientais de toda a cadeia de processos que compõe o ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte final.

As principais etapas de uma ACV, de acordo com as normas ISO 14040 e 14044, são: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação. A definição de uma unidade funcional permite a comparação de diferentes sistemas. A análise de inventário quantifica fluxos de entrada e saída de cada processo (BARAN, 2012; SANCHES, 2021). A avaliação de impactos classifica e caracteriza os fluxos em categorias de impacto ambiental. De acordo com Onohara (2022) e Sanches (2021), algumas das principais categorias de impacto ambiental avaliadas em ACVs são:

- Demanda de energia primária: quantifica a eficiência energética total da cadeia de processos, considerando a energia extraída do ambiente. Pode ser medida pela exergia, que leva em conta quantidade e qualidade da energia.
- Potencial de aquecimento global: mede o forçamento radiativo de GEE em relação ao gás carbônico (CO₂), considerando diferentes horizontes de tempo.
- Potencial de depleção abiótica: caracteriza a exploração de recursos naturais não-renováveis como metais, minerais e combustíveis fósseis. Considera aspectos como escassez e taxa de extração dos recursos.

A interpretação dos resultados de uma ACV deve considerar as circunstâncias específicas de cada processo e produto analisado, assim como as incertezas envolvidas. A ACV fornece informações relevantes para tomada de decisão, mas deve ser utilizada em conjunto com outros

critérios técnicos, econômicos e sociais (SANCHES, 2021).

4.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os EVs têm sido apontados como uma das alternativas mais promissoras para reduzir as emissões de GEE, além da dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes (PEREIRA, 2019). Eles apresentam maior eficiência energética e menores emissões diretas que os veículos a combustão interna. As principais configurações de veículos elétricos são (IRENA, 2017):

- Veículo elétrico a bateria (BEV): movido exclusivamente por um motor elétrico alimentado por uma bateria recarregável.
- Veículo híbrido (HEV): combina um motor a combustão e um motor elétrico. Pode ser plug-in (PHEV) se a bateria também for recarregada na rede elétrica.
- Veículo elétrico a célula de combustível (FCEV): movido por um motor elétrico, sendo a eletricidade gerada por uma célula a combustível, normalmente abastecida com hidrogênio.

O desempenho ambiental dos EVs depende de fatores como a fonte da eletricidade utilizada para recarga, a eficiência do veículo, e os impactos da produção e reciclagem do veículo em si (PEREIRA, 2019). Nos EVs, o principal componente são as baterias, com as baterias de íon-lítio sendo atualmente a tecnologia dominante, devido à sua alta densidade energética, porém, as baterias de íon lítio apresentam desafios relacionados ao suprimento de lítio e cobalto e à reciclagem (ZUBI et al., 2018).

As estações de recarga são outro aspecto fundamental para viabilizar a adoção em larga escala dos EVs. Ela envolve questões como a disponibilidade de eletricidade, o tempo de recarga, a localização dos pontos, os impactos na rede elétrica e os modelos de negócio. A integração com fontes renováveis e redes inteligentes é vista como oportunidade para otimizar os benefícios ambientais (Richardson, 2013).

4.3 ANÁLISE CRÍTICA

A revisão da literatura mostra que a ACV é uma ferramenta valiosa para avaliar os impactos ambientais dos EVs de forma abrangente, apoiando o desenvolvimento de políticas e estratégias para uma mobilidade mais sustentável. No entanto, a complexidade dos sistemas envolvidos e a dinâmica tecnológica impõem desafios metodológicos.

Um ponto crítico é a definição da unidade funcional e dos limites do sistema de forma a permitir comparações justas entre EVs e convencionais. Aspectos como tempo de vida, distância percorrida, comportamento do usuário e qualidade do serviço precisam ser considerados.

Outro desafio é a obtenção de dados representativos para os inventários, dada a diversidade de configurações de veículos e baterias, rotas tecnológicas e condições geográficas. O uso de dados médios ou genéricos pode levar a grandes incertezas. Análises de sensibilidade são recomendadas.

As categorias de impacto selecionadas devem refletir as principais preocupações ambientais, mas também as vantagens e desvantagens específicas dos EVs. Além das emissões de GEE, questões como depleção de recursos, toxicidade humana e ecotoxicidade aquática, por exemplo, podem ser relevantes para baterias.

A interpretação dos resultados deve levar em conta as limitações da ACV, como a não consideração de impactos econômicos e sociais, e a dificuldade de modelar cenários futuros (SANCHES, 2021). Nesse sentido, a ACV deve ser vista como uma das ferramentas para avaliar a sustentabilidade dos EVs, em complemento a outras abordagens.

Apesar dessas ressalvas, os estudos revisados demonstram que os EVs tendem a ter menores impactos ambientais que os veículos a combustão no seu ciclo de vida, especialmente se associados a uma matriz energética de baixo carbono, ou seja, uma matriz energética composta por principalmente fontes renováveis (PEREIRA, 2019). Eles constituem assim uma oportunidade para descarbonizar o setor de transportes e melhorar a qualidade do ar nos centros urbanos.

No entanto, para que esse potencial se concretize, políticas públicas e estratégias de negócio precisam endereçar questões como o preço dos veículos, a infraestrutura de recarga, a integração com fontes renováveis, a cadeia de suprimentos das baterias e a logística reversa (PEREIRA, 2019).

No contexto brasileiro, com uma matriz energética predominantemente renovável, os EVs se mostram particularmente promissores do ponto de vista ambiental. Contudo, estudos de ACV considerando as especificidades nacionais ainda são escassos. Essa lacuna reforça a relevância de se conduzir análises mais profundas e detalhadas.

4.4 PRODUÇÃO DOS PRINCIPAIS METAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os carros elétricos representam uma revolução no setor automotivo, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de GEE e pela busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. A produção e o funcionamento desses veículos dependem de uma variedade de metais essenciais, cada um desempenhando um papel crucial na eficiência e desempenho das baterias e outros componentes. Sendo as principais matérias-primas compostas por alumínio, cobre, ferro, cobalto e lítio (ORTEGO et al., 2020).

4.4.1 Alumínio

O minério de bauxita constitui a principal matéria-prima para a produção de alumínio, e o Brasil, é um dos países que detém vastas reservas desse recurso em seu território. De acordo com Venancio et al. (2024), estima-se que, em escala global, aproximadamente 140 milhões de toneladas de resíduos de bauxita são produzidos anualmente, resultando em volumes consideráveis armazenados.

Esses resíduos de bauxita são gerados durante o processo produtivo do óxido de alumínio (Al_2O_3), no qual cerca de 90% são transformados em alumina, enquanto os 10% restantes são distribuídos em diferentes setores industriais. Devido à sua eficiência energética, o método Bayer é amplamente adotado para a obtenção de alumina (VENANCIO; RABELO; CASTRO, 2024).

Além disso, o rejeito proveniente do processo de extração da bauxita contém um teor considerável de ferro em sua composição. Se submetido aos tratamentos adequados, esse ferro residual pode ser recuperado na forma de pelotas, as quais são posteriormente aproveitadas como insumo complementar na indústria siderúrgica. Países como China, Índia e os que integravam a antiga União Soviética têm investido nessa forma de reciclagem. O objetivo é duplo: por um lado, busca-se diminuir o volume de resíduos gerados; por outro, almeja-se desenvolver estratégias para atenuar os danos ambientais decorrentes dessa atividade (VENANCIO; RABELO; CASTRO, 2024).

O alumínio é usado em diversas partes dos EVs, como motor, bateria, rodas, chassi, carroceria e componentes estruturais. Sua leveza permite reduzir significativamente o peso total do veículo em comparação com o aço, o que é crucial para a eficiência energética (REVISTA ALUMÍNIO, 2024).

4.4.2 Cobre

Se tratando do cobre, as suas reservas declaradas mostraram um aumento significativo em todo o mundo, com um banco de dados de 2301 depósitos em 2015, contendo 3.034,7 Mt de cobre, ante 1.861,3 Mt relatadas em 2010 no estudo realizado por MUDD e JOWITT (2018). Além disso, havia 640,9 Mt de cobre contidos nas reservas (incluídas nos recursos). Este aumento na produção de cobre é atribuído à natureza abrangente do estudo, às novas descobertas feitas entre 2010 e 2015 e ao crescimento do tamanho dos recursos existentes (em um valor médio de 13%) devido a atividades de produção significativas (MUDD; JOWITT, 2018).

O estudo também afirma que o crescimento da produção de cobre não depende apenas de novas descobertas, mas também de fatores como considerações mineralógicas, ambientais, políticas, logísticas e econômicas que influenciam a conversão de recursos em reservas para produção (MUDD; JOWITT, 2018).

O cobre é amplamente utilizado em diversas partes dos veículos elétricos, como motores, baterias, cabos, sensores e relês, devido à sua excelente condutividade elétrica, uma das maiores entre os metais (IEEE, 2019).

4.4.3 Ferro

Em relação ao ferro, as reservas globais são estimadas em cerca de 370 bilhões de toneladas, com os principais produtores, incluindo Austrália, Brasil, China, Índia, Rússia e outros (GERASHCHENKOVA; DADYKIN, 2019). De acordo com a Fitch Solutions (2021), empresa especializada em análise de risco financeiro e insights de mercado, a produção mundial de minério de ferro deverá aumentar de 3 bilhões de toneladas em 2020 para 3,7 bilhões de toneladas até 2029. Esse crescimento representa uma taxa média anual de 2% ao longo da década, uma desaceleração notável em relação aos 3,4% registrados nos dez anos anteriores.

No cenário brasileiro, projeta-se uma retomada do crescimento da produção de minério de ferro nos próximos anos, após a interrupção das atividades causada pelo rompimento da barragem da Vale em Brumadinho (MG) em janeiro de 2019. Essa recuperação será impulsionada pelos baixos custos operacionais e por um robusto portfólio de projetos. A expectativa é que a produção brasileira salte de 416 milhões de toneladas em 2020 para 546 milhões de toneladas até 2029 (FITCH SOLUTIONS, 2021).

Já na Austrália, estima-se um crescimento médio anual de apenas 0,7% na produção de minério de ferro, bem abaixo dos 9,2% registrados na década anterior. Esse arrefecimento é atribuído ao fechamento de minas de pequenos produtores, enquanto as grandes mineradoras manterão suas metas de expansão para pressionar os concorrentes de alto custo (FITCH SOLUTIONS, 2021).

Por outro lado, a produção chinesa de minério de ferro tende a recuar nos próximos anos, à medida que os preços mais baixos da commodity e regulamentações ambientais mais rigorosas forçam o encerramento de operações de custo elevado. É previsto que a produção do país asiático cairá de 840 milhões de toneladas em 2020 para 791 milhões de toneladas em 2029. Além disso, as importações chinesas de minério de ferro também devem desacelerar, acompanhando o menor ritmo de produção de aço no país (FITCH SOLUTIONS, 2021).

