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

JADE ZEPELIN RODRIGUES OLMEDO

ANÁLISE SOBRE A EMISSÃO DE CO_2eq NA TRANSIÇÃO DE VEÍCULOS À COMBUSTÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Rosana
2025

JADE ZEPELIN RODRIGUES OLMEDO

ANÁLISE SOBRE A EMISSÃO DE CO_2eq NA TRANSIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

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.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

Rosana
2025

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

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia **25 de novembro de 2025**, às **19 h**, na sala (físico ou virtual) **meet.google.com/gmr-bpza-fti**, realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho Final de Curso em Engenharia de Energia, desenvolvido por **JADE ZEPELIN RODRIGUES OLMEDO**, intitulado: **ANÁLISE SOBRE A EMISSÃO DE CO2eq NA TRANSIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS**. A banca examinadora foi composta por: **Profa. Dra. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan (orientadora)**, **Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto, Dr. Antonio Carlos Barkett Botan**. Após a avaliação, a banca reuniu-se e atribuiu a nota **9,0 nove** para o trabalho, sendo este considerado **aprovado** (aprovado ou reprovado). Este documento segue assinado pelas pessoas integrantes da Banca Examinadora e o aluno executor do projeto.

Todos estão cientes de que a aprovação do trabalho está condicionada a:

(i) Satisfação dos requisitos solicitados pela Banca Examinadora e lavrados na documentação entregue;

(ii) Entrega do documento final em conformidade com as normas exigidas.

A Banca Examinadora determina um **prazo de 10 dias** para o cumprimento dos requisitos.

Nome completo	Assinatura
JADE ZEPELIN RODRIGUES OLMEDO	Jade Zepelin Rodrigues Olmedo
Profa. Dra. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan	Oliveira Botan
Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto	
Dr. Antonio Carlos Barkett Botan	

Rosana-SP, 25 de novembro de 2025.

Oliveira Botan

Professor(a) Orientador(a)

JADE ZEPELIN RODRIGUES OLMEDO

ANÁLISE SOBRE A EMISSÃO DE CO_2eq NA TRANSIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

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.

Componentes da Banca Examinadora:

_____

Presidente e Orientador: Profa. Dra. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan

_____

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto

_____

Dr. Antonio Carlos Barkett Botan

O51a

Olmedo, Jade
ANÁLISE SOBRE A EMISSÃO DE CO2eq NA TRANSIÇÃO DE VEÍCULOS À COMBUSTÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS / Jade Olmedo. -- , 2026
64 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara,
Orientador: Maria Claudia de Oliveira Botan

1. Veículos elétricos. 2. Pojeção de cenários. 3. Análise de emissão de CO2eq. 4. Transição energética. 5. Mobilidade urbana. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e à minha avó, agradeço indescritivelmente. À minha mãe agradeço, principalmente, por reconhecer a importância da educação e, consequentemente, persistir e ser um exemplo de resiliência perante todos os obstáculos enfrentados. À minha avó agradeço pelo cuidado, risadas e apoio constante e incondicional.

Agradeço à minha orientadora Porf. Dra. Maria Claudia Costa De Oliveira Botan por ter acreditado e insistido no meu potencial. Para a minha graduação, foi de importância decisiva a orientação atenta, cuidadosa e empática que pude receber. Agradeço também a todo corpo docente e demais colaboradores da UNESP-Rosana pela dedicação e disponibilidade.

Agradeço quem me ajudou nas disciplinas quando precisei, com quem compartilhei almoços com *guarapa* e pedais inesquecíveis. Foram momentos de grandes trocas e cumplicidade que tornaram minha graduação única e saudosa.

"A verdadeira viagem de descoberta não consiste
em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos."
Marcel Proust

RESUMO

Conhecendo a urgência da redução de emissão de dióxido de carbono equivalente, o estudo tem como objetivo avaliar o impacto ambiental da penetração de veículos elétricos na frota automotiva da Região Metropolitana de São Paulo. Primeiro, é importante reconhecer a terminologia de dióxido de carbono equivalente como uma padronização da medição das emissões de diferentes gases de efeito estufa (GEE). Foi utilizada a metodologia de cálculo da Cartilha poço-a-roda, disponibilizada pela Associação de Engenharia Automotiva de 2022. O cálculo resulta na quantidade em gramas de emissões de dióxido de carbono equivalente tanto para veículos elétricos quanto para carros flex-fuel. Segundo dados do Detran, SP, a malha urbana de veículos leves da RMSP é predominantemente composta por carros à combustão flex-fuel e uma participação de menos de 1% de eletrificados. O estudo, por meio de projeção de cenários, baseados em dados da ANFAVEA, 2024, mostrou que o aumento de veículos elétricos ainda é incipiente, precisando, no primeiro momento, de incentivos fiscais para diminuir seu custo total, além de aprimorar a tecnologia das baterias para reduzir as emissões (correspondentes a 30%-40% do total) e também seu custo (40%-50% do custo total). A respeito das emissões, as projeções concluem que há uma expressiva redução das emissões de veículos elétricos, principalmente, na fase de produção dos mesmos, representando um avanço na tecnologia de baterias. Em relação aos automóveis a combustão observou-se redução pouco expressiva ao longo do período de 10 anos estudados. Por fim, outro fator importante é o break-even, momento em que as emissões de ambos os carros se igualam. Quanto antes, em quilometragem, ocorrer essa igualdade, mais competitivo o veículo elétrico se torna. Conforme foi verificado nos resultados, o break-even diminui em 32.000 km de 2020 a 2032.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Redução de emissões de dióxido de carbono equivalente. Projeção de cenários.

ABSTRACT

Given the urgent need to reduce greenhouse gas emissions, this study evaluates the environmental impact of increasing electric vehicle adoption within the automotive fleet of the São Paulo Metropolitan Region (RMSP). Carbon dioxide equivalent (CO_2e) is used as a standardized metric to quantify and compare emissions from different greenhouse gases (GHGs). The analysis was conducted using the Well-to-Wheel methodology presented in the 2022 guidebook published by SAE Brasil (Brazilian Society of Automotive Engineering). This methodology estimates CO_2e emissions, expressed in grams, for both electric and flex-fuel vehicles throughout their life cycle. According to data from DETRAN-SP, the RMSP light-duty vehicle fleet is currently dominated by flex-fuel internal combustion vehicles, while electrified vehicles account for less than 1% of the total fleet. Based on scenario projections developed using ANFAVEA (2024) data, the results indicate that electric vehicle adoption remains at an early stage and will likely require fiscal incentives to reduce total ownership costs. Furthermore, advances in battery technology are essential to decrease both production-related emissions—which currently represent approximately 30% to 40% of total electric vehicle emissions—and battery costs, which account for roughly 40% to 50% of the vehicle's total cost. The projected scenarios reveal a substantial reduction in electric vehicle emissions over time, particularly during the manufacturing phase, reflecting expected improvements in battery technology. In contrast, emissions from internal combustion vehicles are projected to decline only marginally throughout the ten-year study period. Another key indicator examined is the break-even point, defined as the mileage at which cumulative emissions from electric and flex-fuel vehicles become equivalent. The lower the mileage required to reach this point, the greater the environmental competitiveness of electric vehicles. The results show that the break-even threshold decreases by approximately 32,000 km between 2020 and 2032. Overall, the findings demonstrate that the expansion of electric vehicle adoption has significant potential to reduce greenhouse gas emissions in the RMSP and that the study successfully achieved its proposed objective.

Keywords: Electric vehicles. Reduction of equivalent carbon dioxide emissions. Scenario projections..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diferenças entre normas climatológicas 15
Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 18
Figura 3 - Emissões de GEE no Estado de São Paulo. 18
Figura 4 - Emissão do setor de energia por categoria. 19
Figura 5 - Distribuição da frota por combustível. 20
Figura 6 - Produção de etanol no Brasil por safra (Bilhões de litros). 23
Figura 7 - Venda de carros elétricos no cenário de emissões zero (2020-2030). 24
Figura 8 - Licenciamento Mensal de Veículos Leves. 26
Figura 9 - Custo estimado das baterias lítio-íon para veículos elétricos (2020-2022-2030). 28
Figura 10 - Comparação de emissões de ciclo de vida. 30
Figura 11 - Emissões comparativas de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de um veículo elétrico a bateria (BEV) e um veículo com motor de combustão interna (ICE) de porte médio. 31
Figura 12 - Bateria de íon-Lítio. 31
Figura 13 - Evolução da demanda de lítio (t). 32
Figura 14 - Demanda por grafite sintético. 36
Figura 15 - Matriz energética brasileira, 2024. 36
Figura 16 - Emissões de CO2 anual por combustível utilizado. 41
Figura 17 - Vendas mundiais de automóveis elétricos (milhões de unidades). 42
Figura 18 - Produção, venda e posse de VEs na China (2015-2021). 43
Figura 19 - Venda de veículos eletrificados no Brasil e participação nas vendas totais (mil unidades, %). 43
Figura 20 - Venda média anual de veículos eletrificados por Estado (2022 – 2024). 44
Figura 21 - Infraestrutura de carregamento por Estado. 45
Figura 22 - Estrutura metodológica da Avaliação de Ciclo de Vida. 47
Figura 23 - Fluxo do método de análise do poço-a-roda. 48
Figura 24 - Veículos selecionados para o estudo. (a) HB20 sense 1.0-12v Hyundai e (b) BYD Dolphin. 51
Figura 25 - Projeção de crescimento estagnado . 52
Figura 26 - Projeção de crescimento gradual. 52
Figura 27 - Projeção de crescimento acelerado. 53
Figura 28 - Categorias de eletrificados. 54
Figura 29 - Emissões em 2020. 55
Figura 30 - Projeção de emissões em 2027. 56
Figura 31 - Projeção de emissões em 2032. 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apoio do governo aos combustíveis fósseis por mecanismo de apoio (2016-2021) (Em R$ bilhões). 21
Tabela 2 - Modalidades de veículo por combustível. 22
Tabela 3 - Eletropostos por municípios. 26
Tabela 5 - Composição química e propriedades dos principais cátodos. 31
Tabela 6 - Demanda de lítio por uso final (kt LCE). 32
Tabela 7 - Emissão de CO2 em toneladas por tonelada de minério extraído. 33
Tabela 8 - Fator ecológico por sistema de carregamento. 37
Tabela 9 - Comparativo geral entre Veículo elétrico X Veículo com motor a combustão interna. 39
Fonte: EPE, 2025. 42
Tabela 10 - Frota circulante. 45
Tabela 11 - Taxas de crescimento. 45
Tabela 12 - Dados fixos. 48
Tabela 13 - Dados variáveis. 48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **11**
1.1 OBJETIVOS 12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **13**
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS 13
2.2 EXPANSÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS 25
2.3 BATERIAS 27
2.3.1 LÍTIO 28
2.3.2 NÍQUEL E MANGANÊS 29
2.3.3 GRAFITE 31
2.4 ANÁLISE POÇO-A-RODA 32
2.5 LEGISLAÇÃO 34
2.6 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR 35
2.7 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL 37
3 TAXA DE CRESCIMENTO E PENETRAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS DA FROTA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO **37**
4 METODOLOGIA 43
4.1 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA 43
4.2 MÉTODO DO POÇO-A-RODA 44
4.2.1 Indicadores para o inventário 46
4.2.2 Definição dos objetos de estudo 46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **47**
6 CONCLUSÃO **53**

LISTA DE NOMENCLATURA

CO_2eq - Dióxido de carbono equivalente

ICEV - Veículo com Motor de Combustão Interna

BEV - Veículo elétrico a bateria

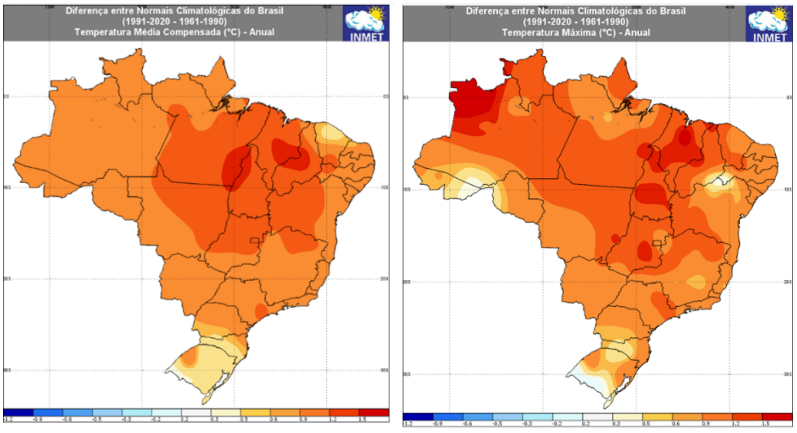
PHEV - Veículo Elétrico Híbrido Plug-in

HEV - Veículo Elétrico Híbrido

1 INTRODUÇÃO

Com as mudanças climáticas no centro das discussões globais, esforços estão sendo medidos para criação de metas que mitiguem as emissões desenfreadas de gases poluentes desde a Revolução Industrial. No Brasil, é possível visualizar os eventos climáticos extremos na figura 1, em que é realizado um estudo pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023) sobre a distribuição de calor no país ao longo de 60 anos. Observa-se um avanço da mancha alaranjada para o norte do Brasil em "b" e também o surgimento de pontos de concentração de calor (em vermelho) em regiões onde não havia em "a". Com objetivo de mitigar e evitar eventos como o citado, o Acordo de Paris é uma das medidas ao qual o Brasil é signatário e que determina a limitação de aquecimento global menor que 2ºC em relação ao período pré-industrial. A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, do inglês Nationally Determined Contribution) brasileira estabelece uma redução de 37% das emissões até 2025 e 50% até 2030 em comparação aos níveis de 2005 além da meta de neutralidade climática até 2050 (Brasil, 2022). Sendo assim, é possível observar que existe um forte compromisso brasileiro com a transição energética com finalidade de neutralizar suas emissões, o que indica que energias renováveis e eletrificação do setor automobilístico tem se tornado um grande alvo com expectativa de crescimento para o futuro (Mera, *et al*; 2023).

Figura 1 - Diferenças entre normas climatológicas



(a) (b)

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia, 2023

Como visto na bibliografia, o setor automobilístico está entre os setores mais poluentes, e uma das soluções para sua descarbonização é a eletrificação do setor. No entanto, em meio a transição, a realidade da frota brasileira é composta majoritariamente de carros à combustão, utilizando gasolina e etanol ou a opção flex-fuel, que possibilita o uso de ambos.