Enquanto isso, o crescimento da produção indiana será favorecido pela remoção de impostos sobre exportação de minérios de baixo teor no Orçamento da União e pela Lei de Regulamentação e Desenvolvimento de Minas e Minerais, que simplificará o licenciamento e permitirá a reabertura de minas fechadas. A produção de minério de ferro da Índia deve avançar dos atuais 194 milhões de toneladas para 216 milhões de toneladas em 2029 (FITCH SOLUTIONS, 2021).

O ferro é o principal componente do aço, que é amplamente utilizado na fabricação de carrocerias, chassis e diversas outras peças automotivas devido à sua resistência, durabilidade e versatilidade (SACHELL).

4.4.4 Cobalto

A produção anual de cobalto varia globalmente. A República Democrática do Congo se destaca como o maior produtor, contribuindo com 55% da produção mundial de cobalto. Na Europa, a Finlândia é um produtor notável, responsável por 2% da produção global (MARINO et al., 2020). A produção de cobalto da China em 2021 foi relatada em 2.105 toneladas, mostrando uma queda de 8,5% em relação ao ano anterior (FU et al., 2020). Olhando para o futuro, as projeções sugerem que a demanda por cobalto aumentará significativamente, com estimativas variando de 235 a 430 mil toneladas até 2030 (WILSON; HAMILTON, 2022). A crescente demanda por cobalto é impulsionada pela crescente necessidade de veículos elétricos e armazenamento de baterias na transição para uma economia de energia mais limpa.

O cobalto é um componente essencial nas baterias de íon-lítio usadas em carros elétricos, sendo responsável por cerca de 25% do custo total da bateria. Ele é usado principalmente no

cátodo, juntamente com outros metais como níquel e manganês (DOSHI, 2020).

4.4.5 Lítio

De acordo com o *U.S. Geological Survey* (USGS), a produção mundial estimada de lítio em 2018, excluindo a produção dos Estados Unidos, foi de 91.800 toneladas de lítio contido em minerais e compostos, um aumento de 20,16% em relação à produção revisada de 76.400 toneladas em 2017 (USGS, 2023). Esse aumento foi impulsionado pela maior produção de lítio de salmoura e mineral em todos os países, incluindo a adição de novas produções no Canadá e na Namíbia. A Austrália, em particular, aumentou significativamente sua produção de lítio em 2018 (JAKSULA, 2018). Em 2021, a produção mundial estimada de lítio em 2018, excluindo a produção dos Estados Unidos, saltou para 107.000 toneladas (USGS, 2023).

O consumo mundial de lítio em 2018 foi estimado em aproximadamente 49.000 toneladas de lítio contido em minerais e compostos, um aumento de 24% em relação a 2017. O consumo global de lítio aumentou a um CAGR de 9% de 2008 a 2018 (JAKSULA, 2018).

Em suma, a produção e o consumo de lítio têm crescido significativamente, impulsionados pela demanda crescente por baterias de íon-lítio, que também são utilizados em EVs, especialmente na Ásia. A produção global tem se expandido com novos projetos e aumentos de capacidade, enquanto os preços têm mostrado volatilidade devido a flutuações na oferta e demanda.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica evidencia a importância da ACV para avaliar os impactos ambientais dos EVs e orientar a transição para uma mobilidade de baixo carbono. Apesar dos desafios metodológicos, os estudos indicam que os EVs tendem a ser ambientalmente superiores aos convencionais, sobretudo quando associados à eletricidade renovável. No contexto brasileiro, análises de ACV são ainda mais relevantes, dada a matriz elétrica favorável.

Além da demanda de energia primária, do potencial de aquecimento global e da depleção abiótica, pesquisas futuras podem contemplar outras categorias de impacto e aplicações específicas. Análises regionalizadas, considerando a variabilidade espacial da matriz elétrica brasileira, também são oportunas.

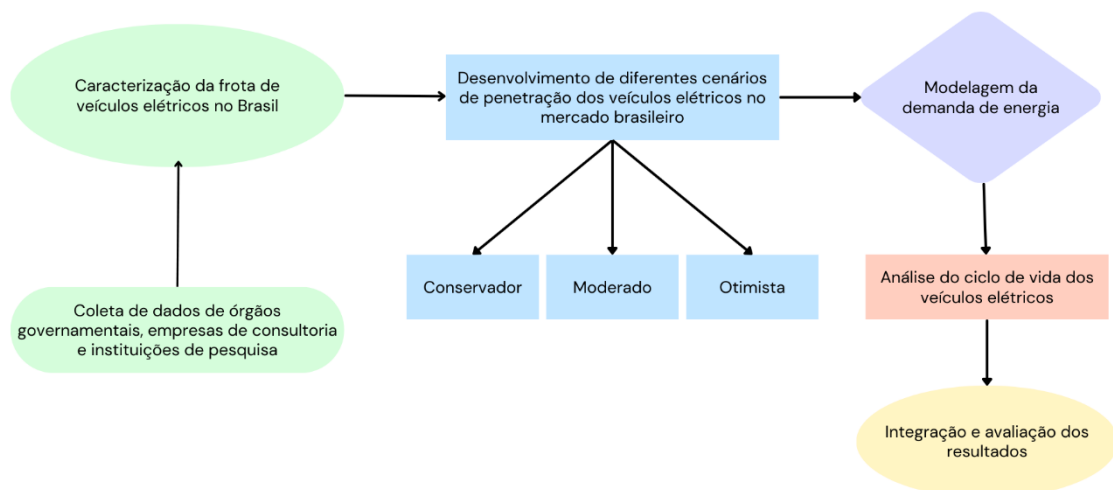
De todo modo, fica claro que a ACV é uma ferramenta indispensável, ainda que não suficiente, para avaliar a sustentabilidade da mobilidade elétrica. Ela permite vislumbrar os benefícios e desafios dessa tecnologia disruptiva, subsidiando assim o debate e as decisões rumo

a um sistema de transportes mais limpo e eficiente.

5 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, será realizada uma análise quantitativa dos impactos da adoção de PHEVs e BEVs no sistema elétrico brasileiro, considerando diferentes cenários de penetração dessas tecnologias. A metodologia empregada envolverá as seguintes etapas demonstradas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para estimar os impactos energéticos e ambientais causados pela adoção de PHEVs e BEVs, é necessário caracterizar a potencial frota desses veículos no horizonte de análise. Dito isso, para este trabalho foram definidos a criação de três cenários de penetração de EVs no mercado brasileiro até 2035, utilizando dados de vendas mensais de veículos elétricos, incluindo veículos híbridos *flex* (HEV Flex), micro-híbridos (MHEV), HEV, PHEV e BEV de 2012 a 2023 apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Vendas mensais de Veículos Elétricos (EV) no Brasil de 2012 a 2023.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Ano
2012	9	16	7	3	13	23	5	3	2	2	18	16	117
2013	45	22	53	50	12	29	65	45	23	39	52	56	491
2014	93	61	65	53	94	52	61	79	71	53	87	86	855
2015	72	56	61	73	72	74	74	100	82	55	65	62	846
2016	58	64	60	137	41	91	48	59	79	93	159	202	1.091
2017	178	157	227	176	208	238	268	627	384	243	240	350	3.296
2018	272	254	367	367	302	382	262	262	286	405	374	437	3.970
2019	370	287	336	290	357	716	960	867	1.264	1.989	2.013	2.409	11.858
2020	1.568	2.053	1.570	442	691	1.334	1.668	1.943	2.113	2.273	2.231	1.949	19.745
2021	1.321	1.389	1.872	2.708	3.102	3.507	3.625	3.873	2.756	2.787	3.505	4.545	34.990
2022	2.558	3.435	3.851	3.123	3.387	4.073	3.136	4.249	6.391	4.460	4.995	5.587	49.245
2023	4.503	4.294	5.989	4.793	6.435	6.225	7.462	9.351	8.458	9.537	10.601	16.279	93.927

Fonte: ABVE (2024).

Dessa forma, realizou-se a coleta de dados e projeções de órgãos governamentais e associações setoriais sobre a evolução do mercado de EVs no Brasil, estes foram utilizados como base para a criação de projeções dos cenários definidos. Foram considerados diferentes cenários de penetração, variando de uma adoção mais conservadora a uma mais acelerada dessa tecnologia.

A partir desses dados, foram projetados os cenários conservador, moderado e otimista, considerando diferentes taxas de crescimento anual com base nas tendências históricas e possíveis futuras políticas de incentivo, infraestrutura de recarga e avanços tecnológicos.

Além disso, também foram coletados os dados de vendas anuais dos PHEVs e BEVs de forma individual, apresentados na Tabela 3. Entretanto a busca dos números de vendas dos PHEVs se provou um desafio devido à escassez de informações.

Tabela 3 - Vendas mensais de veículos *plug-in* no Brasil de 2010 a 2023.

Ano	PHEV	BEV
2010	N/A	10
2011	N/A	8
2012	N/A	22
2013	N/A	39
2014	N/A	61
2015	N/A	61
2016	N/A	132
2017	N/A	137
2018	N/A	176
2019	N/A	538
2020	N/A	801
2021	11.461	2.851
2022	11.502	8.458
2023	33.049	19.310

Fonte: Adaptado de ABVE (2022). N/A: dados indisponíveis.

5.1.1 Projeção da inserção dos veículos elétricos no mercado brasileiro

No cenário conservador, assumiu-se uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 30% do CAGR acumulado do mercado brasileiro de EVs. Este cenário reflete um crescimento mais lento, com menos incentivos governamentais e uma aceitação mais gradual pelo mercado.

No cenário moderado, adotou-se uma taxa de crescimento de 50% do CAGR acumulado, o que pressupõe um aumento significativo no apoio governamental e na infraestrutura de recarga, além de uma maior conscientização ambiental por parte dos consumidores.

Por fim, no cenário otimista, projetou-se uma taxa de crescimento de 70% do CAGR acumulado, que assume uma rápida evolução tecnológica, políticas públicas favoráveis e uma ampla aceitação dos veículos elétricos como a principal alternativa aos veículos a combustão.

Para a projeção dos três cenários definidos, foram consideradas as taxas de crescimento anual baseadas no crescimento histórico. Utilizou-se a equação (1) para o cálculo do CAGR que foi usada como referência base para estabelecer taxas para os cenários e a equação (2) para determinar as vendas totais de EVs de cada cenário.

Em adendo, também foram realizadas projeções individuais para os PHEV e BES, a fim de se obter uma análise e resultados mais precisos.

$$CAGR = \left(\frac{Valor\ Final}{Valor\ Inicial} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (1)$$

onde:

- *Valor Final* é o total de vendas no último ano do período,
- *Valor Inicial* é o total de vendas no primeiro ano do período,
- *n* é número de anos entre o primeiro e o último ano.

Fórmula de Projeção:

$$V_{futuro} = V_{base} \times (1 + r)^n \quad (2)$$

onde:

- V_{futuro} é o número de veículos projetados para um determinado ano futuro,
- V_{base} é o número de veículos no ano base,
- r é a taxa de crescimento anual (em forma decimal),
- n é o número de anos entre o ano base e o ano futuro.

O uso de ferramentas como o *software Excel* foi essencial para a análise de dados e projeções. O *Excel* desempenhou um papel crucial na organização, limpeza e visualização dos dados iniciais, facilitando a identificação de padrões e tendências preliminares. Através de suas funcionalidades avançadas de tabelas dinâmicas, gráficos e fórmulas, foi possível realizar uma análise exploratória dos dados de vendas de veículos elétricos, identificar *outliers* e validar a consistência dos dados.

Para estimar o potencial da frota de veículos *plug-in* (PHEV + BEV), foi desenvolvido um código na linguagem *Python*. Nesse código, utilizou-se o método de previsão ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), que é amplamente reconhecido pela sua capacidade de capturar tanto a tendência quanto a sazonalidade dos dados temporais. O ARIMA foi escolhido devido à sua eficácia na modelagem de séries temporais univariadas, permitindo a análise detalhada das tendências históricas de vendas de EVs e a projeção dessas tendências para o futuro. O código processa os dados históricos, ajusta o modelo ARIMA para cada categoria de veículo (BEV e PHEV) e gera previsões até o ano de 2035, oferecendo uma visão abrangente do crescimento esperado da frota de veículos *plug-in* nos próximos anos.

O código utiliza as bibliotecas *pandas*, *numpy* e *tkinter*. A biblioteca *pandas* é usada para

manipulação e análise de dados, especificamente para carregar o banco de dados do arquivo CSV e organizar os dados em *DataFrames*. Ela também é usada para calcular as projeções de vendas de EVs e criar *DataFrames* com essas projeções.

A biblioteca *numpy* é uma biblioteca de suporte utilizada para operações numéricas eficientes. Nesse código, ela não é utilizada explicitamente, mas é comumente importada junto com *pandas* devido à sua integração e funcionalidade adicional que pode ser necessária em análises de dados mais complexas.

A biblioteca *tkinter* é uma biblioteca usada para criar interfaces gráficas em *Python*. Neste código, ela é utilizada para abrir uma janela de diálogo que permite ao usuário selecionar o arquivo CSV que contém os dados históricos de vendas de veículos elétricos. A função *filedialog.askopenfilename()* abre a janela de seleção de arquivos, tornando o processo de carregamento do arquivo mais amigável e interativo.

Essas bibliotecas foram escolhidas pois facilitam a manipulação e análise de dados, simplificam a interação do usuário com a aplicação através de uma interface gráfica, e oferecem suporte para operações numéricas que poderiam ser necessárias.

Além disso, o *Excel* auxiliou na preparação dos dados para serem utilizados no modelo ARIMA em *Python*, garantindo que os dados estivessem formatados corretamente e prontos para a modelagem preditiva. A combinação dessas ferramentas permitiu uma análise robusta e a geração de projeções mais precisas para a frota de veículos *plug-in*.

5.2 MODELAGEM DA DEMANDA DE ENERGIA E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para estimar a demanda adicional de energia elétrica decorrente da adoção de veículos elétricos no Brasil, foi necessário considerar as características dos diferentes tipos de EVs, como os híbridos *plug-in* (PHEV) e os 100% elétricos (BEV). Segundo o Inmetro (2024), esses veículos possuem as seguintes especificações da Tabela 4.

Tabela 4 - Características dos Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* (PHEV) e 100% Elétricos (BEV).

	PHEV	BEV
Motor	Combustão interna e elétrico	Elétrico
Capacidade da Bateria	10 a 20 kWh	20 a 100 kWh
Capacidade média da Bateria	15 kWh	60 kWh
Autonomia média	400 a 700 km no combustível 30 a 120 km na bateria	200 a 500 km na bateria
Eficiência energética	3 km/kWh a 6 km/kWh	5 km/kWh a 10 km/kWh
Consumo energético médio	4,5 km/kWh	7,5 km/kWh
Autonomia média no modo elétrico	75 km	350 km
Consumo diário médio	12,18 kWh	7,31 kWh

Fonte: Adaptado de Inmetro (2024).

Segundo dados da KBB Brasil, em 2023, a quilometragem média anual percorrida por um motorista brasileiro foi de aproximadamente 12.900 km, o que equivale a uma média diária de 35,34 km. Esse valor serviu como base para calcular o consumo diário médio de eletricidade por veículo elétrico (XCOM AGÊNCIA DE COMUNICAÇÃO, 2019).

Além de modelar a demanda de energia elétrica para o carregamento das baterias, conforme descrito anteriormente, será realizada uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos EVs no contexto brasileiro, com foco nos PHEVs e BEVs. A ACV seguirá as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044, contemplando as seguintes etapas:

- Definição de objetivo e escopo: serão definidos os objetivos, o sistema de produto, a unidade funcional, as fronteiras do sistema e as categorias de impacto a serem avaliadas, como mudanças climáticas, depleção de recursos, toxicidade humana, entre outras.
- Análise de inventário: serão coletados dados sobre as entradas (recursos, energia) e saídas (emissões, resíduos) de cada etapa do ciclo de vida dos EVs, desde a produção de matérias-primas até a disposição final. Serão utilizados dados secundários da literatura e, quando possível, dados primários da indústria nacional.
- Avaliação de impactos: os dados do inventário serão correlacionados às categorias de impacto selecionadas, utilizando métodos de avaliação de impacto consolidados.
- Interpretação: os resultados serão interpretados de forma a identificar os *hotspots* ambientais, avaliar a sensibilidade a premissas-chave e comparar o desempenho ambiental dos EVs com veículos convencionais, considerando diferentes cenários de uso e reciclagem das baterias.

5.3 AVALIAÇÃO INTEGRADA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS

Os resultados da ACV foram integrados aos resultados das simulações energéticas para uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais. Foram considerados não apenas as emissões da fase de uso, mas também os impactos incorporados na produção e descarte dos veículos e baterias. Análises de sensibilidade foram conduzidas para avaliar a influência de parâmetros-chave, como a intensidade de carbono da matriz elétrica, a eficiência dos veículos, e as taxas de reciclagem das matérias primas.

Para avaliar os impactos da integração dos EVs no sistema elétrico brasileiro serão analisados cenários com diferentes níveis de penetração, estimando a demanda adicional de energia, calculando o consumo diário por EVs e multiplicando pelo número de unidades em cada cenário.

Após isso foi realizado uma análise da capacidade do sistema elétrico, comparando a demanda adicional com a capacidade disponível. Os resultados permitirão identificar potenciais gargalos e necessidades de reforços na infraestrutura. Essa abordagem permite uma avaliação inicial, mas possui limitações por desconsiderar aspectos dinâmicos e complexidades do sistema.

5.3.1 Objetivo e escopo da ACV

O objetivo da ACV, foi caracterizar as etapas do ciclo de vida dos veículos elétricos, do alumínio e lítio utilizados nos carros elétricos, desde a extração e produção desses metais até a destinação final e após o fim da vida útil do carro.

Se tratando do escopo da ACV, na fabricação dos EVs, o foco foi no alumínio e lítio, visto que, estes estão dentre as principais matérias-primas utilizadas durante a montagem de um veículo elétrico ou convencional.

5.3.1.1 Sistema de produto e fronteira do sistema

Visando simplificar a ACV e concentrar-se nos principais estágios e fluxos relevantes, foi feita uma delimitação no escopo, devido à escassez de informações disponíveis sobre todas as entradas e saídas do ciclo de vida analisado e para simplificação. Assim, o sistema do produto

considerado abrangendo a extração das matérias-primas, levando em conta o consumo de energia e o padrão de emissões da matriz elétrica brasileira, e a reciclagem.

5.3.1.2 Avaliação de impactos

Neste trabalho, foram consideradas apenas as variáveis de impacto: potencial de aquecimento global, que será medido em gás carbônico equivalente (CO_2e), para todas as emissões atmosféricas e geração de resíduos.

5.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este estudo apresenta limitações significativas ao não abordar os impactos ambientais que ocorrem durante a fase de distribuição. Além disso, não foram considerados impactos indiretos importantes, como o tratamento e a disposição de resíduos sólidos e esgoto gerados ao longo do processo. Outra restrição importante do estudo é que, na fase de destinação final, ele se concentra exclusivamente na reciclagem, deixando de lado outras formas de disposição que também podem ter relevância ambiental.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas etapas anteriores serão analisados de forma integrada, buscando identificar os principais desafios e oportunidades da inserção dos EVs no contexto brasileiro. Serão discutidas as implicações para o planejamento e operação do sistema elétrico, bem como para políticas públicas de mobilidade sustentável. Por fim, serão apresentadas as conclusões do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

Através dessa metodologia, espera-se obter uma visão abrangente e fundamentada dos potenciais impactos da adoção de EVs no Brasil, fornecendo subsídios relevantes para a tomada de decisão dos agentes envolvidos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar os impactos ambientais causados e o consumo de energia usado pelos EVs foram consideradas as seguintes etapas: projeção da tendência de produção de carros elétricos no Brasil divididos em três cenários e a ACV do alumínio e lítio, por serem as matérias primas mais utilizadas para a fabricação de EVs e das baterias de íon-lítio, respectivamente, ACV e

processo de reciclagem dos EVs, os impactos dos EVs no sistema elétrico e a matriz energética brasileira.