Segundo Onohara e Onohara (2022) é possível minimizar a redução de poluentes por carros à combustão por meio de catalisadores nos sistemas de descargas dos automóveis. Na visão dos pesquisadores, a utilização de etanol é uma alternativa social e ambientalmente positiva, uma vez que, o biocombustível é derivado de cana de açúcar no Brasil, e no que se refere às emissões de gases poluentes, o álcool, produz em geral, menos poluentes do que a gasolina e o diesel, já que possibilita uma queima mais completa e com menor emissão de CO e material particulado.

Em paralelo à iniciativa dos biocombustíveis, em fevereiro de 2020 no Brasil, a Comissão de Constituição de Justiça (CCJ) aprovou o Projeto de Lei do Senado nº 304/2017 em que proíbe a venda de veículos movidos a combustíveis fósseis no Brasil, a partir de 2030 e a circulação de toda a frota movida à gasolina e diesel em 2040. As exceções estariam nos automóveis movidos somente a biocombustíveis, veículos de coleção e veículos de propriedade de visitantes estrangeiros, até 180 dias de sua entrada no Brasil (Brasil, 2017).

Consoante aos compromissos assumidos a fim da descarbonização, algumas montadoras já estão começando a focar em veículos “eletrificados”. Desde 2019, todos os novos modelos lançados pelo grupo PSA (Peugeot, Citroen, DS, Vauxhall e Opel) tinham versões híbridas ou elétricas, a Volvo e Jaguar Land Rover também anunciaram que pretendem abolir gradativamente os motores a combustão. O grupo Renault anunciou que vai interromper as vendas de carros movidos a combustão na China para focar no mercado de carros elétricos. (Cavagliano, 2020).

Ademais, é relevante estabelecer que tanto carros à combustão como veículos elétricos emitem gases poluentes direta e indiretamente. As emissões de forma direta acontecem no uso do veículo ao queimar o combustível, liberando C02 e outros poluentes. Já a emissão indireta está associada aos processos que ocorrem fora da etapa de uso do veículo, incluindo a extração, produção e distribuição dos combustíveis, bem como a geração da eletricidade utilizada no carregamento de veículos elétricos. (GHG Protocols, 2004).

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral

- Analisar a emissão de dióxido de carbono através da migração dos automóveis da região metropolitana de São Paulo para veículos elétricos.

Objetivos específicos

- Quantificar os veículos da região metropolitana de São Paulo;
- Quantificar emissão atual de dióxido de carbono;
- Estudar a migração de automóveis a combustão para veículos elétricos;
- Analisar a emissão de dióxido de carbono;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS

Ao longo dos últimos anos estão sendo observados eventos naturais com maior intensidade, prolongados ou atrasados. Segundo o relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM), em 2024, o Brasil foi palco de 10 eventos climáticos extremos, sendo as enchentes do Rio Grande do Sul, a seca na Amazônia e as ondas de calor consideradas eventos sem precedentes.

As enchentes no Rio Grande do Sul afetaram 90% do Estado, causando mais de 180 mortes e causaram prejuízo de R$8,5 bilhões no setor agrícola e R$1,2 bilhão no setor agropecuário, com 600 mil hectares de pastagem seriamente danificadas. Já a seca na Amazônia foi uma das mais severas da história, afetando 745 mil pessoas e, em abril de 2024, as chuvas ficaram de 20% a 30% abaixo da média, o que resultou em recordes de focos de incêndio e drástica baixa no volume dos rios, especialmente o do Rio Negro, atingindo seu recorde de baixa. E o mesmo cenário se repete no Pantanal, nos últimos 70 anos, essa é a maior seca já registrada segundo o governo do Mato Grosso do Sul, favorecendo pontos de incêndio e além disso partes do Centro-Oeste do Brasil foram afetadas por ondas de calor e experimentaram temperaturas 7 °C acima do normal.

Por esses motivos, a Organização das Nações Unidades (ONU) incentiva mudanças de hábitos e desenvolvimento científico e econômico para soluções de mitigação, listando 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como mostra a Figura 2.

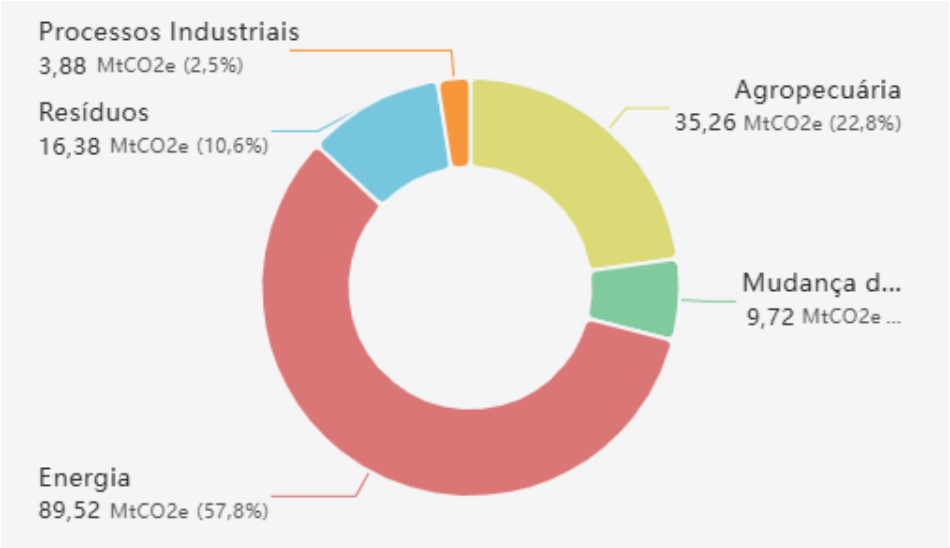
Figura 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: Nações Unidas Brasil, 2015.

Nesse contexto, o presente estudo foca diretamente nos objetivos 7 e 11 no município de São Paulo, São Paulo, Brasil e, para isso, o rastreamento da origem das emissões faz-se necessário para identificar o setor e atividade mais poluentes do sistema. Dessa forma, segundo o Sistemas de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG), o Estado de São Paulo, em 2023, emitiu 154,78 MtCO2eq de GEE, sendo 89,52 MtCO2eq (57,8%) pelo setor de Energia, como mostra a Figura 3.

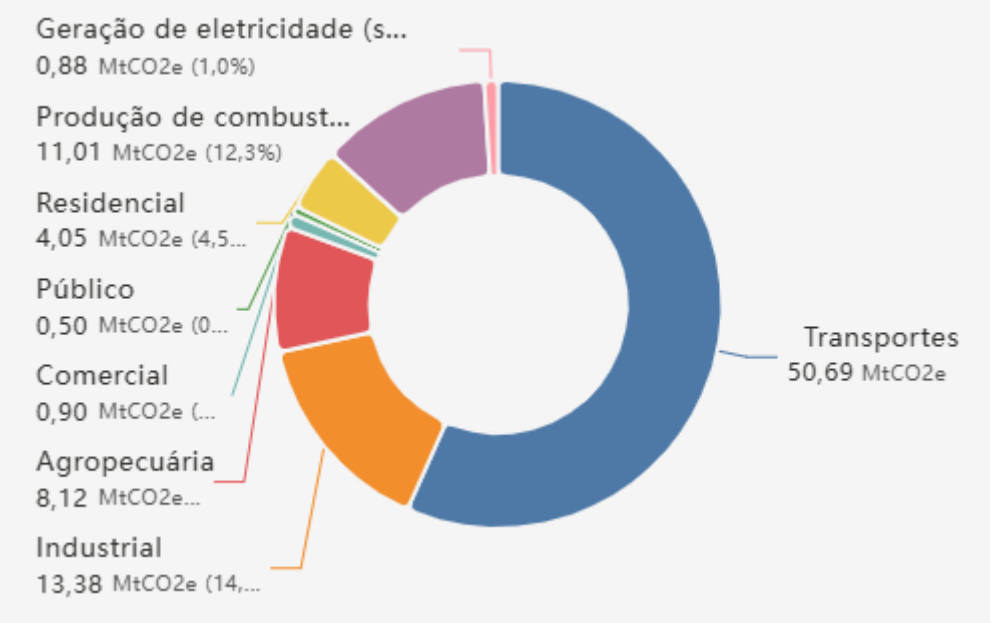
Figura 3 - Emissões de GEE no Estado de São Paulo.



Fonte: Emissão de GEE (2023) São Paulo, SEEG, 2024.

No setor de energia, um pouco mais da metade das emissões são atribuídas ao setor de transportes, com 56,6% das emissões totais, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Emissão do setor de energia por categoria.



Fonte: Emissão de GEE (2023) São Paulo, SEEG, 2024.

Sabendo, então, que o setor de energia é a maior parte emissora das atividades estudadas e que os transportes são os mais poluentes desse setor, os combustíveis e biocombustíveis tornam-se os principais alvos para ações mitigadoras para a crise climática. Nesse contexto, segundo o DETRAN, o município de São Paulo possui uma frota de 7.3 milhões de veículos, sendo 4.6 milhões correspondentes a automóveis e seus correspondentes combustíveis mais utilizados são o etanol (álcool), gasolina e a modalidade flex-fuel (álcool/gasolina) que aceita ambos os combustíveis no motor, como exibe a Figura 5.

Figura 5 - Distribuição da frota por combustível.

Descrição	Frota ativa
ALCOOL/GASOLINA	2.667.322
GASOLINA	1.043.936
ALCOOL	79.623
GASOLINA/ALCOOL/GAS NATURAL VEICULAR	21.547
GASOLINA/ELETRICO	13.228
ELETRICO/FONTE EXTERNA	13.020
GASOLINA/GAS NATURAL VEICULAR	12.922
GASOLINA/ALCOOL/ELETRICO	12.747
ELETRICO	1.895
DIESEL	1.396
ALCOOL/GAS NATURAL VEICULAR	1.082
ELETRICO/FONTE INTERNA	496
GASOLINA/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	339
HIBRIDO PLUGIN	223
ALCOOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	165
GAS METANO	47
GAS NATURAL VEICULAR	5
HIBRIDO	2
DIESEL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	1
GASOGENIO	1

Fonte: Frota, Detran.SP, 2025

A respeito da gasolina, é sabido que é um derivado do petróleo e, portanto, possui um grande potencial poluidor em relação aos biocombustíveis e o que tem sido feito para mitigar seus impactos e também para diminuir a dependência do petróleo é a criação e aplicação de programas de incentivo à mistura de biocombustível à gasolina.

Uma das iniciativas para diminuir a emissão de gases na combustão é o programa nacional Proálcool de 1975, criado no contexto da crise do petróleo, mas que foi considerado o “maior e mais ambicioso programa de produção e uso de combustíveis renováveis já implementado em todo o mundo, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e contribuindo significativamente para o desenvolvimento econômico do Brasil nas últimas cinco décadas”, segundo o MME (2024). O programa incentiva o uso de etanol acrescentado na gasolina na porcentagem entre 18% e 25% e, desde sua criação, já houve a economia de 2,5 bilhões de barris de petróleo e 205 bilhões de dólares em importações de gasolina ao longo das últimas cinco décadas (Ministério de Minas e Energia), atingindo, dessa forma, seus dois principais objetivos.

Segundo Stolf e Oliveira (2020), além do Proálcool ter atingido seus principais objetivos, o programa também impulsionou a produção de etanol, tornando o Brasil um dos

líderes mundiais do biocombustível e também de açúcar, acelerando o desenvolvimento tecnológico do processo. A partir disso, o setor passou a ser mais independente energeticamente, criou sistemas de cogeração promovendo eletricidade e entrou no mercado de exportações com os excessos da produção. Sendo assim, pode-se concluir que o investimento em biocombustíveis tem se provado lucrativo e competitivo com o mercado de combustíveis fósseis.

Acrescentando à discussão os ODSs relacionados à mudança climática (7, 9, 12 e 13), o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) analisa, no livro Indicadores Quantitativos da OCDE e o Brasil: comércio aberto e investimentos, capítulo 3, as medidas de apoio aos combustíveis fósseis pelo governo em acordo com a visão da OCDE de reduzir os subsídios de combustíveis derivados de petróleo como uma das estratégias para obtenção de uma economia de baixo carbono (OCDE, 2021).

O Estudo do IPEA aponta que parte significativa dos subsídios provêm de despesas fiscais (reduções de impostos como Cide, PIS/Cofins e ICMS) e mecanismos de controle de preços, definido pela OCDE como uma mudança nos preços recebidos pelos produtores e pagos pelos consumidores domésticos como consequência de intervenções do governo. Esses apoios reduzem o preço final da gasolina e do diesel, tornando-os mais competitivos em relação às alternativas de baixo carbono (como etanol, eletrificação ou transporte coletivo limpo) e, por consequência, os preços assumem, artificialmente, valores mais baixos e a demanda por combustíveis fósseis se mantém alta, o que dificulta a redução das emissões do transporte e contradiz o compromisso assumido pelo Brasil das ODSs citadas.

A Tabela 1 demonstra os últimos 5 anos de apoios governamental aos combustíveis fósseis, permitindo interpretar que, apesar de haver flutuações entre os anos, os apoios tendem a ser favoráveis aos fósseis, sendo essa a realidade nos dias de hoje em meio a compromissos globais de economia de baixo carbono e crise climática. Por isso, uma das conclusões do capítulo é que o Brasil possui uma estrutura consolidada de subsídios aos combustíveis fósseis, mas ressalta também as políticas direcionadas à descarbonização (IPEA, 2024).

Tabela 1 - Apoio do governo aos combustíveis fósseis por mecanismo de apoio (2016-2021) (Em R$ bilhões).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Despesas fiscais	43.242	26.764	23.451	22.587	21.708	25.748
Transferências diretas	6.671	7.444	15.320	12.976	12.265	13.034
Total	**49.914**	**34.207**	**38.771**	**35.563**	**33.973**	**38.782**

Fonte: OECD (2023c).
Obs.: Os dados considerados pela OCDE são baseados na "melhor estimativa", considerando que vários subsídios e medidas de apoio dispostos no inventário da organização podem não ter sido quantificados inteiramente ou o conjunto de dados se encontrar incompleto.

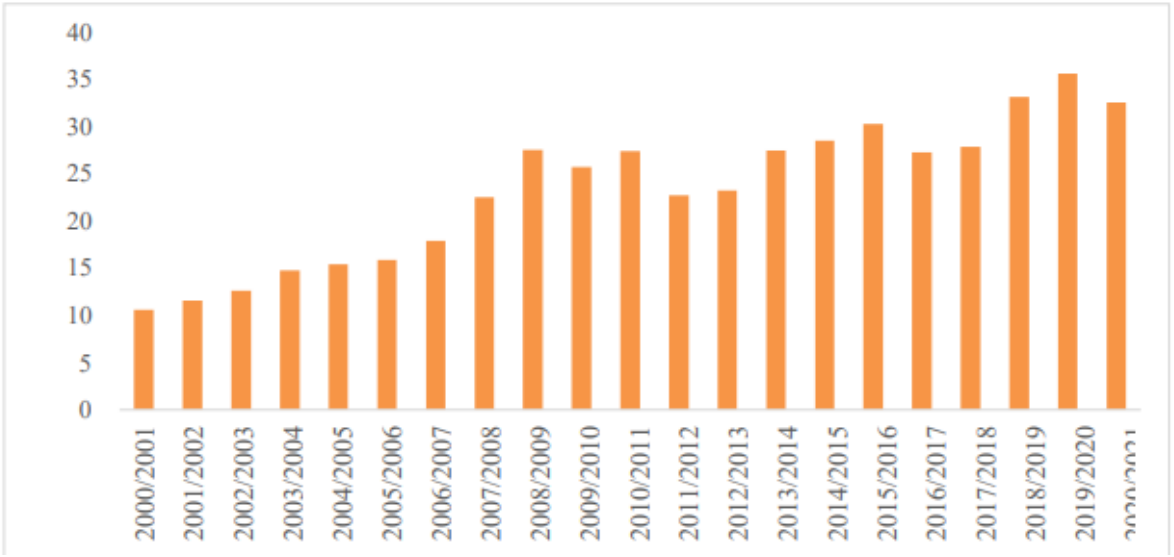
A atual política dos biocombustíveis foi estimulada pelo Acordo de Paris- implementado na Conferência das Partes-COP 21 em 2015- que representa um acordo global, reunindo 195 nações em prol da redução das emissões de GEEs com objetivo de estabelecer metas mais efetivas para evitar ultrapassar o aumento da temperatura média global em 1.5°C e foi destacado a transição energética para fontes renováveis de energia. O diferencial desse Acordo em relação ao da COP anterior, em Kyoto, foi que cada país passou a ser responsável por apresentar suas Contribuições Nacionalmente Determinadas, nas medidas de redução de emissão de carbono em relação a taxas anteriores seriam obrigatórias. Sendo assim, o Brasil comprometeu-se em reduzir suas emissões, no período de 2005 a 2025, em 37% e em 43% até 2030. Nesse contexto, em 2017, foi criado o programa RenovaBio (Moura, 2022).

O programa, definido pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) como uma política nacional com fim de contribuir para o Acordo de Paris, promover a adequada expansão de biocombustíveis e assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, possui três instrumentos para atingir seus objetivos: metas anuais para a redução da intensidade carbônica (CO_2 /MJ) por um período mínimo de dez anos; certificação de biocombustíveis de acordo com a eficiência na redução de emissões de GEEs; e créditos de descarbonização (CBios). Dessa forma espera-se como resultado converter custos ambientais do uso de combustíveis fósseis para produtores de biocombustíveis e fornecer incentivos a iniciativas de eficiência energética. Atualmente, o programa acumula o valor de redução de 24,4 milhões de toneladas de GEEs, permitindo atingir cerca de 98% da meta do Brasil em 2021 (IPEA, 2024). Em virtude desses retornos, o estudo também conclui que o Brasil possui condições de incentivar os estímulos a fontes renováveis nos fomentos a energia elétrica e no fomento à produção de biocombustíveis.

No estudo da importância do etanol no Brasil, Moura (2022) relaciona o aumento da produção de etanol (quase contínuo) desde o início do século XXI (Figura 6) e, consequentemente, investimentos também com o Protocolo de Kyoto (COP 3 em 1997), uma

vez que esse sugeria a utilização de etanol como substituto da gasolina e não mais como aditivo e relaciona também com o fato do lançamento dos carros flex.

Figura 6 - Produção de etanol no Brasil por safra (Bilhões de litros).



Fonte: Moura, 2022.

Segundo Gonçalves (2024), o consumo brasileiro de veículos baseia-se no custo-benefício. Então, desde que o carro flex entrou para o mercado, essa modalidade tornou-se líder de vendas (Tabela 2) uma vez que os brasileiros poderiam se adaptar às flutuações do preço do petróleo e etanol, optando pelo combustível mais barato.

Tabela 2 - Modalidades de veículo por combustível.

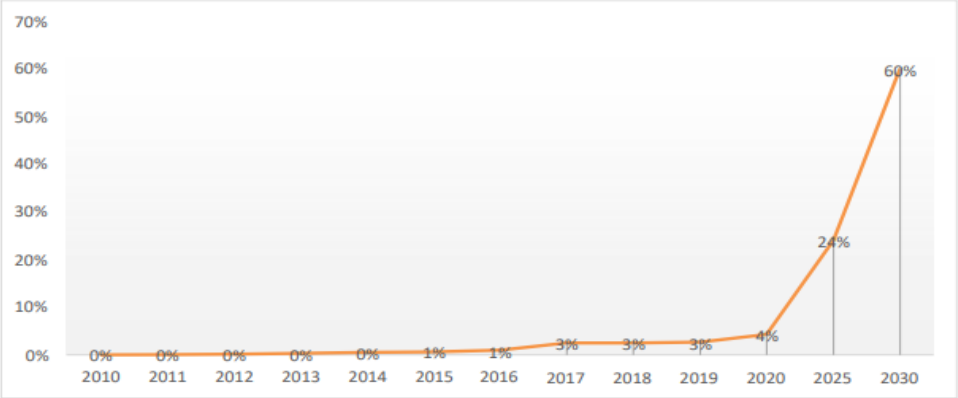
Year	Gasoline	Ethanol	Flex-fuel	Electric/hybrid
1960	68,452	–	–	–
1970	320,544	–	–	–
1980	570,249	226,534	–	–
1990	463,464	70,250	–	–
2003	1,046,474	33,034	39,095	–
2010	350,848	44	2,570,578	–
2019	73,425	26	2,123,841	11,844

Fonte: Gonçalves, 2024.

Na Tabela 2 é possível visualizar a coluna de veículos elétricos (VE), o que Moura (2022) considera um forte competidor para os biocombustíveis, principalmente, depois da Conferência das Partes, em Glasgow, (COP 26 em 2021), em que foi posto em pauta a importância dos veículos elétricos para redução de emissão de gases poluentes. Os dados após

a COP 26 mostram que os VEs são de fato uma forte concorrência quando é analisado a porcentagem de vendas de VE, segundo a AIE (2021), em 2021, período pandêmico, uma vez que o setor automobilístico obteve queda de 16%, enquanto os VEs, no mesmo período, obteve aumento de 40% em suas vendas. E o estudo ainda faz uma projeção (Figura 7) de vendas, de 2020 a 2030, de VEs no cenário NET ZERO (emissões zero líquidas) em que os VEs irão representar 60% das vendas de carros, contra os 5% de 2022, sendo os principais países consumidores a China, EUA e países europeus. O motivo do crescimento exponencial dos veículos elétricos, como consta no estudo, é o estabelecimento de marcos regulatórios e estímulos para a adesão de alternativas renováveis.

Figura 7 - Venda de carros elétricos no cenário de emissões zero (2020-2030).



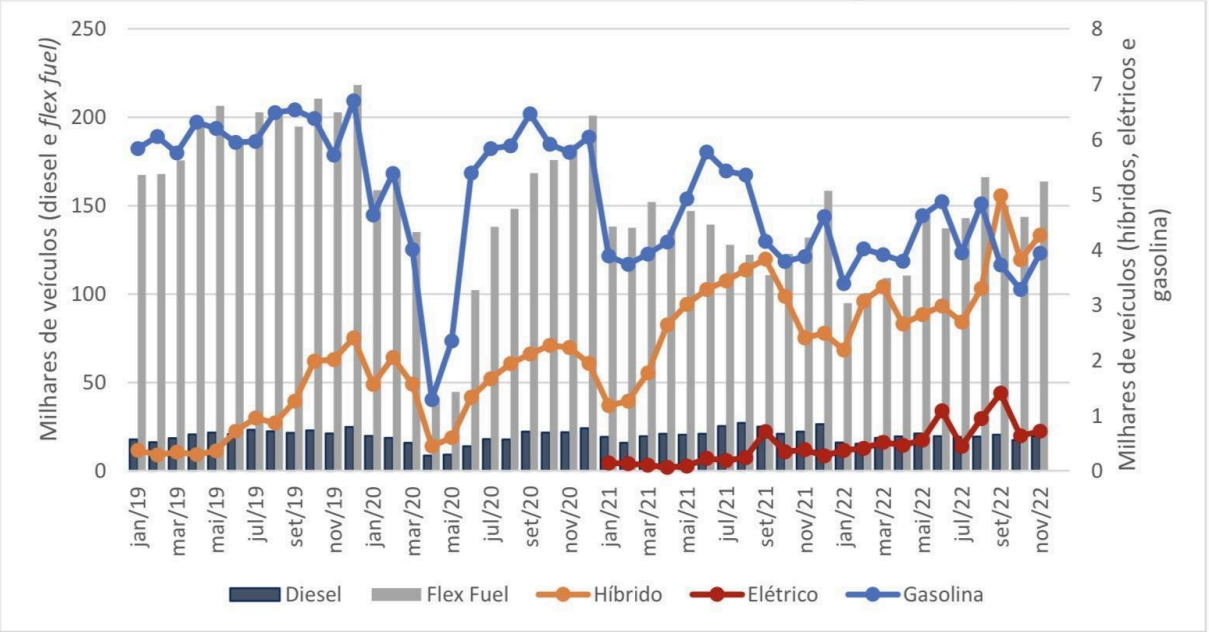
Fonte: Moura, 2022.

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas IPCC (2022), os veículos elétricos tendem a exercer um papel fundamental no transporte terrestre, enquanto os biocombustíveis assumiriam os transportes de cargas marítimas e de aviação. No entanto, o IPCC ressalta que os VEs apenas possuirão relevância em redução de emissão de GEE se suas fontes de carregamento forem renováveis, uma vez que o contrário diminuiria seu potencial esperado. Além disso, o estudo de Demanda de Energia dos Veículo Leves 2023-2032 (EPE, 2022) aponta alguns entraves para a eletrificação da mobilidade no Brasil como alto custo dos veículos comparado com a realidade nacional, a infraestrutura de recarga (que requer investimentos elevados, arcabouço regulatório, precificação e especificação das instalações), a bateria que ainda há melhorias a serem realizadas e seu alto custo de matéria prima. Por isso, os carros híbridos são os mais cotados no presente para inserção de fontes alternativas de mobilidade.

Atualmente, os veículos híbridos estão sendo inseridos no mercado com incentivos fiscais, em partes proporcionados pelo programa Rota 2030, o qual visa solucionar dificuldades enfrentadas pela indústria automotiva nacional. Alguns destaques do programa seriam o estabelecimento da meta de aumento de 1,1% da eficiência energética até 2022, (com redução média do consumo de combustível) redução de IPI de veículos híbridos e elétricos, com desconto extra para híbridos com motores flex, incentivo fiscal de R$1,5 bilhão para empresas que investirem pelo menos R$5 bilhões em pesquisa no Brasil. Já para 2027 haverá uma ampliação do escopo dessa política, incluindo novas classificações veiculares.

Em 2021, o número de licenciamento de veículos leves foi de 1,9 milhões, sendo 78,8% automóveis e 21,2% comerciais leves. A Figura 8 mostra a relação entre combustíveis, elétricos e híbridos com dados de licenciamento mensal entre janeiro de 2019 e novembro de 2022, possibilitando a interpretação da preferência majoritária pelo flex fiel (82,2%), como vem sendo evidenciado, em seguida a gasolina com 13,4% e, pela primeira vez nos dois últimos anos apresentados, os veículos elétricos e híbridos puderam ser analisados individualmente, uma vez que, nos últimos 2 meses da figura, os híbridos superaram as vendas de carros à gasolina, ganhando relevância estatística, resultando em 1,6% de licenciamento para carros híbridos e 0,14% para elétricos. No entanto, mesmo com participação relativa inferior no mercado, os veículos elétricos e híbridos juntos totalizam 19.745 unidades, o que representa 77,2% acima do que foi registrado em 2020 (ANFAVEA, 2022). Além disso, os dados apresentados confirmam os incipientes incentivos à alternativas na mobilidade urbana quando analisamos a curva dos veículos híbridos, principalmente, crescendo ao longo dos 3 anos estudados, sendo essa uma das respostas do governo ao alto custo dos mesmos no Brasil.

Figura 8 - Licenciamento Mensal de Veículos Leves.



Fonte: EPE, base ANFAVEA (2022) Note: Dados até 2020 apresentam híbridos e elétricos agregados.

Fonte: EPE, 2022.

Em relação à infraestrutura, há estudos com países como Estado Unidos, China e Noruega que comprovam que investir em infraestrutura, como a disponibilidade de eletropostos, alavancou a aderência a carros elétrico e híbridos em maior proporção quando comparado a incentivos de facilitação de compra (é importante enfatizar que ambas as iniciativas possuem seja relevância). Segundo um estudo do Banco Mundial (2020) foi estimado que, em relação ao rápido desenvolvimento do mercado de VE na China, no período de 2015 a 2018, investir em estações de carregamento foi quatro vezes mais eficaz do que subsidiar as compras de veículos elétricos (World Bank, 2020).

Outros estudos a respeito do mercado estadunidense, entre 2011 a 2013, e norueguês, entre 2011 a 2015, mostraram que a eficácia dos subsídios às estações de carregamento foi duas vezes maior do que benefícios financeiros para a aquisição de veículos elétricos. Sendo assim, pode-se concluir que o incremento em infraestrutura de recarga tornaram os VEs mais atrativos e, dessa forma, acarretaria novas aquisições ao mesmo tempo que ocorreria um ciclo de resposta positiva , no qual alavancaria, gradualmente, o número de compras como a quantidade de postos de carregamento, para além do incentivo inicial de políticas públicas (Ribeiro, 2020).

Atualmente, segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), há 1.586 de postos de recarga lenta e 155 de recarga rápida, totalizando 1.741 no município de São

Paulo, o qual lidera a disponibilidade dos mesmos em relação a outras capitais do país (Tabela 3).

Tabela 3 - Eletropostos por municípios.

ELETROPOSTOS POR MUNICÍPIO

Município	Estado	AC (Recarga lenta)	DC (Recarga rápida)	Total
São Paulo	SP	1.586	155	1.741
Rio de Janeiro	RJ	774	74	848
Brasília	DF	397	91	488
Curitiba	PR	294	94	388
Porto Alegre	RS	252	26	278
Goiânia	GO	206	35	241
Florianópolis	SC	198	22	220
Campinas	SP	187	29	216
Fortaleza	CE	190	25	215
Salvador	BA	178	28	206
Total		**12.397**	**2.430**	**14.827**

Fonte: ABVE/Tupi Mobilidade (fev/2025).