6.1 PROJEÇÃO DOS CENÁRIOS

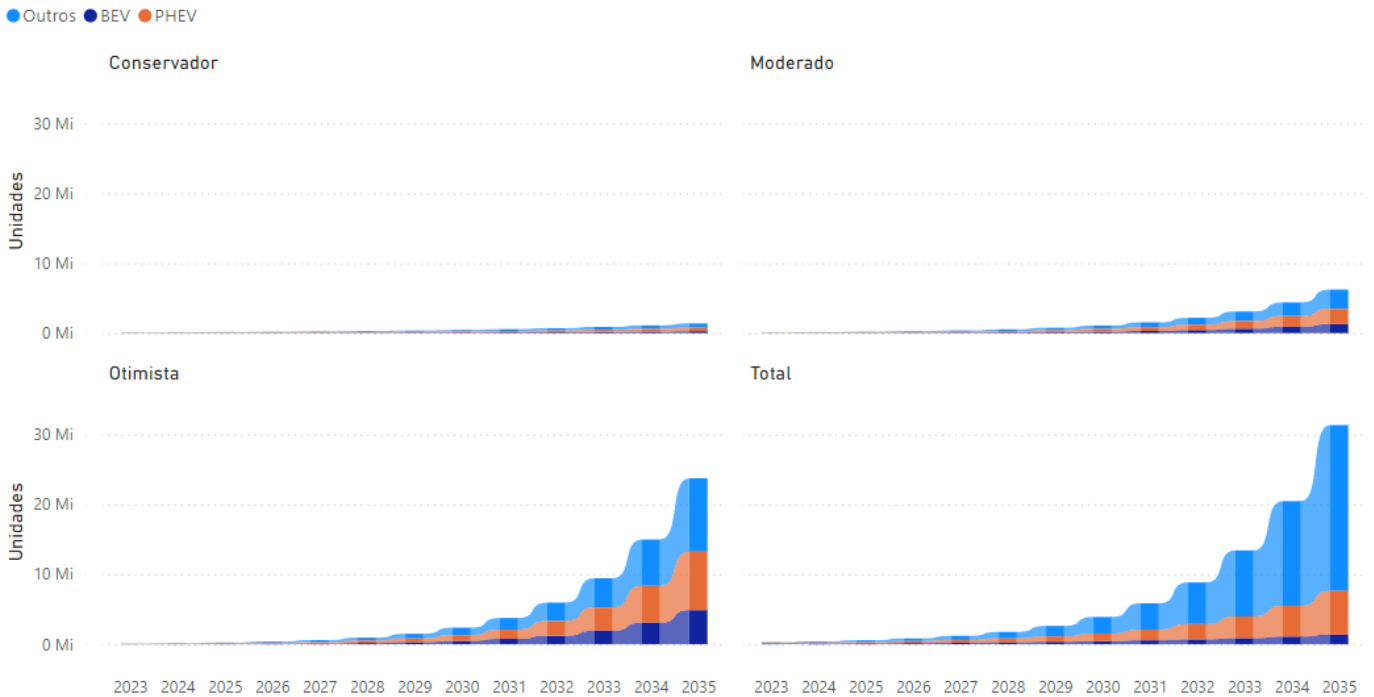
Utilizando a equação (1) para o cálculo do CAGR, obteve-se uma taxa de crescimento anual de aproximadamente 83,68%, demonstrado na equação (3):

$$\begin{aligned} CAGR &= \left(\frac{93927}{117}\right)^{\frac{1}{11}} - 1 \\ CAGR &= (802,794)^{\frac{1}{11}} - 1 \\ CAGR &= 83,68\% \end{aligned} \tag{3}$$

Dessa forma, calculando as CAGRs dos cenários propostos, na equação (4):

$$\begin{aligned} CAGR_{conservador} &= 30\% * 83,68\% \\ CAGR_{conservador} &= 25,10\% \\ CAGR_{moderado} &= 50\% * 83,68\% \\ CAGR_{moderado} &= 41,84\% \\ CAGR_{otimista} &= 70\% * 83,68\% \\ CAGR_{otimista} &= 58,57\% \end{aligned} \tag{4}$$

Figura 2 - Projeção das vendas de Veículos Elétricos (EV) de 2023 até 2035.



Fonte: Autoria própria.

Estes cenários, evidenciados na Figura 2 e nas Tabelas 4, 5 e 6, ajudam a visualizar possíveis futuros para a penetração de veículos elétricos no Brasil, influenciados por uma variedade de fatores econômicos, tecnológicos e políticos. A realização de qualquer um desses cenários dependerá significativamente das políticas adotadas pelos governos e da resposta do mercado e dos consumidores às tecnologias de veículos elétricos.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se que a frota de EVs no Brasil deve ultrapassar 1 milhão de unidades até 2030 (CESAR, 2023), dito isso, o cenário moderado é o que mais se aproxima da estimativa da EPE.

Tabela 5 - Projeção das vendas de Veículos Elétricos (EV) de 2023 até 2035.

Ano	Conservador	Moderado	Otimista
2023	93.927	93.927	93.927
2024	117.506	133.225	148.944
2025	147.003	188.964	236.186
2026	183.906	268.024	374.529
2027	230.072	380.161	593.906
2028	287.827	539.215	941.781
2029	360.080	764.814	1.493.419
2030	450.472	1.084.801	2.368.173
2031	563.554	1.538.666	3.755.306
2032	705.024	2.182.422	5.954.937
2033	882.007	3.095.515	9.442.979
2034	1.103.418	4.390.634	14.974.105
2035	1.380.411	6.227.611	23.745.031

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Projeção de Vendas de Veículos Híbridos *Plug-in* (PHEV) 2023 até 2035.

Ano	Conservador	Moderado	Otimista
2023	33.049	33.049	33.049
2024	41.344	46.877	52.406
2025	51.722	66.490	83.100
2026	64.704	94.309	131.771
2027	80.945	133.768	208.950
2028	101.262	189.737	331.332
2029	126.678	269.123	525.393
2030	158.475	381.724	833.116
2031	198.252	541.437	1.321.072
2032	248.013	767.975	2.094.824
2033	310.264	1.089.295	3.321.763
2034	388.140	1.545.056	5.267.319
2035	485.564	2.191.508	8.352.388

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Projeção de Vendas de Veículos Elétricos a Bateria (BEV) 2023 até 2035.

Ano	Conservador	Moderado	Otimista
2023	19.310	19.310	19.310
2024	24.157	27.389	30.620
2025	30.220	38.849	48.554
2026	37.805	55.103	76.992
2027	47.295	78.159	122.086
2028	59.166	110.860	193.592
2029	74.016	157.244	306.979
2030	92.594	223.035	486.776
2031	115.835	316.353	771.881
2032	144.910	448.715	1.223.972
2033	181.282	636.458	1.940.853
2034	226.784	902.752	3.077.610
2035	283.707	1.280.463	4.880.166

Fonte: Autoria própria.

6.2 ESTIMATIVA DE DEMANDA ADICIONAL DE ENERGIA

Utilizando os dados coletados pelo Inmetro (2024), foi possível calcular o consumo diário médio de eletricidade para cada tipo de EV conforme a equação (5):

$$\begin{aligned}
 PHEV: 35,34 \text{ km} \div 4,5 \text{ km/kWh} &= 7,85 \text{ kWh/dia} \\
 BEV: 35,34 \text{ km} \div 7,5 \text{ km/kWh} &= 4,71 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Com base nas projeções de adoção de EVs no Brasil para 2030, considerando três cenários distintos (conservador, moderado e otimista), a demanda adicional total de energia pode ser estimada conforme as equações (6), (7) e (8):

a) Cenário Conservador

$$\begin{aligned}
 PHEV: 7,85 \text{ kWh/dia} \times 158.475 \text{ VEs} &= 1.244.028,75 \text{ kWh/dia} \\
 BEV: 4,71 \text{ kWh/dia} \times 92.594 \text{ VEs} &= 436.117,74 \text{ kWh/dia} \\
 Total &= 1.680.146,49 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

b) Cenário Moderado

$$\begin{aligned}
 PHEV: & 12,18 \text{ kWh/dia} \times 381.724 \text{ VEs} = 2.996.533,40 \text{ kWh/dia} \\
 BEV: & 7,31 \text{ kWh/dia} \times 223.035 \text{ VEs} = 1.050.494,85 \text{ kWh/dia} \\
 Total & = 4.047.028,25 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

c) Cenário Otimista

$$\begin{aligned}
 PHEV: & 12,18 \text{ kWh/dia} \times 833.116 \text{ VEs} = 6.539.961,60 \text{ kWh/dia} \\
 BEV: & 7,31 \text{ kWh/dia} \times 486.776 \text{ VEs} = 2.292.714,96 \text{ kWh/dia} \\
 Total & = 8.832.676,56 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Além da demanda total, é importante considerar a distribuição dessa demanda ao longo do dia. Assumindo dois perfis de recarga - recarga noturna concentrada (70% da demanda) e recarga distribuída (30% da demanda), a demanda adicional pode ser dividida como é mostrado nas equações (9), (10) e (11):

a) Cenário Conservador

$$\begin{aligned}
 \text{Recarga noturna concentrada: } & 1.680.146,49 \text{ kWh/dia} \times 70\% \\
 & = 1.176.102,54 \text{ kWh/noite} \\
 \text{Recarga distribuída: } & 1.680.146,49 \text{ kWh/dia} \times 30\% \\
 & = 504.043,95 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

b) Cenário Moderado

$$\begin{aligned}
 \text{Recarga noturna concentrada: } & 4.047.028,25 \text{ kWh/dia} \times 70\% \\
 & = 2.832.919,78 \text{ kWh/noite} \\
 \text{Recarga distribuída: } & 4.047.028,25 \text{ kWh/dia} \times 30\% \\
 & = 1.214.108,48 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

c) Cenário Otimista

$$\begin{aligned}
 \text{Recarga noturna concentrada: } & 8.832.676,56 \text{ kWh/dia} \times 70\% \\
 & = 6.182.873,59 \text{ kWh/noite} \\
 \text{Recarga distribuída: } & 8.832.676,56 \text{ kWh/dia} \times 30\% \\
 & = 2.649.802,97 \text{ kWh/dia}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Esses cálculos fornecem uma estimativa da demanda adicional diária de energia para cada cenário em 2030, considerando diferentes perfis de recarga. No entanto, é importante ressaltar que essas estimativas são baseadas em médias e premissas simplificadas, e a demanda real pode variar dependendo de diversos fatores, como comportamento do usuário, infraestrutura de recarga disponível, políticas de incentivo à adoção de EVs e avanços tecnológicos que podem impactar a eficiência e capacidade das baterias ao longo do tempo.

Além disso, é fundamental que o planejamento energético do país leve em consideração essa demanda adicional, investindo na expansão e modernização da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como na promoção de fontes renováveis e na gestão inteligente da rede, de modo a garantir um suprimento confiável e sustentável para atender à crescente eletrificação do setor de transportes.

6.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

6.3.1 Produção do veículo

A produção de veículos *plug-in* demanda uma quantidade significativamente maior de metais e minerais em comparação com veículos com Motor a Combustão Interna (MCI). Conforme as Tabelas 7 e 8 e a Figura 3 evidenciam, a fabricação de um veículo *plug-in* requer cerca de 3 vezes mais alumínio, 9,75 vezes mais cobre e quantidades substanciais de terras raras e outros metais críticos (ORTEGO et al., 2020).

Tabela 8 – Média de demanda dos principais metais por tipo de veículo (kg/veículo).