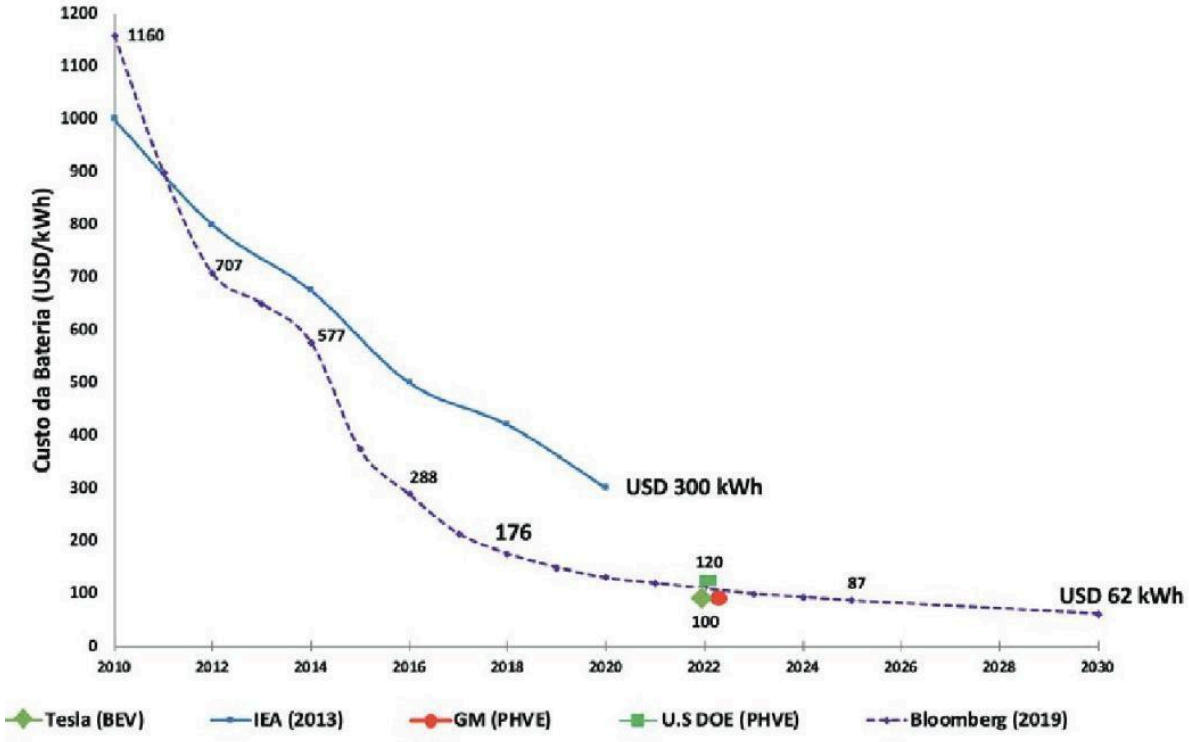
Enquanto os postos de combustíveis, em operação em 2025, são em 1.629, segundo a distribuição de postos realizada pela ANP em seu Painel Dinâmico de Relatório de Revenda. Dessa forma, pode-se inferir que, em relação a quantidade de postos, os eletropostos estão em posição vantajosa, porém ao analisar os pontos de carregamento rápido em função de sua praticidade de carregamento, os postos de combustíveis assumem protagonismo. Portanto, a respeito de infraestrutura prática, eficiente e suficiente, o município de São Paulo necessita de investimentos.

Já, em relação ao alto custo das baterias, apesar de haver outras opções de composição química, a de lítio-íon obtém melhor aceitação e liderança no mercado de eletromobilidade (IEA, 2019). Entre as baterias de lítio-íon existem diversas categorias e aplicações, uma vez que os ânodos (polos negativos) e cátions (polos positivos) podem possuir diferentes materiais e composições. No entanto, independente das combinações possíveis, a melhoria de custo por kilowatt-hora das baterias é o principal desafio para implementação em grande escala dos VEs. Sendo as baterias um terço do preço de um VE, a diminuição dos seus preços e o aumento de sua escala são fatores decisivos para maior adoção de VE (FGV Energia, 2017).

Por sua vez, o relatório de 2018 de Bloomberg NEF identificou que houve uma redução, em média, de 85% passando de US$1.160 em 2010 para US$176 por kWh em 2018 e há uma estimativa para que o custo chegue em US$62 kWh em 2030 (Goldie-Scot, 2019).

Segundo o mesmo relatório, em 2024, as baterias obtiveram a maior queda de preço desde 2017, chegando em US$115/kWh, considerando células e pacotes de baterias. Já, em uma estimativa realizada por Rodríguez e Consoni (2020), compilando dados de artigos e relatórios do IEA e Bloomberg, é possível visualizar a tendência de redução de custo da bateria ao longo dos anos até 2030 (Figura 9).

Figura 9 - Custo estimado das baterias lítio-íon para veículos elétricos (2020-2022-2030).



Fonte: Rodríguez e Consoni, (2020).

A queda de custo das baterias está relacionada a melhorias químicas, especificamente dos cátodos, os quais permitem reduzir a quantidade de material de alto custo como cobalto, além disso novos desenhos de célula com objetivo de obter maior densidade energética e, por fim, melhorias nos processos de montagem dos pacotes das baterias (Rodríguez e Consoni, 2020). Dessa forma, por meio da figura 9, é possível observar o avanço ao longo do tempo para que o veículo elétrico se torne mais acessível, mas com os dados percebe-se que, apesar do grande declínio dos preços, ainda há um caminho a ser percorrido para que haja produção em larga escala dos veículos elétricos.

2.2 EXPANSÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Segundo Ruoso, (2025), existem aspectos sociais, econômicos, políticos, técnicos e ambientais que devem ser considerados concomitantemente para a expansão dos veículos elétricos na mobilidade urbana. A curto prazo, a autora aponta que ações econômicas, políticas e técnicas alavancariam a utilização de VEs. No entanto, a médio e longo prazo, a questão ambiental, dentre as demais, representaria uma atratividade para eletrificação da mobilidade urbana, como mostra a Tabela 4.

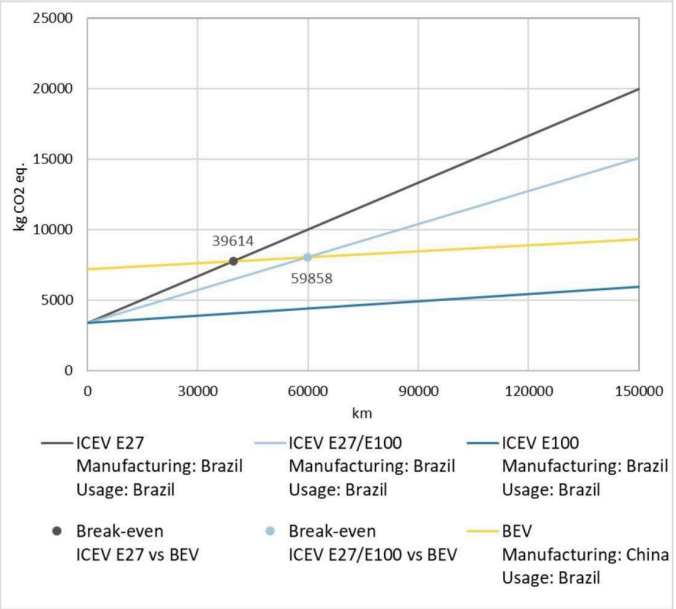
Tabela 4 - Atratividade, barreiras e soluções.

Atratividade	Barreira	Solução
Redução de GEE	Maior emissão de GEE em sua fabricação	Incentivo à economia circular
Ampliação do uso de energia renovável	Aumento da demanda do sistema elétrico	Redes inteligentes e expansão de renováveis intermitentes
Menor dependência de combustíveis fósseis	Alto custo do veículo elétrico	Incentivos fiscais e econômicos

Fonte: Adaptado de Ruoso, 2025”

Em um estudo de ciclo de vida “poço-a-roda” de De Andrade, et al. (2023) mostra que a emissão de CO2eq depende de com qual combustível está sendo comparado às emissões de VEs. É notório, na figura 10, que as emissões de carros à combustão com gasolina (ICEV E27) é maior que no VE (BEV) a partir de 39.614km. E o tipo flex, modelo mais utilizado no Brasil (Detran SP, 2026), possui maior quilometragem com menor emissão de CO2eq, em relação ao à gasolina, mas ainda assim ultrapassa a liberação de GEE do BEV a partir de 59.858km. Já o veículo movido a etanol tem menor emissão que ambos durante seu ciclo de vida.

Figura 10 - Comparação de emissões de ciclo de vida.

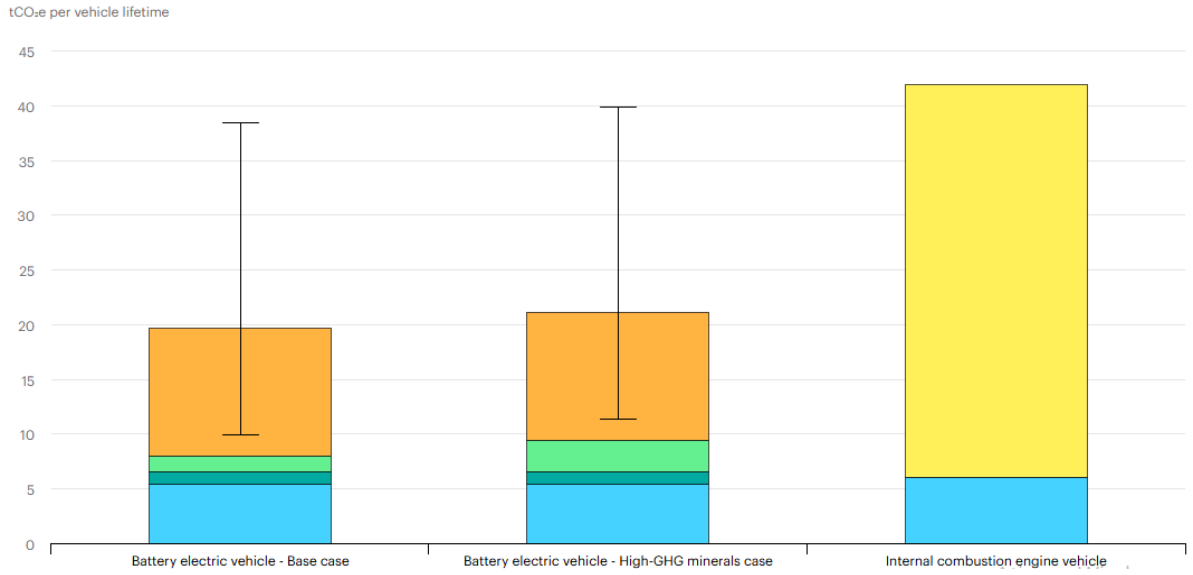


Fonte: De Andrade et al., 2023

Apesar de, em uma análise de poço-a-roda, o VE ser mais sustentável ambientalmente que os carros flex, ainda assim emite gases de efeito estufa, principalmente, em sua fase de produção. Sabendo que a produção da bateria representa de 30% a 50% das emissões e 30% a 40% do valor do veículo (Vasconcellos, 2025), representa também, dessa forma, a principal barreira para a redução de poluentes em seu ciclo de vida, uma vez que suas matérias-primas são escassas e não renováveis (Kester et al., 2019; Noel et al., 2020).

Segundo um estudo da IEA, 2021, as emissões nas fases de produção dos veículos elétrico e à combustão são de 11 tCO2eq, enquanto as do ICEV são de 8tCO2eq. Valores esses que serão utilizados na projeção das análise de emissão.

Figura 11 - Emissões comparativas de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de um veículo elétrico a bateria (BEV) e um veículo com motor de combustão interna (ICE) de porte médio.

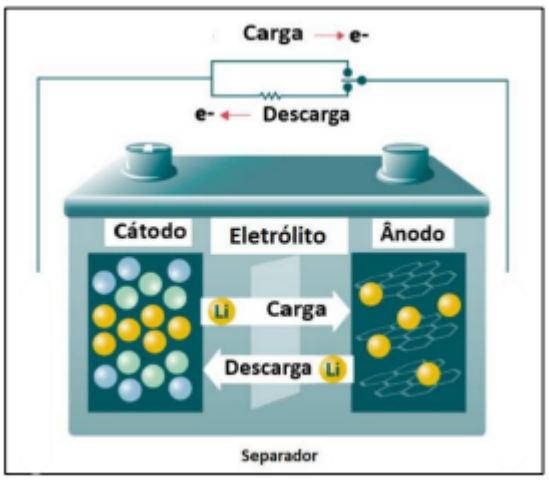


Fonte: IEA, 2021

2.3 BATERIAS

As baterias são compostas por três elementos: ânodo, cátodo e eletrólito (Figura 12). O primeiro exerce a função de tempo de recarga e a segurança da bateria. O segundo diz respeito a capacidade de armazenamento. E, por fim, o terceiro promove o transporte de íons entre os eletrodos e, ao se conectar externamente com os eletrodos, as reações de redução no cátodo e oxidação no ânodo promovem a reação de um fluxo de elétrons e corrente a ser utilizada (Martins; Souza, 2025).

Figura 12 - Bateria de íon-Lítio.



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

Alguns dos principais materiais que são misturados ao lítio para servir de cátodo são: óxido de lítio-cobalto (LCO); Lítio-manganês spinel (LMO); Fosfato de ferro-lítio (LFP), Lítioníquel-manganês-cobalto (NMC); Lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA) (Tabela 8).

Tabela 5 - Composição química e propriedades dos principais cátodos.

Cátodo	Composição Química	Capacidade (mAh/g)	Voltagem de Operação (V)
LCO	$LiCoO_2$	140	3,9
LMO	$LiMn_2O_4$	125	4,0
LFP	$LiFePO_4$	160	3,45
NMC	$LiNi_xMn_aCo_{1-x-a}O_2$	170	3,8
NCA	$LiNi_xCo_aAl_{1-x-a}O_2$	200	3,8

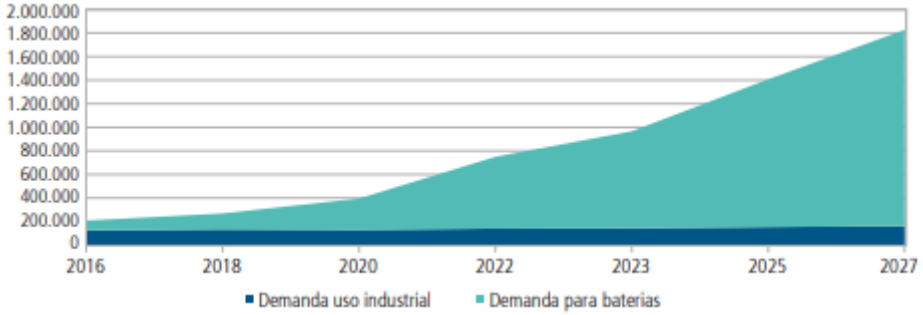
Fonte: Adaptado de Monteiro (2021).

Já, para os ânodos, o principal elemento é o grafite e, para os eletrólitos, utiliza-se misturas de sais de lítio, como como o LiPF6, LiBF4, LiCIO4 e LiSO2 que são dissolvidos em solventes orgânicos como o carbonato de propileno, carbonato de etileno ou dimetil sulfóxido (Moreira et al., 2024).

2.3.1 LÍTIO

Elemento metálico de menor densidade e maior eletropositividade da tabela periódica, tem crescido quase exponencialmente sua procura, como mostra a projeção na Figura 13, e em diversas áreas da indústria (Tabela 6).

Figura 13 - Evolução da demanda de lítio (t).



Fonte: BNDES, 2025.

Tabela 6 - Demanda de lítio por uso final (kt LCE).

FINALIDADE	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Demanda industrial (exceto baterias)	130	137	140	144	149	154	158	162
Vidro e cerâmica	64	66	68	71	73	75	78	80
Graxa lubrificante	20	22	23	23	24	25	25	26
Outros	46	49	49	50	52	54	55	56
Demanda para baterias	265	425	609	822	1.045	1.254	1.458	1.664
Veículos leves	180	322	493	686	887	1.069	1.246	1.423
Outros meios de transporte	22	25	27	30	33	36	39	41
Armazenamento estacionário	16	29	42	56	71	90	109	130
Eletrônicos portáteis	35	35	32	33	35	38	40	42
Outros	12	14	15	17	19	21	24	28
Total	**395**	**562**	**749**	**966**	**1.194**	**1.408**	**1.616**	**1.826**
Crescimento da demanda em relação ao ano anterior	28,1%	42,3%	33,3%	29,0%	23,6%	17,9%	14,8%	13,0%

Fonte: BNDES, 2025.

À medida que a demanda por lítio vem crescendo, países como Estados Unidos, Canadá, e Austrália têm se organizado para iniciar a produção do minério dentro do próprio território por meio de fomento a projetos. O objetivo é garantir a participação nesse mercado e condições competitivas para produção de baterias de veículos elétricos (BNDS, 2025). Conforme os dados da CRU Group International (2023b), foram mapeados 66 projetos de refinarias de lítio em implantação ou considerados prováveis no mundo. Grande parte concentra-se na China (50%). Outros países e blocos se aproveitam da oportunidade de desconcentração da produção em nível mundial, como é o caso da Argentina (10 projetos), Austrália (4 projetos), EUA (4 projetos), União Europeia e Coreia do Sul (três projetos cada).

Já o Brasil investe em exploração e produção de lítio, especialmente, após as restrições ao comércio internacional e o sucesso de investimentos em hidróxido de lítio no norte de Minas Gerais. A partir de 2022, 130 empresas iniciaram pesquisas de minério de lítio no país (BNDES,2025).

Abordando sobre a quantidade de CO2eq existente na produção do Lítio, segundo Freitas et al (2022), para produzir cada Gigawatt Hora (GWh) é gerado 94,0738 ton de CO2eq e, sabendo que o processo de produção de uma tonelada de carbonato de lítio são consumido 3,8 kwh, convertendo para potencial de aquecimento global, é gerado 0,36 kg de CO2eq/ton de carbonato de lítio produzido.

2.3.2 NÍQUEL E MANGANÊS

Níquel possui mercado consolidado, principalmente, para produção de aços inoxidáveis. Em virtude da aplicabilidade como cátodo em baterias, há projeções de crescimento de demanda do minério de 27% ao ano para os próximos cinco anos. Até 2027 espera-se que 28% da demanda total de níquel primário seja direcionado para baterias. (BNDES, 2025).

O Brasil se encontra entre os dez maiores produtores de níquel, além de deter a maior reserva mundial (USGS, 2024). O país possui grandes projetos e operação como Santa Rita, da Atlantic Nickel; Barro Alto, da Anglo American; e Onça Puma, da Vale, que é uma das maiores produtoras mundiais de níquel, também com grande volume de operações no Canadá.

A respeito do manganês, sua utilização em baterias de veículos elétricos é capaz de reduzir o volume de componentes de maior custo ou elevar a densidade energética, por exemplo, em bateria de lítio ferro fosfato (LFP) (BNDES, 2025).

O elemento é abundante na Terra, com produção e reservas estimadas em 20 Mt/ano, em 2023 e 2022, e 1900 Mt, respectivamente (USGS, 2024). No entanto, o uso destinado para baterias exige uma alta pureza do manganês, representando riscos para a cadeia de fornecimento. Segundo o relatório da BloombergNEF, de 2024, a demanda aproximada por manganês processado de alta pureza é três vezes maior para 2030 do que a prevista para a cadeia de produção. Dessa forma, assim como para o níquel, existem projetos de produção do minério em países como China (com 96% da produção global) e Austrália, Canadá e Chile com projetos incipientes. (Irena,2024).

O Brasil, no mercado de manganês, se posiciona entre as quatro maiores reservas do mundo (USGS,2023). A principal produtora do país é a Mineração Corumbaense Reunida (MCR), MTS, subsidiária da J&F e, no campo de pesquisa, há 4.100 autorizações de pesquisa do minério e 833 empresas atuando nessa fase, conforme consulta em novembro de 2023 aos dados abertos da ANM (2023b).

No processo de extração do níquel e manganês, segundo Freitas et al (2022), é emitido os valores apresentados abaixo na Tabela 7.

Tabela 7 - Emissão de CO2 em toneladas por tonelada de minério extraído.

Mineral	$tCO_2eq/t\ minério$
Manganês	0,00064
Níquel	0,0028

Fonte: adaptado de Freitas e Marchesini, 2022

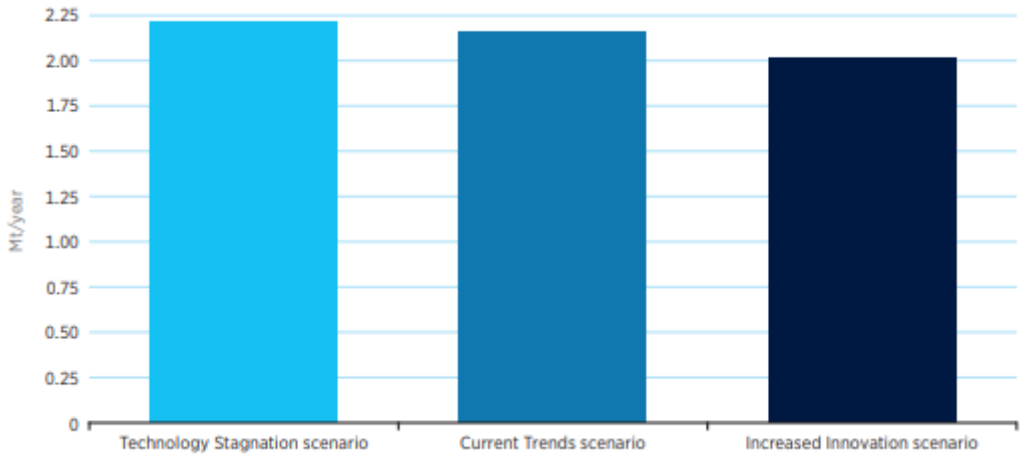
2.3.3 GRAFITE

O grafite é utilizado por todos os modelos de bateria, principalmente em ânodos (BNDES,2025). Considerando o grafite natural e sintético, o primeiro se destaca por ter baixo custo, alta capacidade e baixo consumo de energia com menor pegada de carbono. O segundo possui melhor desempenho quanto a velocidade de recarga e longevidade (Stibbs; Pan, 2023).

Com destino para baterias de VEs, é previsto para o grafite sintético um aumento de demanda de 11% em 2022 para o triplo em 2030, podendo alcançar de 4,5-5,2 Mt/ano (IRENA, 2024). Assim como os demais minerais, a produção de grafite também está concentrada, principalmente, com 35% na China, 21% no Japão, 15% na Europa e 14% na Índia.

Estudos mostram que, mesmo no cenário de avanço da tecnologia, manutenção ou estagnação (Figura 14), a demanda por grafite quase não será afetada devido a sua necessidade nos diversos modelos de bateria. Dito isso, no cenário de aquecimento global de 1,5ºC até 2030, o ideal seria priorizar a produção de grafite natural, uma vez que sua emissão de poluentes é significativamente menor comparado ao seu par sintético (IRENA, 2023; QY Research, 2023). Para isso, a transição em curso para ânodos com maior teor de silício e inovações emergentes são algumas soluções para não sobrecarregar o mercado de grafite. Além disso, a redução de emissões no processo de produção do grafite sintético também é considerada, aumentando, por exemplo, a eficiência energética, aumentando e explorando energias renováveis como biomassa e plástico reciclado (Surovtseva et al., 2022).

Figura 14 - Demanda por grafite sintético.

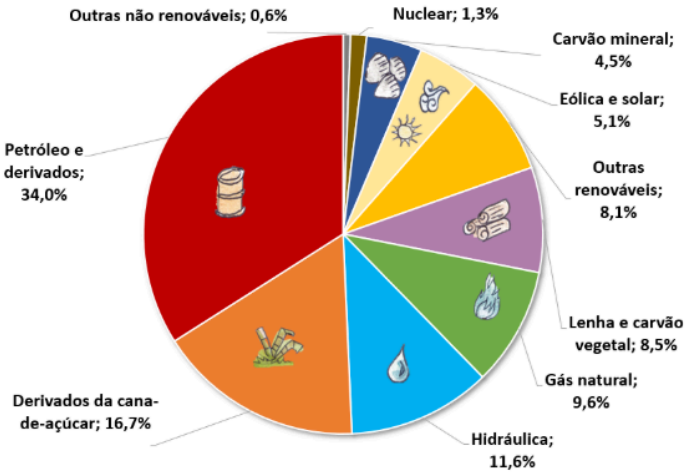


Fonte: IRENA, 2024.

2.4 ANÁLISE POÇO-A-RODA

Sem que haja a expansão do uso de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, não há uso estratégico da eletrificação da frota. Nesse contexto, o Brasil apresenta uma vantagem comparativa relevante, uma vez que sua matriz elétrica é predominantemente renovável. Segundo dados da EPE, as fontes renováveis representam cerca de 49% da matriz energética total (Figura 15) e aproximadamente 88% da geração de eletricidade no país, com destaque para as fontes hidráulica, eólica, solar e biomassa (BEN, 2024; MME, 2025).

Figura 15 - Matriz energética brasileira, 2024.



Fonte: EPE, 2024.

Atualmente, a energia eólica já representa cerca de 107,7 TWh de geração anual, enquanto a solar apresenta uma das maiores taxas de crescimento do setor, com aumento superior a 39% em um único ano (Neves, Lívia, 2026). No entanto, com a expansão dos veículos elétricos, existe a preocupação de sobrecarga da capacidade do sistema elétrico brasileiro, o que sugere uma oportunidade de crescimento das fontes eólica e solar para suprir o acréscimo causado pelos VEs Aoyague (2024). Segundo projeções da ONS (2024), há intenção de aumentar a participação das fontes citadas na capacidade instalada de 28,5GW para 34,7GW e 11,2GW para 23,3GW, respectivamente.

Nuwenhuis afirma que os veículos elétricos podem funcionar como uma tecnologia de smart grid para armazenar energia quando há oferta excedente no grid elétrico e repor no sistema nos horários de pico. Dessa forma, alivia a utilização da energia nos horários de pico, evitando que os VEs obtenham energia nesses horários.

Complementarmente, um estudo publicado em 2025 na revista Nature Publishing Group evidencia que o impacto ambiental dos veículos elétricos está diretamente condicionado à fonte de eletricidade utilizada em seu carregamento. A análise demonstra que a intensificação da participação de fontes renováveis, como solar e eólica, promove uma redução significativa no fator de emissão da eletricidade, resultando em menores emissões indiretas de CO_2 associadas aos veículos elétricos ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, o estudo destaca que a complementaridade entre essas fontes — com geração solar predominante durante o dia e eólica frequentemente mais intensa em períodos noturnos — contribui para tornar o fornecimento de energia mais estável e menos intensivo em carbono. Dessa forma, conclui-se que os benefícios ambientais da eletrificação do transporte são potencializados em sistemas elétricos com alta participação de energias renováveis, reforçando a importância da expansão dessas fontes para a efetiva descarbonização do setor (Deng et al, 2025).

Outro estudo avalia a possibilidade de carregamento exclusivamente a partir de energia solar off grid e via rede. De acordo com os resultados (tabela 8), o fator de eficiência ecológica ($0<\varepsilon<1$) do carregamento de veículos elétricos por meio da rede elétrica ($\varepsilon = 0,9441$) é superior à obtida com sistemas fotovoltaicos ($\varepsilon = 0,8987$). Esse resultado reflete o contexto específico da matriz elétrica brasileira, caracterizada por elevada participação de fontes renováveis, o que reduz significativamente a intensidade de carbono da eletricidade fornecida pela rede. Por outro lado, a menor eficiência associada ao sistema fotovoltaico pode ser atribuída aos impactos ambientais relacionados à fabricação dos painéis solares,

evidenciando a importância de análises de ciclo de vida na avaliação de tecnologias energéticas.

Tabela 8 - Fator ecológico por sistema de carregamento.

Electric Power System	Ecological Efficiency (ε)
Photovoltaic solar	0.8987
Grid	0.9441

Fonte: CASTRO et al, 2025.

Por fim, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis aponta que a transição energética no país ocorre de forma complementar, com a coexistência de combustíveis fósseis e renováveis, especialmente no setor de transportes. Sendo assim, a expansão dos veículos elétricos tende a potencializar os benefícios ambientais apenas quando associada a uma matriz elétrica de baixa intensidade de carbono, reforçando o papel das energias renováveis como elemento central na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

2.5 LEGISLAÇÃO

O país é signatário do Acordo de Paris, no qual assumiu metas de redução de emissões por meio de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (MMA, 2023), incluindo a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e a promoção de uma matriz energética mais limpa (UNFCC, 2015).

No âmbito nacional, diversas políticas têm sido implementadas para incentivar a mobilidade de baixo carbono. Destaca-se o programa Rota 2030 – Mobilidade e Logística, que estabelece diretrizes para eficiência energética e inovação no setor automotivo, além de incentivos fiscais para veículos menos poluentes. Mais recentemente, a Lei nº 14.993/2024, conhecida como Combustível do Futuro, integrou diferentes instrumentos de descarbonização, como o RenovaBio e o programa Mover, passando a incluir a eletricidade no cálculo da intensidade de carbono do setor de transportes (Brasil, 2024).