	MCI Diesel	MCI Gasolina	PHEV	BEV
Alumínio	61,103	78,343	141,37	200
Cobre	15,584	15,376	59,166	150
Ferro	701,095	653,524	806,14	746,945
Cobalto	0,00972	0,00806	2,712	9,33
Lítio	0,02206	0,00463	2,242	7,709
Níquel	1,59	2,993	16,04957	55,724

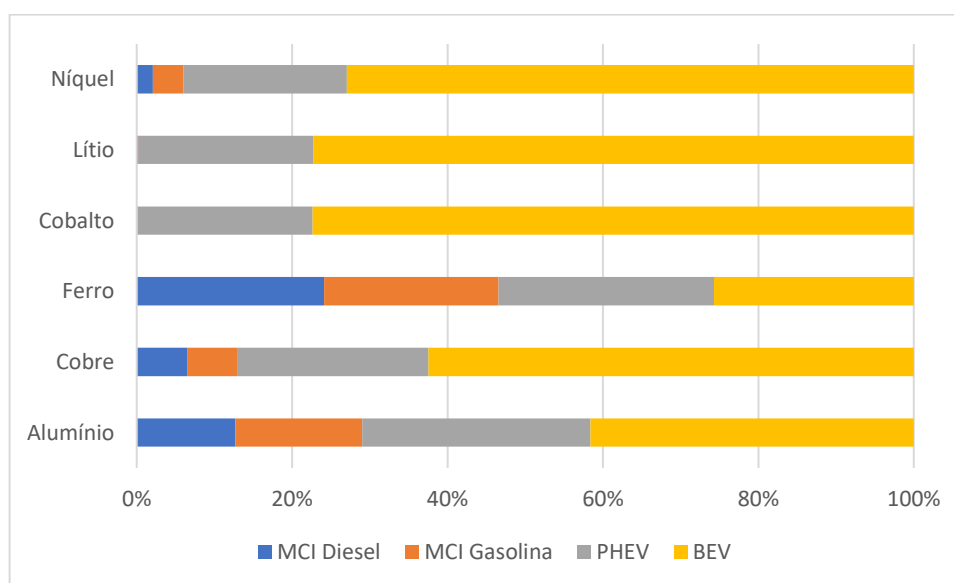
Fonte: Adaptado de Ortego et al. (2020).

Tabela 9 - Média de demanda de terras raras por tipo de veículo (g/veículo).

Terras Raras	MCI Diesel	MCI Gasolina	PHEV	BEV
Neodímio	23,71	18,84	552,79	749,30
Praseodímio	0,066	0,08	51,48	98,00
Terbio	0,01	0,02	13,62	26,93

Fonte: Adaptado de Ortego et al. (2020).

Figura 3 - Comparação da quantidade de metais necessários para a fabricação de cada tipo de veículo.



Fonte: Adaptado de Ortego et al. (2020).

Essa maior demanda por recursos minerais está associada principalmente aos componentes elétricos e eletrônicos dos veículos, como motores, baterias, sistemas de controle e cabeamento (SILVA et al., 2019). A extração desses materiais pode gerar impactos ambientais significativos, como degradação do solo, poluição da água, geração de resíduos e emissões de GEE.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar das maiores emissões durante a fase de

produção, os veículos *plug-in* tendem a compensar essas emissões adicionais ao longo de sua vida útil devido à reduzida ou ausência de emissões diretas durante a operação e à possibilidade de usar energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Assim, quando considerado o ciclo de vida completo, os veículos *plug-in* geralmente apresentam um perfil de emissão de GEE significativamente menor em comparação com os veículos convencionais (CARDOSO CHRISPIM; FERNANDES TORRES DE SOUZA; FELIPE SIMÕES, 2019).

6.3.1.1 Etapa de extração e produção do Alumínio e lítio

De acordo com Garret (2004), Messerli et al. (1997), Stern (2006) e Jiang et al. (2020) citado por Freitas e Marchesini (2022), levando em conta a mineração, o transporte e os processos de calcinação a cada tonelada de carbonato de lítio refinado produzido, são necessários 3,83 kWh de energia elétrica, gerando 115,041 kg de resíduos e 0,36 kg de gás carbônico equivalente (CO₂e).

Já para a produção de alumínio, segundo o estudo realizado por Hong (2012), citado por Lemos (2019), para o refinamento de uma tonelada de alumínio primário, considerando o transporte de uma mina localizada a uma distância de 40 km de uma refinaria, é necessário 15.100 kWh para cada tonelada de alumínio primário, gerando 13,22 kg de resíduos e 18.400 kg de CO₂ (LEMOS, 2019).

Em contrapartida, o alumínio secundário que é obtido através da reciclagem, necessita de apenas 2016 kWh/t, com 2270 kg de CO₂/t gerados. Além disso o alumínio obtido por esse processo não gera resíduos, como visto na Tabela 9 (LEMOS, 2019).

Tabela 10 - Uso de recursos/emissões de poluentes por tonelada.

Metais	Consumo Energético (kWh)	GEE (kg CO₂)	Resíduos Gerados (kg)
Alumínio Primário	15.100	18.400	13,220
Alumínio Secundário	2.016	2.270	0
Lítio	3,830	0,360	115,041

Fonte: Adaptado de Freitas e Marchesini (2022) e Lemos (2019).

6.3.1.2 Emissão de Gases do Efeito Estufa e geração de resíduos

Atualmente, não existe a produção local de PHEVs e BEVs no Brasil, entretanto de acordo com as projeções de uma das maiores montadoras de veículos da China, a GWM (*Great Wall Motors*), a produção de carros elétricos no Brasil pode se tornar viável a partir do fim de

2025, quando a montadora espera que o volume de PHEVs e BEVs atinja 5% do mercado brasileiro (TRINDADE, 2023).

Dito isso, é possível realizar um estudo aplicado ao cenário de produção de veículos *plug-in* no Brasil. Mediante os dados obtidos através da ABVE e da ACV, é possível calcular o quanto a produção dos PHEVs e BEVs vendidos em 2023 emitiria de CO₂e e geraria de resíduos quanto ao uso do alumínio e lítio, caso fosse produzido no Brasil e considerando a produção primária de ambos os metais. O cálculo é demonstrado pelas equações (12), (13), (14) e (15), onde se considera que em média seja utilizado 141,37 kg de alumínio e 2,242 kg de lítio por PHEV fabricado e 200 kg de alumínio e 7,709 kg de lítio por BEV fabricado.

a) PHEV

$$Al_{total} = 33.049 (un.) \times 141,37 (kg Al/un.)$$

$$Al_{total} = 4.672,137 t$$

$$Li_{total} = 33.049 (un.) \times 2,242 (kg Li/un.)$$

$$Li_{total} = 74,096 t$$

$$CO_{2Al} = 4.672,137 t \times 18.400 (kg CO_2/t)$$

$$CO_{2Al} = 85.967,323 t$$

(12)

$$CO_{2eLi} = 74,096 t \times 0,36 (kg CO_2/t)$$

$$CO_{2eLi} = 0,027 t$$

$$CO_{2eTotal} = 85.967,323 t + 0,027 t$$

$$CO_{2eTotal} = 85.967,350 t$$

$$Resíduos = Resíduos_{Al} + Resíduos_{Li}$$

$$Resíduos = (4.672,137 t \times 13,22 (kg/t)) + (74,096 \times 115,041 (kg/t))$$

$$Resíduos = 61,766 t + 8,524 t$$

$$Resíduos = 70,290 t$$

(13)

b) BEV

$$Al_{total} = 19.310 (un.) \times 200 (kg Al/un.)$$

$$Al_{total} = 3.862,000 t$$

$$Li_{total} = 19.310 (un.) \times 7,709 (kg Li/un.)$$

$$Li_{total} = 148,861 t$$

$$CO_{2Al} = 3.862,000 t \times 18.400 (kg CO_2/t)$$

$$CO_{2Al} = 71.060,800 t$$

(14)

$$CO_{2eLi} = 148,861 t \times 0,36 (kg CO_2/t)$$

$$CO_{2eLi} = 0,054 t$$

$$CO_{2eTotal} = 71.060,800 t + 0,054 t$$

$$CO_{2eTotal} = 71.060,854 t$$

$$Resíduos = Resíduos_{Al} + Resíduos_{Li}$$

$$Resíduos = (3.862,000 t \times 13,22 (kg/t)) + (148,861 \times 115,041 (kg/t))$$

$$Resíduos = 51,056 t + 17,125 t$$

$$Resíduos = 68,181 t$$

(15)

Logo, foi possível determinar que em 2023, os veículos *plug-in* vendidos foram responsáveis pela emissão de cerca de 157.028,203 toneladas de CO₂e e 138,470 toneladas de resíduos, sendo 85.967,350 toneladas de CO₂e e 70,290 toneladas de resíduos resultado da manufatura dos PHEV e 71.060,854 toneladas de CO₂e e 68,181 toneladas de resíduos da manufatura dos BEV.

Já em 2030, com base nos resultados na Tabela 10, é possível observar que tanto os PHEVs quanto os BEVs terão um aumento significativo no consumo de alumínio e lítio, bem como na emissão de CO₂e e geração de resíduos até 2030.

Tabela 11 - Consumo de alumínio, lítio e emissões de GEE em toneladas para produção de PHEV e BEV em 2030 sob diferentes cenários.

2030 - PHEV	Conservador	Moderado	Otimista
Alumínio	22.403,611	53.964,322	117.777,609
Lítio	355,301	855,825	1.867,846
CO ₂ Al	263.403,524	493.545,402	861.863,449
CO ₂ e Li	0,082	0,153	0,267
Resíduos Al	189,250	354,602	619,230
Resíduos Li	26,118	48,937	85,458
CO ₂ e Total	263.403,606	493.545,555	861.863,716
Resíduos Totais	215,367	403,539	704,688
2030 - BEV			
Alumínio	18.518,800	44.607,000	97.355,200
Lítio	713,807	1.719,377	3.752,556
CO ₂ Al	340.745,920	820.768,800	1.791.335,680
CO ₂ e Li	0,257	0,619	1,351
Resíduos Al	244,819	589,705	1.287,036
Resíduos Li	82,117	197,799	431,698
CO ₂ e Total	340.746,177	820.769,419	1.791.337,031
Resíduos Totais	326,936	787,503	1.718,734

Fonte: Autoria própria.

Comparando os cenários conservador, moderado e otimista, nota-se um aumento substancial no consumo de alumínio e lítio em ambos os tipos de veículos. No cenário otimista, o consumo de alumínio pode chegar a 117.777,609 toneladas para PHEVs e 97.355,200 toneladas para BEVs. Já o consumo de lítio pode atingir 1.867,846 toneladas em PHEVs e 3.752,556 toneladas em BEVs. Esses números indicam uma crescente demanda por esses recursos, o que pode gerar preocupações quanto à disponibilidade e sustentabilidade da extração desses materiais.

Em relação às emissões de CO₂, os resultados mostram um impacto significativo, especialmente no cenário otimista, com emissões totais de 861.863,716 toneladas para PHEVs e 1.791.337,031 toneladas para BEVs. Embora os veículos elétricos sejam frequentemente considerados uma solução mais ecológica, é importante considerar as emissões indiretas associadas à produção de baterias e outros componentes. Além disso, a geração de eletricidade utilizada para carregar esses veículos também pode contribuir para as emissões de CO₂, dependendo da matriz energética de cada país.