Além disso, o Brasil iniciou o processo de estruturação de um mercado regulado de carbono, com a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões, alinhado aos mecanismos do Acordo de Paris (Ministério da Fazenda, 2024). Esse conjunto de políticas busca promover a redução das emissões no setor de transportes, responsável por parcela

significativa das emissões energéticas nacionais, e estimular tecnologias mais limpas, como veículos elétricos e híbridos (Associação brasileira de energia eólica (ABEEÓLICA), 2025).

Nesse contexto, a eletrificação da frota surge como um dos principais vetores para o cumprimento das metas de descarbonização, especialmente quando associada a uma matriz elétrica de baixa intensidade de carbono. Assim, os incentivos regulatórios e os compromissos internacionais atuam de forma complementar, direcionando o país para uma transição energética gradual, porém consistente, no setor de mobilidade

2.6 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

Em uma análise de eficiência energética atual sobre a transação de carros à combustão para veículos elétricos, Onohara e Onohara (2022), afirmam que os veículos elétricos são mais eficientes e possuem menos perdas quando comparados aos convencionais. Enquanto carros à combustão conseguem converter de 10 a 15% de sua energia na forma de combustível, carros movidos eletricamente são capazes de converter de 70% a 90% de sua energia armazenada em bateria. No entanto, o estudo também aponta impactos ambientais igual ou maiores do que os causados por carros à combustão, devido à extração e refino de materiais existentes apenas em terras raras, assim como o altíssimo custo e tempo de vida útil das baterias ainda em desenvolvimento. Sendo assim, na visão dos autores , a popularização do veículo elétrico ainda está longe de acontecer (Onohara; Onohara, 2022).

Em consonância com o que foi exposto acima, Sousa et al (2024), acrescentam a importância do etanol enquanto veículos elétricos não são viáveis, principalmente, economicamente. Segundo os autores, o etanol é o menos nocivo dentre os combustíveis e já possui infraestrutura consolidada em todo o país. O estudo cita a absorção pela cana de açúcar de dióxido de carbono no processo de produção do biocombustível, considera já existe a infraestrutura necessária para automóveis a combustão e a variedades de modelos. A legislação também é favorável ao etanol ao oferecer um destino adequado para as baterias de chumbo ácido, uma forte vantagem em relação aos veículos elétricos.

Segundo Neder (2022), é necessário um sistema multimodal de transporte, que gere diferentes formas de transporte que se complementam, não que sejam concorrentes. A manutenção dos carros à combustão, como uma alternativa adicional para a transição na indústria automotiva, aliada à novas tecnologias é uma grande vantagem para o momento de mudanças climáticas. É possível inferir que a permanência dos carros à combustão possa se

apresentar como uma opção viável para uma mobilidade acessível, inclusiva e cada vez mais sustentável, conforme defendido por muitos.

Para ilustrar, Oliveira (2023) listou uma série de critérios de avaliação de compra de um veículo elétrico e à combustão interna e ponderou em pontos de 1 a 3, sendo 1 menos vantajoso, 2 vantajoso e 3 muito vantajoso, para cada um.

Tabela 9 - Comparativo geral entre Veículo elétrico X Veículo com motor a combustão interna.

FATORES	VE	VCI
CUSTO DE AQUISIÇÃO	1	3
CUSTO POR 100KM	3	1
MANUTENÇÃO	2	1
IMPOSTOS	1	1
AUTONOMIA	1	2
FATOR AMBIENTAL	3	1
PERFORMANCE	3	2
DEGRADAÇÃO DA BATERIA	1	3
REDE DE ABASTECIMENTO	1	3
SOMATÓRIO:	**16**	**17**

Fonte: Oliveira, 2023.

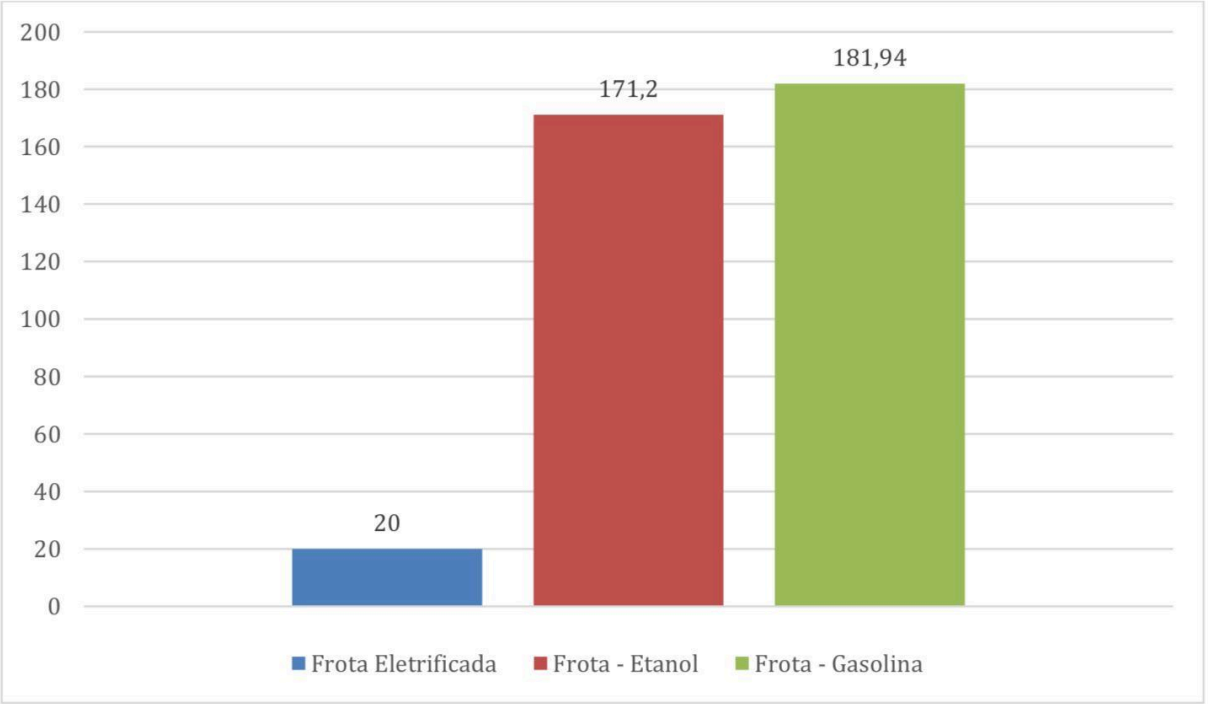
É interessante observar que há pouca diferença entre as duas modalidades, que por um lado mostra o grande potencial do veículo elétrico e, por outro, os motivos para a permanência do carro à combustão (Oliveira, 2023).

Onat et al. (2015) realizaram um estudo analisando veículos elétricos, por 50 estados dos Estados Unidos, considerando sua matriz geradora de energia, condições de conduta de cada região, e os impactos de produção. Foi constatado que, em 24 estados, veículos à bateria obtiveram a menor taxa de emissão de dióxido de carbono, enquanto veículos elétricos mostraram-se mais eficientes energeticamente.

Além disso, Moro e Loza (2018) concluíram, em seu estudo sobre emissão de CO2, na Europa, que VEs possuem uma redução de 50% a 60% de gases poluentes comparando com carros à combustão. O estudo considerou a geração de energia elétrica para veículos elétricos, a qual, quando provinda de fontes fósseis, a diferença de emissão entre VEs e carros à combustão é praticamente nula. Dessa forma, a eletrificação da mobilidade urbana depende fortemente de uma matriz elétrica renovável para que seja sustentável.

Em um estudo de caso, Caldeira (2024), simulou a troca de combustível e a troca da frota de veículos à combustão interna para elétricos de uma usina metalúrgica no interior de São Paulo, obtendo a Figura 16.

Figura 16 - Emissões de CO2 anual por combustível utilizado.



Fonte: Caldeira, 2024.

Sua conclusão foi uma redução de 89% na emissão de CO2eq comparando o cenário de frota à gasolina e à energia elétrica. Caldeira enfatizou que a frota seria abastecida na própria empresa, havendo a necessidade de implementação de pontos de recarga.

2.7 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL

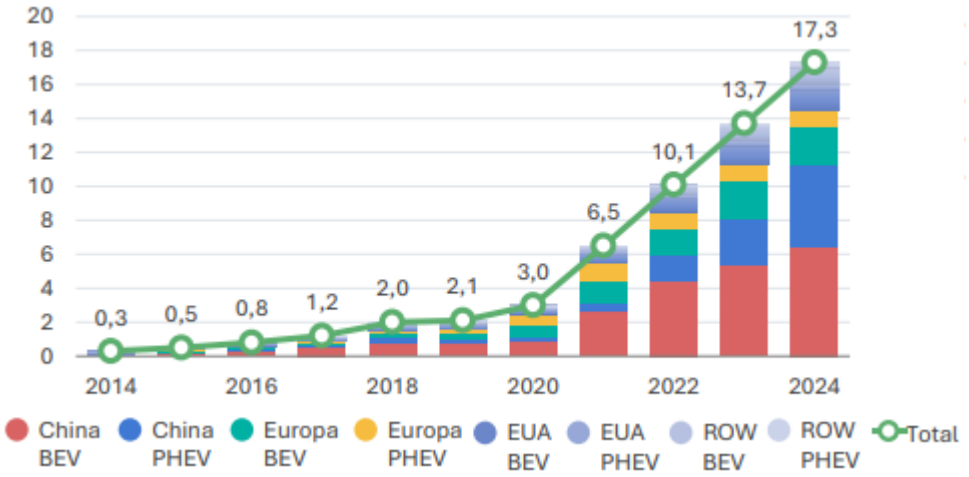
Com o objetivo de avaliar a quantidade de poluentes emitidos, convertidos para CO2eq , para possíveis realidades futuras, o estudo propõe-se a projetar três cenários de penetração do veículo elétrico no mercado automotivo da região metropolitana de São Paulo. A simulação permitirá uma análise quantitativa de taxa de adoção versus emissão de CO2eq baseada em dados da ANFAVEA, ABVE, EPE e DETRAN,SP.

3 TAXA DE CRESCIMENTO E PENETRAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS DA FROTA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Contextualizando globalmente a adoção de veículos elétricos, segundo o Estudo do Plano Decenal de Expansão de Energia 2035, observa-se uma tendência de eletrificação mundial dos veículos leves (Figura 17). Em 2024, as vendas de automóveis elétricos

superaram 17 milhões de unidades, excedendo, ao menos, 3,5 milhões comparado com o ano de 2023, o que representa 25% de aumento (EPE, 2025).

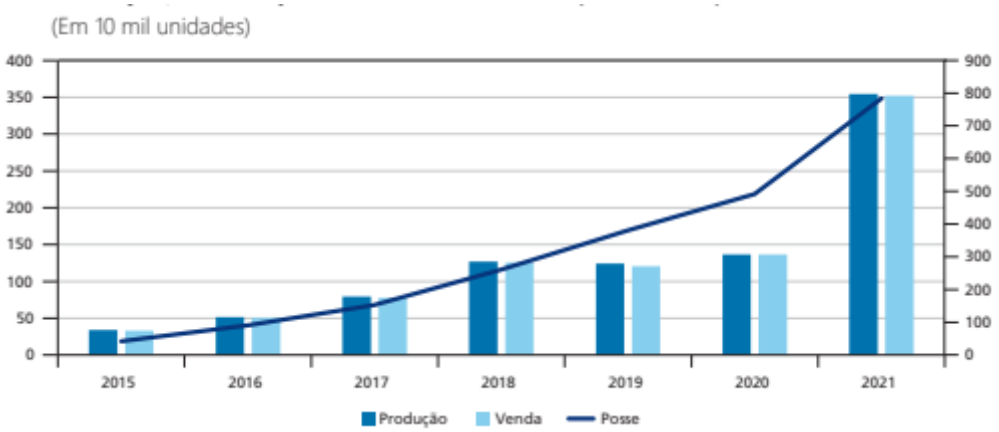
Figura 17 - Vendas mundiais de automóveis elétricos (milhões de unidades).



Fonte: IEA, EV Outlook, 2025.

A China vem se destacando no mercado com 96% de sua produção concentrada em seu território, também pelas suas atuais vendas e projeções de 36% de sua frota elétrica para 95% até 2030, além de definir como meta de descarbonização de 65% até 2030 e neutralidade de dióxido de carbono equivalente até 2060 (ANFAVEA,2024). A Figura 18 representa a evolução de venda e produção à esquerda e posse à direita. É possível perceber um crescimento contínuo desde 2015, mas vale salientar que foi estabelecido o fim do apoio estatal ao segmento a partir de 2019 até 2022 (LI, 2022).

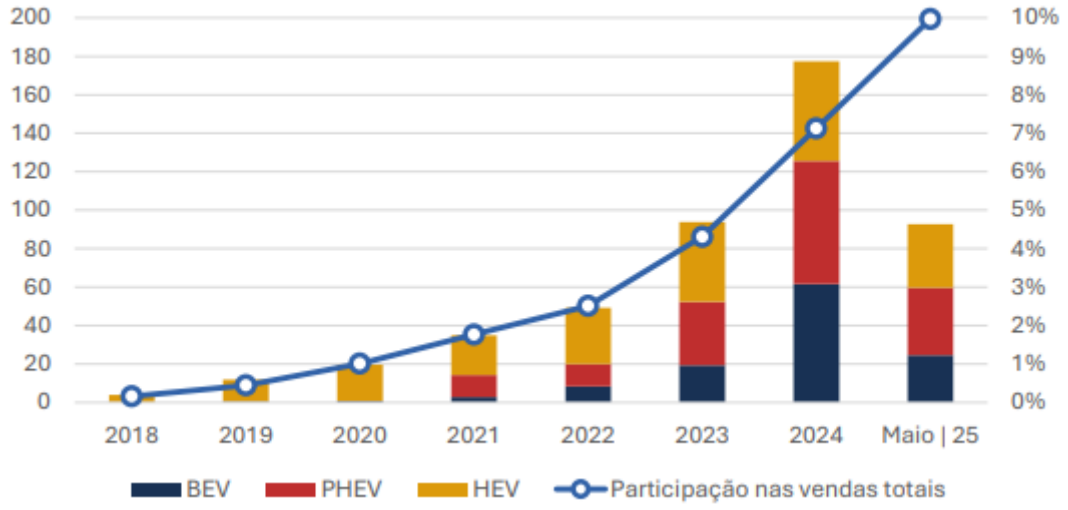
Figura 18 - Produção, venda e posse de VEs na China (2015-2021).



Fonte: Qianzhan Industrial Research Institute (2022),IPEA, 2023.