Outro aspecto preocupante é a geração de resíduos, que pode atingir 704,688 toneladas para PHEVs e 1.718,734 toneladas para BEVs no cenário otimista. O descarte adequado e a reciclagem de baterias de lítio e outros componentes serão essenciais para mitigar o impacto ambiental desses veículos ao final de sua vida útil.

Esses resultados ressaltam a necessidade de uma abordagem holística na transição para

a mobilidade elétrica, considerando não apenas as emissões diretas dos veículos, mas também os impactos ambientais e sociais associados à mineração de lítio, produção de baterias e descarte de resíduos. Políticas públicas, investimentos em tecnologias de reciclagem e uma maior conscientização sobre o ciclo de vida completo desses veículos serão fundamentais para garantir uma transição sustentável para a eletrificação do transporte.

6.3.2 Fase de uso do veículo

No contexto brasileiro, a maior participação de fontes renováveis na matriz elétrica, como hidrelétricas, eólicas e solar, faz com que as emissões indiretas dos veículos elétricos, associadas à geração de eletricidade, sejam menores comparadas a países com matrizes mais poluentes. Ainda assim, é importante considerar que o aumento da demanda por energia para carregar as baterias pode requerer a expansão da capacidade de geração, com possíveis impactos socioambientais localizados.

Outro aspecto relevante é a eficiência energética. Motores elétricos conseguem aproveitar melhor a energia armazenada nas baterias do que motores a combustão aproveitam a energia dos combustíveis fósseis. Isso se traduz em menores custos por quilômetro rodado. No entanto, o preço inicial mais alto dos veículos elétricos e questões de autonomia e infraestrutura de recarga ainda são barreiras para uma adoção mais ampla no Brasil.

6.3.3 Fim de vida

Ao final de sua vida útil, os EVs apresentam desafios relacionados principalmente ao descarte e reciclagem das baterias de íon-lítio. Essas baterias contêm metais pesados e substâncias tóxicas que podem contaminar solo e água se não forem corretamente destinadas. O estabelecimento de uma cadeia de logística reversa e reciclagem é fundamental para mitigar esses riscos e recuperar materiais valiosos como lítio, cobalto e níquel. O Brasil ainda carece de regulamentações específicas e de uma infraestrutura robusta para lidar com o volume crescente de baterias a serem descartadas.

Iniciativas de reutilização das baterias em sistemas estacionários de armazenamento de energia podem prolongar sua vida útil e adiar a necessidade de reciclagem. Após perderem capacidade para uso veicular, as baterias ainda mantêm 70-80% da capacidade original, sendo adequadas para aplicações secundárias (FREITAS; MARCHESINI, 2022).

Além das baterias, a reciclagem de outros componentes dos veículos elétricos, como

motores, eletrônica e materiais leves da carroceria, também deve ser considerada em políticas de gestão de resíduos, buscando aumentar a circularidade e reduzir a demanda por extração de novos recursos naturais.

6.3.4 Reciclagem do veículo

A reciclagem dos veículos elétricos ao fim de sua vida útil é um aspecto fundamental para a sustentabilidade dessa tecnologia. Dois componentes de grande relevância nesse processo são o alumínio e o lítio presentes nesses veículos.

Como já visto anteriormente, o alumínio é amplamente utilizado nos veículos elétricos devido à sua baixa densidade e boa resistência mecânica, contribuindo para a redução de peso e aumento da eficiência energética. Porém, uma análise considerando a reciclagem pela indústria automotiva para a fabricação de veículos elétricos *plug-in*, fornece resultados diferentes.

O alumínio secundário, obtido através da reciclagem, necessita de apenas 2016 kWh de energia elétrica para cada tonelada produzida e emite apenas cerca de 2.270 kg de CO₂/t. Além disso, alumínios de origem secundária não geram resíduos. Aplicando estes valores para o ano de 2023 temos os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 12 - Consumo de alumínio secundário, energia e emissões de GEE para produção PHEV e BEV em 2023.

	PHEV	BEV	Total
Alumínio (t)	4.672,137	4.672,151	9.344,288
Consumo Energético (MWh)	9.419,028	9.419,057	18.838,085
CO2 Al (t)	10.605,751	10.605,783	21.211,535

Fonte: Autoria própria.

Ao utilizar alumínio secundário, proveniente da reciclagem, é possível alcançar uma emissão de apenas 21.211,535 toneladas de CO₂. Este valor representa uma redução significativa de aproximadamente 86,49% nas emissões de GEE, quando comparado à produção de alumínio primário a partir da extração de bauxita.

Além da expressiva mitigação das emissões, o uso de alumínio reciclado também proporciona uma economia notável no consumo energético. A produção secundária demanda somente 18.838,085 MWh, uma quantidade consideravelmente menor em relação aos 141.098,755 MWh requeridos na produção primária. Essa redução de 86,65% no consumo de

energia elétrica não apenas diminui a pressão sobre o sistema elétrico, como também contribui para a conservação de recursos naturais.

Esses dados evidenciam o papel fundamental da reciclagem do alumínio na transição para uma economia de baixo carbono e no uso eficiente de recursos. Ao fechar o ciclo do alumínio, prolongando sua vida útil através da reciclagem, é possível obter ganhos ambientais e energéticos expressivos, contribuindo para a sustentabilidade da indústria automotiva e para o cumprimento das metas climáticas globais

No entanto, para viabilizar a reciclagem eficiente do alumínio nos veículos elétricos, é necessário o desenvolvimento de sistemas de coleta e separação adequados, bem como tecnologias de reciclagem que permitam a recuperação do metal com alta pureza.

Já o lítio, elemento chave nas baterias de íon-lítio que equipam a maioria dos EVs, requer atenção especial no processo de reciclagem. Com a crescente demanda por esses veículos, a recuperação do lítio torna-se estratégica para evitar futura escassez desse recurso e reduzir a dependência de sua mineração. Tecnologias de reciclagem de baterias de lítio vêm sendo aprimoradas, permitindo a recuperação do metal com alta pureza para reinserção na cadeia produtiva.

Porém, o processo de reciclagem das baterias de íon-lítio também gera resíduos significativos que ultrapassam a quantidade de resíduos gerada no processo de extração do próprio lítio. Segundo Freitas e Marchesini (2022). Esses números evidenciam a necessidade de desenvolvimento de tecnologias e processos mais eficientes e limpos para a reciclagem das baterias, visando minimizar os impactos ambientais associados.

6.4 ANÁLISE DA CAPACIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO E NA MATRIZ DE GERAÇÃO

A inserção massiva de veículos elétricos na frota brasileira trará impactos significativos tanto na capacidade do sistema elétrico quanto na matriz de geração de energia do país.

Em relação à capacidade do sistema, os resultados obtidos na seção 5.4 mostram que, em 2030, a demanda adicional de energia elétrica devido à recarga dos veículos pode variar de 1.680,15 MWh/dia no cenário conservador, até 8.832,68 MWh/dia no cenário otimista. De acordo com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) em maio de 2024 é de 221.621 MW, com previsão de expansão para 254.341 MW até dezembro de 2028, conforme detalhado na Tabela 13.

Tabela 13 - Evolução da capacidade instalada no SIN - maio 2024/ dezembro 2028 (MW).

2024		
Fonte	Capacidade	Participação
Hidrelétrica	108.035	48,75%
Term. Gás + GNL	17.022	7,68%
MMGD	28.845	13,02%
Term. Óleo + Diesel	3.429	1,55%
Biomassa	15.831	7,14%
Eólica	30.295	13,67%
Term. Carvão	3.017	1,36%
Solar	13.041	5,88%
Nuclear	1.990	0,90%
Outras	116	0,05%
<i>Total</i>	221.621	100,00%
2028		
Fonte	Capacidade	Participação
Hidrelétrica	108.682	42,73%
Term. Gás + GNL	21.541	8,47%
MMGD	41.159	16,18%
Term. Óleo + Diesel	3.760	1,48%
Biomassa	16.960	6,67%
Eólica	35.298	13,88%
Term. Carvão	3.017	1,19%
Solar	21.605	8,49%
Nuclear	1.990	0,78%
Outras	329	0,13%
<i>Total</i>	254.341	100,00%

Fonte: ONS (2024).

Considerando a capacidade instalada prevista para 2028 de 254.341 MW, a demanda adicional dos veículos elétricos representaria de 0,66% (cenário conservador) a 3,47% (cenário otimista) da capacidade total. Embora pareçam percentuais pequenos, é importante considerar que essa demanda tende a se concentrar nos horários de pico, sobrecarregando o sistema justamente no momento de maior consumo.

No cenário otimista, por exemplo, a demanda de recarga noturna em 2030 seria de 6.182,87 MWh, o que exigiria um acréscimo de capacidade de ponta de cerca de 2,43% em relação à prevista para 2028. Isso demandaria investimentos significativos em expansão da geração, transmissão e distribuição.

Além disso, a natureza intermitente da recarga dos veículos elétricos pode trazer desafios adicionais para a operação do sistema, exigindo maior flexibilidade e capacidade de regulação para equilibrar oferta e demanda em tempo real.

Os veículos elétricos não possuem um padrão fixo de recarga, podendo se conectar à

rede em diferentes horários e locais, dependendo do comportamento do usuário. Essa imprevisibilidade na demanda pode gerar desequilíbrios momentâneos entre geração e consumo, exigindo uma resposta rápida do operador do sistema para manter a estabilidade e a qualidade do fornecimento.

Para lidar com essa variabilidade, o sistema elétrico precisará se tornar mais flexível e inteligente, com maior capacidade de monitoramento e controle em tempo real. Tecnologias como redes inteligentes (*smart grids*), medidores inteligentes e sistemas de gerenciamento da demanda serão fundamentais para otimizar o uso da infraestrutura e evitar sobrecargas (SALDANHA, 2017).

Já em relação à matriz de geração, a eletrificação da frota veicular representa uma oportunidade para aumentar a participação de fontes renováveis, especialmente a solar e eólica. De acordo com as projeções do ONS, essas fontes devem aumentar sua participação na capacidade instalada de 19,6% em 2024 para 22,4% em 2028.

Atualmente, a matriz elétrica brasileira já é uma das mais limpas do mundo, com grande participação de fontes renováveis, com destaque para a hidroeletricidade. No entanto, para acomodar a demanda adicional dos veículos elétricos sem aumentar as emissões de gases de efeito estufa, será necessário expandir ainda mais a geração renovável.