No Brasil, a expectativa de crescimento do mercado é um rápido aumento na participação das vendas totais (Figura 19). Comparando com 2023, em 2024 as vendas de eletrificados aumentaram 89%, com destaque para o crescimento de 219% dos BEVs. (EPE, 2025).

Figura 19 - Venda de veículos eletrificados no Brasil e participação nas vendas totais (mil unidades, %).

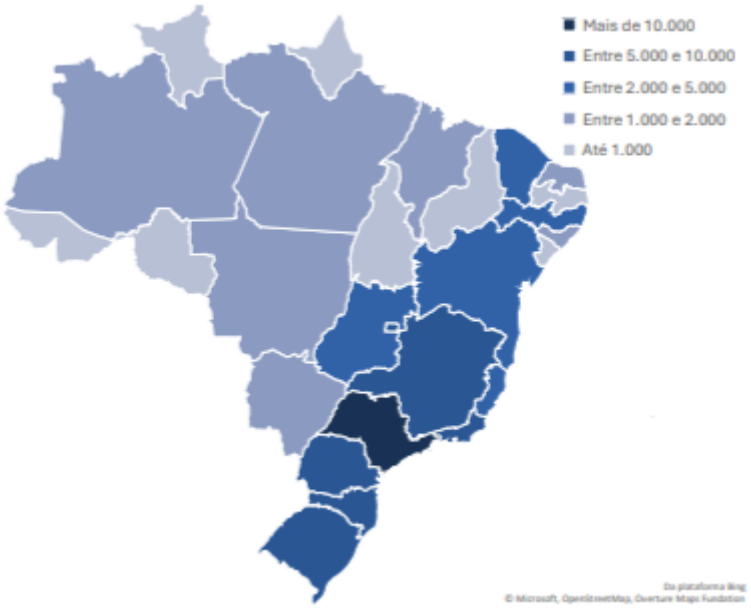


Fonte: EPE, 2025.

Conforme a definição da IEA (2025), os *Battery Electric Vehicles* (BEVs) são veículos totalmente elétricos, sem motor de combustão interna. Os *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEVs) pertencem à categoria dos veículos híbridos e combinam um motor a combustão com um motor elétrico, cuja bateria pode ser recarregada por meio de uma fonte externa de eletricidade (plug-in). Já os *Hybrid Electric Vehicles* (HEVs) também combinam um motor elétrico e um motor a combustão, porém sua bateria é recarregada exclusivamente pelo motor a combustão e pelo sistema de frenagem regenerativa.

Além do aumento de vendas no país, existe também a concentração regional de maior incidência de veículos elétricos. Atualmente, o Estado de São Paulo é onde acumula mais de 10.000 unidades, sendo esse o maior índice registrado no Brasil (Figura 20). Por um lado, um dos motivos da maior concentração regional de VEs é a existência de uma forte relação entre PIB dos Estados e venda acumulada em cada unidade federativa entre 2022 e 2024. Por outro, também há de ser considerado os incentivos tributários como reembolso da quota-parte do IPVA/SP nos 5 primeiros anos de tributação incidente ao veículo (EPE, 2025).

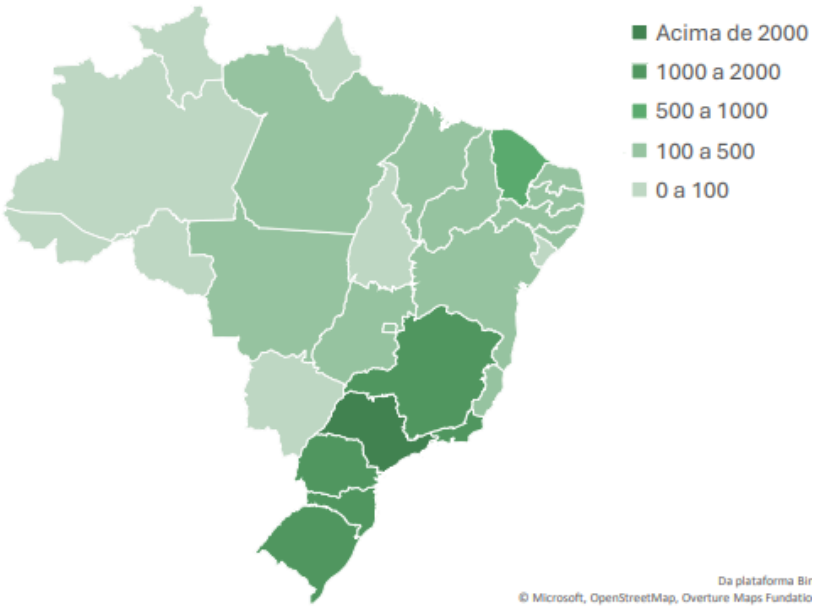
Figura 20 - Venda média anual de veículos eletrificados por Estado (2022 – 2024).



Fonte: EPE, 2025.

E, uma vez que o Estado de São Paulo possui o maior volume de veículos elétricos, o Estado, obrigatoriamente, também possui maior infraestrutura para acomodação dos VEs (Figura 21), como eletropostos. São Paulo possui 30% dos eletropostos do país. A importância da infraestrutura de carregamento, em especial de recarga rápida, é estabelecer uma conveniência de tempo de espera e aumentar a atratividade dos veículos elétricos (EPE,2025).

Figura 21 - Infraestrutura de carregamento por Estado.



Fonte: ABVE, 2025.

É importante ressaltar que os motivos para aumentar a adoção da eletrificação da frota passam por melhoria e oferta de infraestrutura, como instalação de eletropostos de rápida recarga, e redução do custo do veículo e da bateria por incentivos governamentais e à produção nacional. No entanto, o presente estudo se limitará a analisar a emissão de dióxido de carbono equivalente a partir, exclusivamente, do crescimento da frota total de veículos e de penetração de veículos elétricos ao longo dos anos.

Atualmente, a frota circulante da Região Metropolitana de São Paulo é composta, majoritariamente, por veículos flex-fuel (segundo relatório de descarbonização da ANFAVEA, 2024, representam 90% dos carros à combustão e, por isso, irá ser trabalhado apenas esse tipo de combustível) e os veículos eletrificados representam 0,91% do total apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Frota circulante.

Automóvel por combustível	Unidades
Elétrico (BEV)	1.567,00
Híbrido (HEV)	11.742,00
Híbrido Plug-in (PHEV)	11.143,00
Flex Fuel	2.673.169,00
Total	2.697.621,00

Fonte: Adaptado de Detran, 2026

Segundo projeção da ANFAVEA, 2024, a frota nacional aumentará de 46 milhões de automóveis em 2025 para 52 milhões em 2030 e 71 milhões em 2035. No entanto, o mesmo estudo mostra que os veículos flex-fuel não alteram em quantidade, mantendo-se quase constante ao longo do período citado. Em contrapartida, os veículos eletrificados tendem a aumentar sua presença na frota. Além disso, também é verificado uma tendência percentual de crescimento dos veículos elétricos, híbridos e híbridos plug-in (Tabela 11), a qual será utilizada para projetar o cenário de crescimento dos VEs.

Tabela 11 - Taxas de crescimento.

Cenários/Ano	2026	2030	2035
Atual	2%	2%	2%
Gradual	2%	9%	20%
Acelerado	2%	10%	25%

Fonte: própria autora, baseado em ANFAVEA, 2024

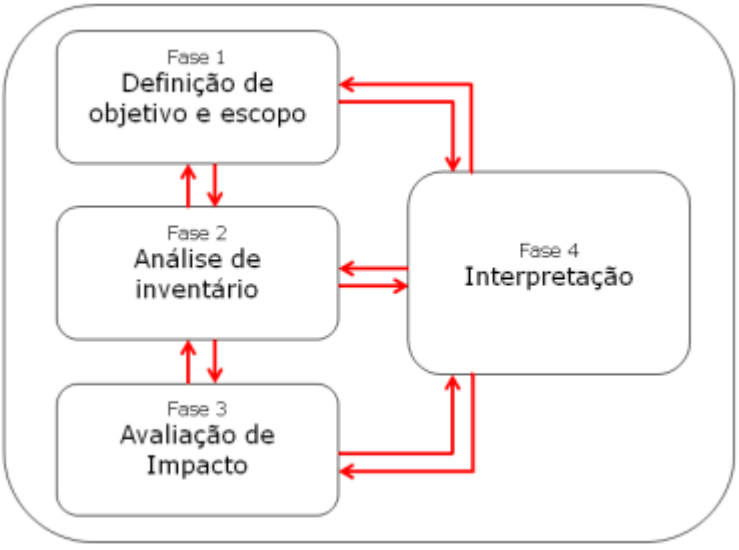
4 METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

A Análise do Ciclo de Vida (LCA) é uma metodologia consolidada que permite avaliar os impactos ambientais de produtos ou sistemas desde a extração de matérias-primas até seu descarte final, abrangendo fases como manufatura, uso/consumo e fim de vida (cradle-to-grave). Essa abordagem tem sido amplamente aplicada para comparar o desempenho ambiental de tecnologias concorrentes no setor automotivo, incluindo Veículos de Combustão Interna (ICEVs), híbridos, veículos elétricos a bateria e veículos com células a combustível. A aplicação da LCA em estudos de veículos oferece uma visão holística que evita conclusões enviesadas baseadas apenas nas emissões de uso (como “tank-to-wheel”), porque incorpora emissões embutidas na produção de materiais e componentes (por exemplo, baterias de íons de lítio), bem como no tratamento de resíduos e reciclagem no fim de vida (Oluwalana; Grzesik, 2025).

É possível esquematizar a organização geral da metodologia como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Estrutura metodológica da Avaliação de Ciclo de Vida.



Fonte: adaptada de ABNT (2014a)

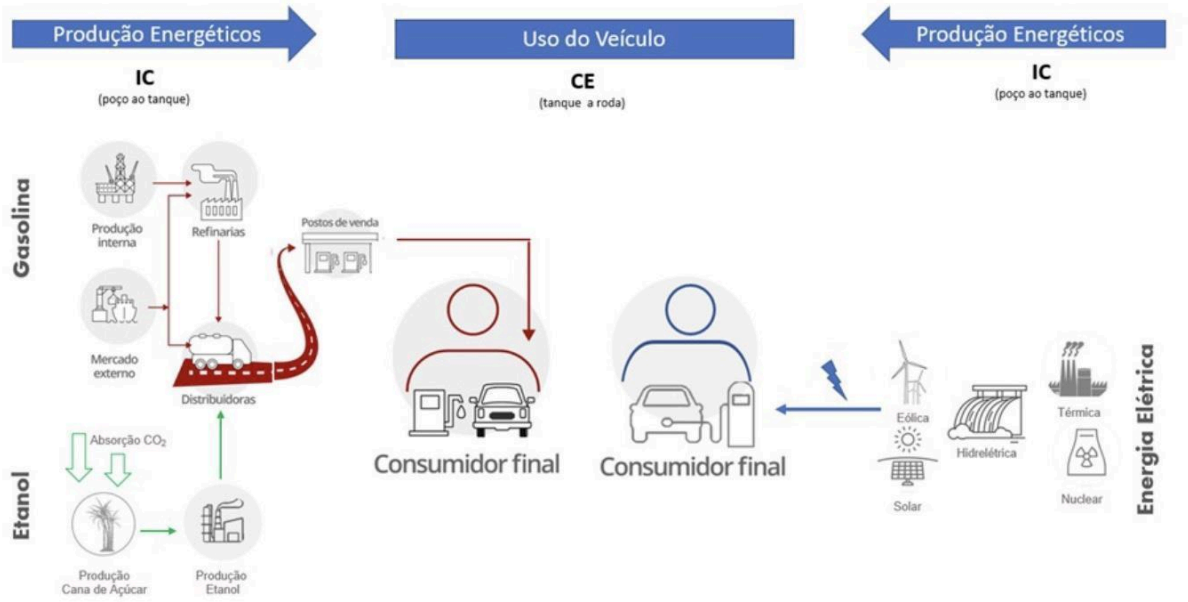
A definição e escopo do trabalho são definidos na primeira fase do estudo. Em seguida, os elementos contribuintes às atividades estudadas, no caso de produção de biocombustível e de veículo elétrico, são estudados (análise de inventário) e, então, convertidos em impactos ambientais (avaliação de impacto), sempre sendo relacionado à

unidade funcional do sistema. E, por fim, os resultados são analisados e interpretados a fim de exibi-los para as partes interessadas.

4.2 MÉTODO DO POÇO-A-RODA

Com objetivo de estudar as emissões de gases do efeito estufa durante todo o ciclo de vida da gasolina e etanol, utilizar-se-á o método de análise do poço-a-roda. O método baseia-se no estudo de emissões nas fases de produção do combustível, transporte, distribuição e consumo por combustão. Sendo assim, uma das maneiras de organizar a análise é dividindo-a em duas etapas: a primeira delas sendo a do poço ao tanque- etapa de produção- e a segunda do tanque à roda- consumo. Já, para analisar o ciclo de vida de um veículo elétrico, considera-se também a fonte geradora de energia elétrica, a produção, manutenção e descarte do veículo. Abaixo está representada, esquematicamente, a síntese dos objetos de análise do método brevemente discutido (Associação Brasileira de Engenharia Automotiva-AEA, 2022).

Figura 23 - Fluxo do método de análise do poço-a-roda.



Fonte: Cartilha “do poço-a-roda”, AEA, 2022.

A ABEA disponibiliza uma cartilha com o cálculo para emissão de dióxido de carbono equivalente (equação 1 e 2), de veículos elétricos e à combustão, baseado no método do poço-a-roda, considerando a intensidade de carbono dos energéticos no Brasil. Foram utilizados os anexos indicados pela cartilha, mas também os dados da Tabela do Programa de

Etiquetagem Veicular - PBEV (ANEXO A) e do INMETRO, 2023, obtendo as Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Dados fixos.

	HB20	BYD Dolphin
Consumo energético [MJ/km]	1,48	0,47
Autonomia flex etanol cidade [km/L]	9,6	-
Autonomia flex gasolina cidade [km/L]	13,3	-
Autonomia flex etanol estrada [km/L]	10,4	-
Autonomia flex gasolina estrada [km/L]	14,6	-

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2023.

Tabela 13 - Dados variáveis.

	2020	2027	2032
Intensidade de carbono etanol hidratado [CO2/MJ]	28,52	24,63	21,61
Intensidade de carbono gasolina [CO2/MJ]	77,52	76,9	76,44
Intensidade de carbono [CO2/MJ]	31,77	22,58	26,62
FU	28%	38%	38%

Fonte: Adaptado da Cartilha Poço-a-Roda, AEA, 2022.