Nesse sentido, as fontes solar e eólica despontam como alternativas promissoras, dada a queda nos custos e o grande potencial disponível no país (DE BRITO; TEIXEIRA; DE SOUZA, 2023). A energia eólica, que em 2024 responde por 13,67% da capacidade instalada, deve chegar a 13,88% em 2028, atingindo 35.298 MW. Já a energia solar deve apresentar um crescimento ainda mais expressivo, saltando de 5,88% em 2024 para 8,49% em 2028, com 21.605 MW instalados.

Esse aumento da participação das fontes eólica e solar é fundamental para acomodar de forma sustentável a demanda adicional dos veículos elétricos. Por serem fontes renováveis e não emitirem gases de efeito estufa durante a operação, elas contribuem para a descarbonização tanto do setor elétrico quanto de transportes. Além disso, a geração distribuída a partir de sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais pode ser integrada à recarga dos veículos, promovendo um modelo ainda mais descentralizado e resiliente. Os próprios consumidores poderiam gerar parte da energia para abastecer seus veículos, reduzindo a pressão sobre o sistema.

No entanto, para que esse potencial se concretize, serão necessários investimentos não apenas na expansão da capacidade de geração renovável, mas também no reforço das redes de transmissão e distribuição, na modernização da infraestrutura com redes inteligentes e sistemas

de armazenamento, e em políticas de incentivo à geração distribuída.

Portanto, conclui-se que a inserção dos veículos elétricos trará desafios significativos para a capacidade e operação do sistema elétrico brasileiro, demandando investimentos expressivos em expansão e modernização da rede. Por outro lado, representa uma oportunidade para acelerar a transição para uma matriz mais limpa e renovável, com destaque para as fontes eólica e solar que devem aumentar sua participação nos próximos anos.

O planejamento integrado da eletrificação veicular e da expansão do setor elétrico será fundamental para garantir um suprimento confiável, sustentável e a custos competitivos nas próximas décadas. Nesse processo, as políticas públicas terão um papel crucial, criando um ambiente regulatório favorável, incentivos adequados e metas ambiciosas de descarbonização.

7 CONCLUSÃO

A produção de PHEVs e BEVs demanda uma quantidade significativamente maior de metais como alumínio, cobre e lítio em comparação com veículos de motor a combustão interna. Em 2023, a produção dos veículos *plug-in* vendidos no Brasil seria responsável pela emissão de cerca de 157.028 toneladas de CO₂e e 138.470 toneladas de resíduos, considerando apenas as matérias-primas de alumínio e o lítio. Até 2030, nos cenários projetados, as emissões de CO₂ e a geração de resíduos aumentariam substancialmente. No cenário otimista, poderiam chegar a 861.863 toneladas de CO₂ para PHEVs e 1.791.337 toneladas para BEVs, com geração de resíduos de 704.688 e 1.718.734 toneladas, respectivamente.

Entretanto, utilizando-se alumínio proveniente da reciclagem deste metal nos EVs, as emissões de GEE e o consumo de energia podem reduzir significativamente em comparação com o alumínio com origem de produção primária. Já a reciclagem das baterias de íon-lítio ainda gera um volume considerável de resíduos, não sendo tão interessante reutilizá-las em novos EVs.

Portanto, para maximizar a recuperação de materiais essenciais como alumínio e lítio, para novas baterias e EVs, tecnologias avançadas, como processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos, são fundamentais para aumentar a eficiência desse processo. Além disso, a promoção de uma economia circular abordando questões como incentivos, cadeia de suprimentos das baterias e logística reversa é fundamental, onde os materiais das baterias usadas são reintegrados na fabricação de novas baterias, reduzindo tanto a necessidade de novos materiais quanto o impacto ambiental associado à mineração, o mesmo se aplica para os metais utilizados nos EVs.

A demanda adicional de energia elétrica para carregar os veículos *plug-in*, especialmente se concentrada nos horários de pico, exigirá investimentos substanciais na expansão e modernização do sistema elétrico. Por outro lado, representa uma oportunidade para acelerar a transição para uma matriz mais renovável, com destaque para as fontes eólica e solar. A inserção dos EVs trará desafios relevantes para a capacidade e operação do sistema elétrico brasileiro, demandando planejamento integrado e investimentos.

No que diz respeito à gestão da demanda de energia, a implementação de tarifas dinâmicas pode incentivar a recarga de veículos elétricos fora dos horários de pico, utilizando um sistema de preços que se ajusta em tempo real com base na demanda de energia. Investimentos em tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de grande escala e sistemas térmicos, também são cruciais para equilibrar a rede elétrica ao armazenar e liberar energia conforme necessário.

A integração mais eficiente de fontes renováveis, como energia solar e eólica, desempenha um papel importante na redução da dependência de combustíveis fósseis. Isso pode ser alcançado através da expansão da capacidade instalada dessas fontes e da promoção da geração distribuída, incentivando a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências e empresas. O hidrogênio verde emerge como uma promissora forma de armazenamento de energia e combustível limpo para veículos, produzido através da eletrólise da água com eletricidade renovável.

Já os desafios técnicos incluem a necessidade de expansão e modernização da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para suportar a demanda adicional gerada pelos EVs. A integração de tecnologias como redes inteligentes e sistemas de gerenciamento da demanda será fundamental para otimizar o uso da infraestrutura e evitar sobrecargas.

Em relação à infraestrutura de recarga, é fundamental desenvolver uma rede abrangente de estações públicas acessíveis, incluindo carregadores rápidos em locais estratégicos para facilitar o carregamento urbano e rural. Incentivos para a instalação de estações de recarga domésticas também são recomendados, visando a recarga durante os períodos de menor demanda.

Por fim, políticas governamentais como subsídios para EVs, que podem incluir incentivos fiscais, isenção de impostos e programas de troca de veículos antigos por novos elétricos e regulamentações rigorosas sobre as emissões de GEE de veículos são essenciais para acelerar a transição para EVs e reduzir a dependência de veículos de combustão interna.

A transição para a mobilidade elétrica no Brasil é um processo complexo que envolve desafios técnicos, econômicos e ambientais. No entanto, com o planejamento adequado e a

implementação de políticas públicas eficazes, é possível maximizar os benefícios dessa tecnologia e minimizar seus impactos negativos. A eletrificação da frota veicular brasileira pode contribuir significativamente para a descarbonização do setor de transportes, a melhoria da qualidade do ar e a promoção de uma economia mais sustentável e resiliente.

Logo, para que o potencial dos veículos elétricos se concretize, é fundamental que políticas públicas e estratégias empresariais abordem questões como o preço dos veículos, a infraestrutura de recarga, a integração com fontes renováveis, a cadeia de suprimentos das baterias e a logística reversa. Incentivos fiscais, subsídios e programas de financiamento podem tornar os EVs mais acessíveis aos consumidores. Além disso, investimentos em infraestrutura de recarga, tanto em áreas urbanas quanto rurais, são cruciais para garantir a conveniência e a viabilidade do uso de EVs.

Pesquisas futuras podem contemplar outras categorias de impacto e aplicações específicas, além da demanda de energia primária, do potencial de aquecimento global e da depleção abiótica abordados neste estudo. Análises regionalizadas, considerando a variabilidade espacial da matriz elétrica brasileira, também são oportunas. Além disso, estudos sobre a viabilidade econômica e os impactos sociais da adoção de EVs no Brasil podem fornecer *insights* valiosos para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Eletrificados crescem 145% no trimestre**. 8 abr. 2024. Disponível em: <https://abve.org.br/eletrificados-crescem-145-no-trimestre-e-tem-segundo-melhor-mes-da-historia/>. Acesso em: 11 fev. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Eletrificados: bom começo de ano e BEVs em alta**. 4 fev. 2022. Disponível em: <https://abve.org.br/eletrificados-bom-comeco-de-ano-e-bevs-em-alta/>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil**: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade. 2012. reponame:Repositório Institucional do BNDES, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/10634>. Acesso em: 28 jul. 2022.
- BRITO, E. S. M.; TEIXEIRA, T.; DE SOUZA, F. P. As potencialidades e os limites da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Contribuciones a las ciencias sociales**, v. 16, n. 9, p. 15663–15680, 15 set. 2023.
- CESAR, J. **Brasil terá mais de 1 milhão de carros elétricos em circulação em 2030**. 29 set. 2023. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/689209/brasil-governo-infraestrutura-carros-eletricos/>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- CHRISPIM, C. M.; SOUZA, J. F. T.; SIMÕES, a. F. Avaliação comparativa entre veículos elétricos e veículos convencionais no contexto de mitigação das mudanças climáticas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 127, 4 abr. 2019.
- DOSHI, T. **Os segredos “sujos” dos veículos elétricos limpos**. 5 ago. 2020. Disponível em: <https://forbes.com.br/escolhas-do-editor/2020/08/os-segredos-sujos-dos-veiculos-eletricos-limpos/>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- FITCH SOLUTIONS. **Brazil iron ore production to expand in coming years Despite Lower Prices**. 07 oct. 2021. Disponível em: <https://www.fitchsolutions.com/bmi/mining/brazil-iron-ore-production-expand-coming-years-despite-lower-prices-07-10-2021>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- FREITAS, F. T.; MARCHESINI, M. M. P. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos. **Produto & Produção**, v. 23, n. 3, p. 1–20, 23 dez. 2022.
- FU, X. *et al.* Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 5, p. 2985-2993, 19 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04975>. Acesso em: 8 jul. 2023.
- GERASHCHENKOVA, T. M.; DADYKIN, V. S. **Justification of optimum volumes of mining and reserves of iron ore for the sustainable development of enterprises of mineral raw material complex**. 2019 International Science and Technology Conference “EastConf”. **Anais...IEEE**, 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular**. Rio de Janeiro:

[s. n.], 2024. 11 p. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 24 maio 2024.

IRENA. **Electric Vehicles: technology brief**. Abu Dhabi: IRENA, 2017. 52 p. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2017/Feb/Electric-vehicles-Technology-brief>. Acesso em: 11 maio 2024.

ISIS. **Emissões do Brasil têm maior alta em 19 anos. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA)**, 1 nov. 2022. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/emissoes-do-brasil-tem-maior-alta-em-19-anos-20221101>>. Acesso em: 10 maio. 2024

JASKULA, B. W. **USGS - 2018 Minerals Yearbook**. [S. l.: s. n.], 2022. 11 p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol11/2018/myb1-2018-lithium.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2024.

LEMOS, Thiago Marandola. **Análise da reciclagem do alumínio no ciclo de vida dos automóveis: uma visão crítica da macroeconomia e sustentabilidade mundial**. 2019. 100 p. Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MARINO, E. et al. **Hydrogenetic Fe-Mn crusts from European seas: source of potentially economic cobalt mining.**, 23 mar. 2020. Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-22091.html>. Acesso em: 14 maio. 2023.

MATTEI, T. S; PARRÉ, J. L. PANORAMA DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO PARANÁ: POLÍTICAS E DESAFIOS PARA ENERGIAS ALTERNATIVAS. **Revista Faz Ciência**, v. 23, n. 38, 27 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/rfc.v23i38.26751>. Acesso em: 5 nov. 2022.

MUDD, G. M.; JOWITT, S. M. Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply. **Economic Geology**, v. 113, n. 6, p. 1235-1267, 1 set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4590>. Acesso em: 23 set. 2022.

ONOHARA, M. M. **Comparações entre a eficiência energética de carro elétrico e de carro à combustão: uma análise dos impactos socioambientais e financeiros**. Revista de Empreendedorismo e Gestão de Micro e Pequenas Empresas, v. 7, n. 01, p. 73–92, 30 abr. 2022.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numericos>. Acesso em: 9 maio 2024.

ORTEGO, A. *et al.* Assessment of strategic raw materials in the automobile sector. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104968, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104968>. Acesso em: 8 ago. 2022.

PEREIRA, L. C. **Estações de carregamento para carros elétricos alimentadas por usinas de microgeração fotovoltaica**. 2019. 70 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

REVISTA ALUMÍNIO. **Alumínio na rota da inovação automotiva**. 7 mar. 2024. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/aluminio-na-rota-da-inovacao-automotiva/>. Acesso em: 12 abr. 2024.

RICHARDSON, D. B. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 247-254, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>. Acesso em: 4 ago. 2022.

SACCHELLI. **A importância do aço na indústria automotiva - Sacchelli**. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/a-importancia-do-aco-na-industria-automotiva/>. Acesso em: 11 abr. 2024.

SALDANHA, J. J. A. **Gerenciamento inteligente da recarga de veículos elétricos otimizando a operação do sistema elétrico de potência**. 126 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

SANCHES, L. D. S. **Contexto energético da mobilidade individual urbana no Brasil: análise do ciclo de vida e avaliação do impacto ambiental de carros elétricos**. 2021. 112 p., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SANTOS, G. R. et al. O impacto da eletromobilidade: veículos elétricos, meio ambiente e a infraestrutura energética do Brasil. **South American Development Society Journal**, v. 7, n. 21, p. 238, 10 dez. 2021.

SILVA, N. F. S. *et al.* A importância da reciclagem na sustentabilidade de carros elétricos. **Conexão Ciência (Online)**, v. 14, n. 3, p. 9-18, 30 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.24862/cco.v14i3.1044>. Acesso em: 23 set. 2022.

TRINDADE, F. **GMW Brasil: produção de carros elétricos no Brasil será viável em 2026**. 21 set. 2023. Disponível em: <https://motor1.uol.com.br/news/687876/gwm-brasil-producao-carros-eletricos/>. Acesso em: 23 abril 2024.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Advance Data Release of the 2021 Annual Tables**. [S. l.: s. n.], 2023. 4 p.

VENANCIO, L. C. A.; RABELO, A. B. C.; CASTRO, J. C. Análise das alternativas para reciclagem de resíduo de bauxita na cadeia industrial de ferro e aço no Maranhão e Pará. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 4, p. e4349, 25 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n4-195>. Acesso em: 8 jul. 2024.

VONBUN, C. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: Uma revisão da literatura**. [s.l.] Texto para Discussão, 2015. Disponível em: <<https://www.econstor.eu/handle/10419/121613>>. Acesso em: 11 fev. 2024.

VOOLTA. **O papel das políticas governamentais na expansão do mercado de veículos elétricos**. 7 nov. 2023. Disponível em: <https://voolta.com.br/blog/impacto-politicas-governamentais-mercado-veiculos-eletricos-brasil/>. Acesso em: 11 fev. 2024.

WILSON, S.; HAMILTON, J. L. Fizzy ore processing sequesters CO₂ while supplying critical metals. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 39, p. e2212424119, 27 set. 2022. Acesso em: 12 abr. 2023

XCOM AGÊNCIA DE COMUNICAÇÃO. **Brasileiros rodam em média 12,9 mil Km no primeiro ano de uso de um veículo**. 8 abr. 2019. Disponível em: <https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/quanto-brasileiro-roda-carro-ano/?ID=1830>. Acesso em: 2 maio 2024.

ZUBI, G. *et al.* The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 292-308, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>. Acesso em: 2 ago. 2022.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Nordelöf, A. et al. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles - what can we learn from life cycle assessment?. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1866–1890, 2014.

Hall, D.; Lutsey, N. **Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure. Washington DC: The International Council on Clean Transportation**, 2017.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO MODELO PREDITIVO DESENVOLVIDO EM PYTHON

```
import pandas as pd
import numpy as np
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog

# Função para carregar o arquivo
def carregar_arquivo():
    root = tk.Tk()
    root.withdraw() # Esconde a janela principal do Tkinter
    caminho_arquivo = filedialog.askopenfilename()
    return caminho_arquivo

# Carregar o arquivo
caminho_arquivo = carregar_arquivo()
df = pd.read_csv(caminho_arquivo)

# Certificar-se de que as colunas necessárias estão presentes
if 'Ano' not in df.columns:
    raise ValueError("O arquivo deve conter a coluna 'Ano'. Certifique-se que as colunas estejam separadas por vírgula")
if 'BEV' not in df.columns:
    raise ValueError("O arquivo deve conter a coluna 'BEV'. Certifique-se que as colunas estejam separadas por vírgula.")
if 'PHEV' not in df.columns:
    raise ValueError("O arquivo deve conter a coluna 'PHEV'. Certifique-se que as colunas estejam separadas por vírgula.")

# Definir as taxas de crescimento para cada cenário

#cagr_acumulado = 0.8368
#cagr_conservador = 0.3 * cagr_acumulado
#cagr_moderado = 0.5 * cagr_acumulado
#cagr_otimista = 0.7 * cagr_acumulado

cagr_conservador = 0.2510
cagr_moderado = 0.4184
cagr_otimista = 0.5857

# Função para calcular as projeções de vendas
def calcular_projecoes(vendas, cagr, anos_projecao):
    vendas_ultimo_ano = vendas.iloc[-1]
    projecoes = []
    for _ in range(anos_projecao):
        vendas_projetadas = vendas_ultimo_ano * (1 + cagr)
```

```
    projecoes.append(vendas_projetadas.round(0).astype(int))
    vendas_ultimo_ano = vendas_projetadas
    return projecoes

# Calcular as projeções para cada cenário
anos_projecao = 12 # Até 2035
projecoes_conservador_bev = calcular_projecoes(df['BEV'], cagr_conservador,
anos_projecao)
projecoes_moderado_bev = calcular_projecoes(df['BEV'], cagr_moderado,
anos_projecao)
projecoes_otimista_bev = calcular_projecoes(df['BEV'], cagr_otimista,
anos_projecao)

projecoes_conservador_phev = calcular_projecoes(df['PHEV'].fillna(0),
cagr_conservador, anos_projecao)
projecoes_moderado_phev = calcular_projecoes(df['PHEV'].fillna(0), cagr_moderado, anos_projecao)
projecoes_otimista_phev = calcular_projecoes(df['PHEV'].fillna(0), cagr_otimista, anos_projecao)

# Criar DataFrames com as projeções
anos_futuros = range(2024, 2036)

projecoes_bev_df = pd.DataFrame({
    'Ano': anos_futuros,
    'Conservador': projecoes_conservador_bev,
    'Moderado': projecoes_moderado_bev,
    'Otimista': projecoes_otimista_bev
})

projecoes_phev_df = pd.DataFrame({
    'Ano': anos_futuros,
    'Conservador': projecoes_conservador_phev,
    'Moderado': projecoes_moderado_phev,
    'Otimista': projecoes_otimista_phev
})

# Concatenar os dados históricos e as projeções
resultado_bev_df = pd.concat([df[['Ano', 'BEV']], projecoes_bev_df], ignore_index=True)
resultado_phev_df = pd.concat([df[['Ano', 'PHEV']], projecoes_phev_df], ignore_index=True)

# Renomear as colunas 'BEV' e 'PHEV' para 'Histórico'
resultado_bev_df.rename(columns={'BEV': 'Histórico'}, inplace=True)
resultado_phev_df.rename(columns={'PHEV': 'Histórico'}, inplace=True)

# Imprimir as tabelas com os resultados
print("Projeção de Vendas de Veículos Elétricos a Bateria (BEV) até 2035:")
```

```
print(resultado_bev_df.to_string(index=False))

print("\nProjeção de Vendas de Veículos Híbridos Plug-in (PHEV) até 2035:")
print(resultado_phev_df.to_string(index=False))

#print(cagr_otimista)
```

ANEXO A – SÉRIE HISTÓRICA DE VENDAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL 2012 A 2024

SÉRIE HISTÓRICA DE VENDAS DE VEÍCULOS LEVES ELETRIFICADOS NO BRASIL
(BEV+PHEV+HEV+MHEV) - 2012 A MAR/2024



ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2012	9	16	7	3	13	23	5	3	2	2	18	16	117
2013	45	22	53	50	12	29	65	45	23	39	52	56	491
2014	93	61	65	53	94	52	61	79	71	53	87	86	855
2015	72	56	61	73	72	74	74	100	82	55	65	62	846
2016	58	64	60	137	41	91	48	59	79	93	159	202	1.091
2017	178	157	227	176	208	238	268	627	384	243	240	350	3.296
2018	272	254	367	367	302	382	262	262	286	405	374	437	3.970
2019	370	287	336	290	357	716	960	867	1.264	1.989	2.013	2.409	11.858
2020	1.568	2.053	1.570	442	601	1.334	1.668	1.943	2.113	2.273	2.231	1.949	19.745
2021	1.321	1.389	1.872	2.708	3.102	3.507	3.625	3.873	2.756	2.787	3.505	4.545	34.990
2022	2.558	3.435	3.851	3.123	3.387	4.073	3.136	4.249	6.391	4.460	4.995	5.587	49.245
2023	4.503	4.294	5.989	4.793	6.435	6.225	7.462	9.351	8.458	9.537	10.601	16.279	93.927
2024	12.026	10.451	13.613										36.090
TOTAL GERAL (2012 A 2024)													256.521

SÉRIE HISTÓRICA DE VENDAS DE VEÍCULOS LEVES ELÉTRICOS PLUG-IN NO BRASIL
(BEV+PHEV) - 2021 A MAR/2024



ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2021	785	661	1.008	967	1.055	1.358	1.156	1.495	1.319	1.250	1.481	1.777	14.312
2022	1.017	1.093	1.026	1.160	1.392	1.949	1.279	1.833	3.700	1.795	1.529	2.187	19.960
2023	2.392	1.865	2.682	1.727	3.039	3.012	3.547	4.867	4.858	5.799	7.200	11.371	52.359
2024	8.268	7.233	9.265										24.766
TOTAL GERAL (2021 A 2024)													111.397