Para veículo elétricos:

$$CO_2eq = CE * IC \quad \text{(Eq.1)}$$

Para automóveis a combustão:

$$CO_2eq = CE_{E100} * IC_{E100} * FU + CE_{E22} * IC_{E22} * (1 - FU) \quad \text{(Eq.2)}$$

Em que:

CO_2eq = dióxido de carbono equivalente

CE_{E100} =consumo energético de etanol

IC_{E100} = intensidade de carbono de etanol

FU = fator de utilização

IC_{E22} =intensidade de carbono gasolina

CE_{E22} = consumo energético gasolina

Os dados da tabela 12 foram retirados do INMETRO (2023), a qual não possui projeção de dados. Por essa razão foram considerados dados fixos. Diferentemente da tabela 13, em que há alteração dos dados até 2032 e, por isso, foram nomeados como “dados variáveis”.

4.2.1 Indicadores para o inventário

De acordo com a ISO 14040/14044 e órgãos reguladores consultados como INMETRO e ANP-RenovaCalc, foram estipulados os seguintes indicadores.

Tabela 14 - Indicadores

Indicador	Unidade
Unidade funcional	1 quilômetro (1km)
Combustível	L
Consumo de combustível	L/km
Energia total	MJ/km
Emissões de dióxido de carbono equivalente	tCO2eq
Eficiência energética	MJ

Fonte: próprio autor.

A escolha de indicadores é relevante para que haja uma padronização das unidades a serem tratadas. No caso da unidade funcional, é interessante utilizar 1 quilômetro (1km) rodado, uma vez que será analisado também o quanto o automóvel percorre em sua vida útil, considerada de 150.000km.

4.2.2 Definição dos objetos de estudo

Como referência para a análise, foi considerado a tabela de 2025 do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), que avalia o desempenho energético e as emissões de poluentes de veículos novos, para definir o modelo e a versão do carro, alinhando também o modelo novo mais vendido e acessível no ano de 2025 com base no ranking da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRE) por região, nesse caso para o Estado de São Paulo, município de São Paulo. Dessa forma, foram escolhidos o

modelo HB20, versão Sense e motor 1.0-12v da marca Hyundai para veículo a combustão e o modelo BYD Dolphin como elétrico.

Figura 24 - Veículos selecionados para o estudo. (a) HB20 sense 1.0-12v Hyundai e (b) BYD Dolphin.





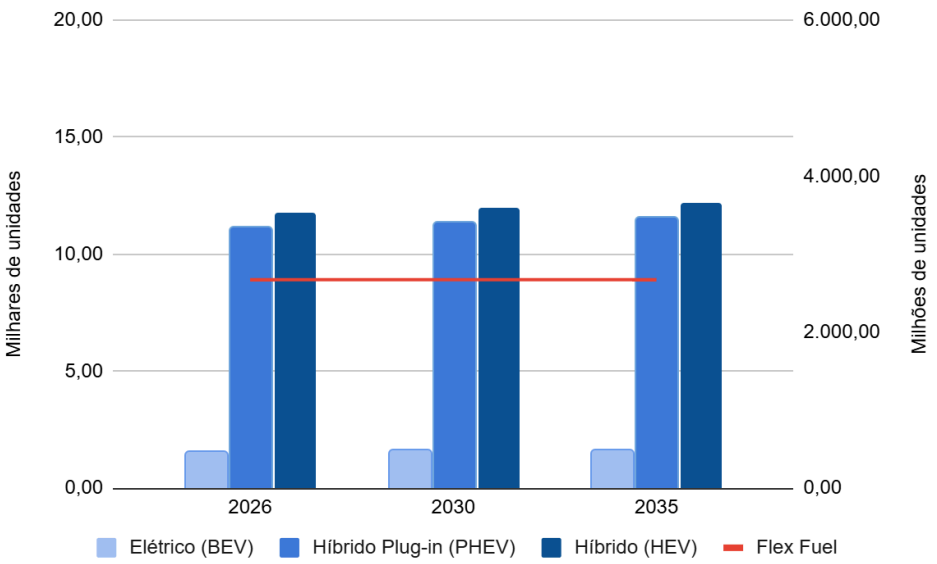
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do trabalho foram coletados dados para embasar o estudo de emissão de dióxido de carbono equivalente (ou potencial de aquecimento global) por meio de análise de ciclo de vida do poço-a-roda e projeção de cenários de penetração dos veículos elétricos na frota da Região Metropolitana de São Paulo.

Analisando a frota atual da RMSP, por meio de dados do DETRAN SP, é nítido que carros à combustão são predominantes, em específico os modelos flex-fuel, que representam 90% dos ICEs. Já a quantidade de automóveis eletrificados leves para passeio corresponde a uma ínfima parte da frota, com 0,91% apenas. No entanto, as estimativas de aumento dos VEs são de crescimento contínuo para os próximos dez anos baseado em dados da ANFAVEA, 2024 e EPE, 2025.

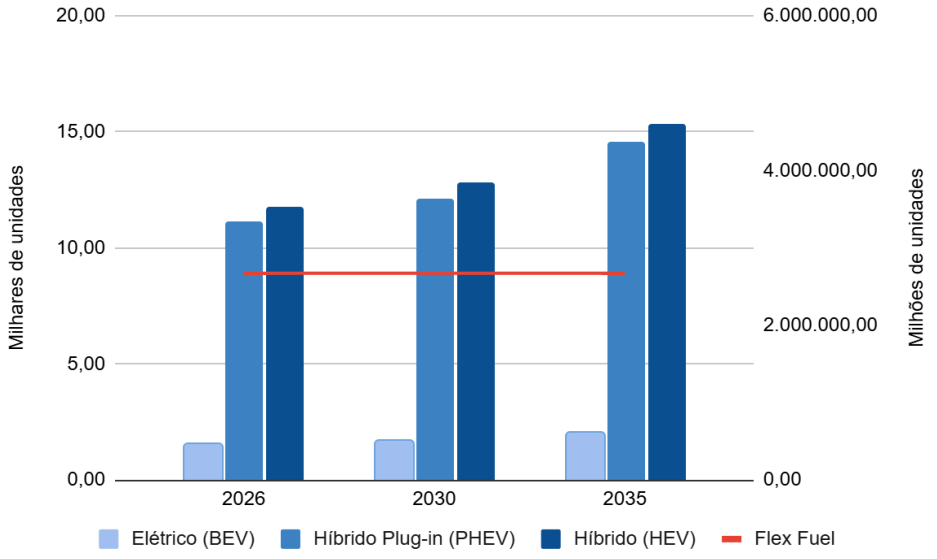
Abaixo está a construção da projeção de cenários baseado nas taxas de crescimento (Tabela 11) da frota eletrificada à esquerda e à combustão à direita. O primeiro gráfico (Figura 25) refere-se à estagnação do crescimento atual de 2%. Já o segundo, Figura 26, representa o crescimento gradual, saindo de 2% em 2026 e progredindo para 9% e 20% em 2030 e 2035, respectivamente. Por fim, o terceiro, Figura 27, esboça um crescimento acelerado de 10% e 25% para 2030 e 2035.

Figura 25 - Projeção de crescimento estagnado .



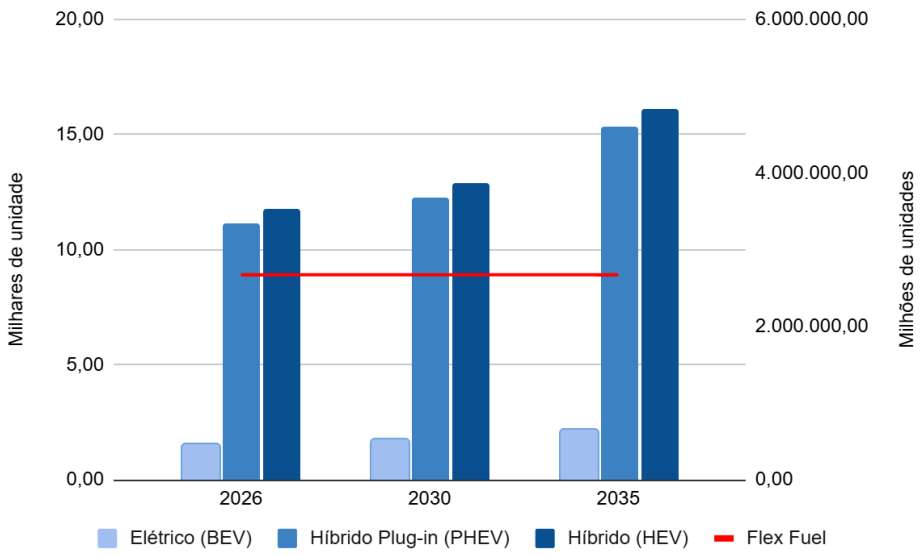
Fonte: próprio autor

Figura 26 - Projeção de crescimento gradual.



Fonte: próprio autor

Figura 27 - Projeção de crescimento acelerado.

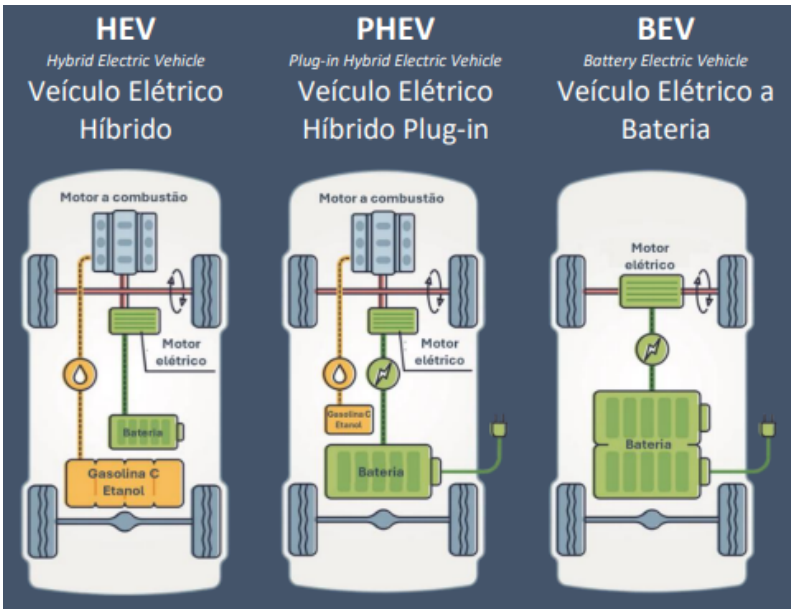


Fonte: próprio autor

Vale ressaltar que, nas projeções estudadas em nível nacional, não houve alterações significativas na quantidade de veículos flex-fuel em 10 anos, apesar do crescimento da frota como um todo. Por isso foi considerado um crescimento retilíneo. A esse comportamento, pode-se interpretar uma estabilidade no mercado de ICEs e aumento da participação total das vendas de VEs.

Outro fator que deve ser comentado é que a ordem de crescimento dos modelos de veículos elétricos é compatível com os níveis de transação necessários. Em um primeiro momento, a utilização de HEV, que se recarrega pelo sistema de frenagens e, principalmente, pelo reabastecimento de combustível, é mais eficiente em razão da incipiente edificação da infraestrutura para comportar a nova frota, com foco em eletropostos e tempo de recarga. A partir do momento de maior autonomia oferecido pela ampliação da nova infraestrutura, é possível considerar o PHEV como opção, uma vez que o carregamento é externo e sua bateria é maior, exigindo menos combustível, o que agrega mais para a descarbonização urbana. Por fim, o veículo 100% elétrico seria o nível máximo de descarbonização da frota, tendo seu motor livre de combustível e biocombustível (Figura 28).

Figura 28 - Categorias de eletrificados.



Fonte: EPE, 2024.

Ademais, considerando, para o BYD Dolphin e HB20 especificados anteriormente, os dados de consumo energético, a intensidade de carbono no período de 2020, 2027 e 2032, densidade energética, fator de uso de etanol por energia e autonomia dos veículos à combustão na cidade e na estrada, foi possível projetar as emissões dos anos citados respectivamente nos gráficos a seguir.

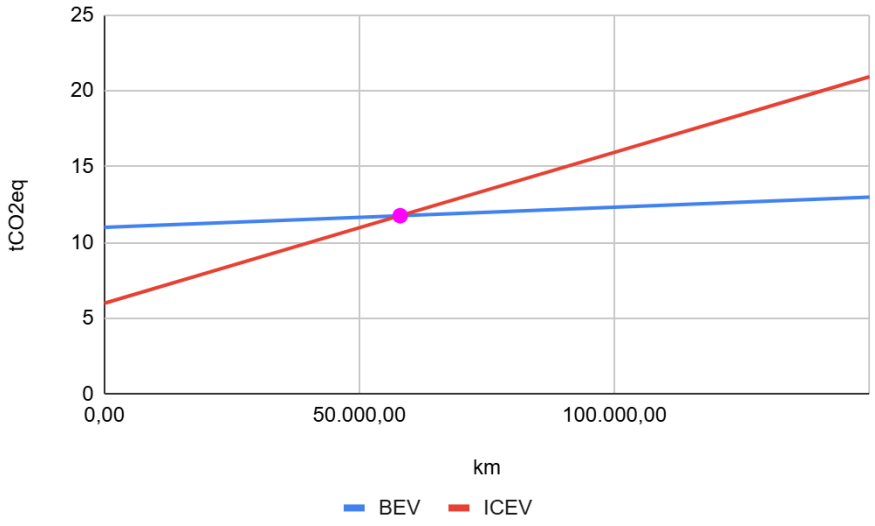
Atualmente a etapa de poço-ao-tanque do veículo elétrico corresponde a 30%-40% de seu ciclo de vida poço-a-roda. Já a mesma etapa para o ICEV corresponde a 20%. Conforme é apresentado no estudo da IEA, 2021,existe uma diferença de 2 tCO2eq na frase de produção de ambas as modalidades de automóveis. O carro à combustão emite 6 tCO2eq, enquanto o veículo elétrico emite 11tCO2eq.

Já, na parte de consumo, por meio da metodologia da cartilha da AEA,2022, os papéis se invertem. O carro à combustão emite 8 tCO2eq a mais que o VE (20,94 tCO2eq e 13 tCO2eq, respectivamente), 62,10% de diferença. Esse dado é bastante representativo, uma vez que, quando comparado as divergências entre as fases de produção e consumo, principalmente, as emissões do ICEV superam substancialmente as do VE. Isso evidencia, portanto, que a queima de combustíveis fósseis, particularmente, é danosa ao meio ambiente e caminha contrário às metas de descarbonização.

Caso haja uma estagnação do avanço da penetração dos veículos elétricos na malha automotiva urbana e da tecnologia implantada, conclui-se que não haverá redução dos gases de efeito estufa significativa. Além disso, a tendência de crescimento da frota é sempre

crescente, conforme projeção da ANFAVEA 2024, aumentando emissões conforme mostra a projeção de 2020.

Figura 29 - Emissões em 2020.

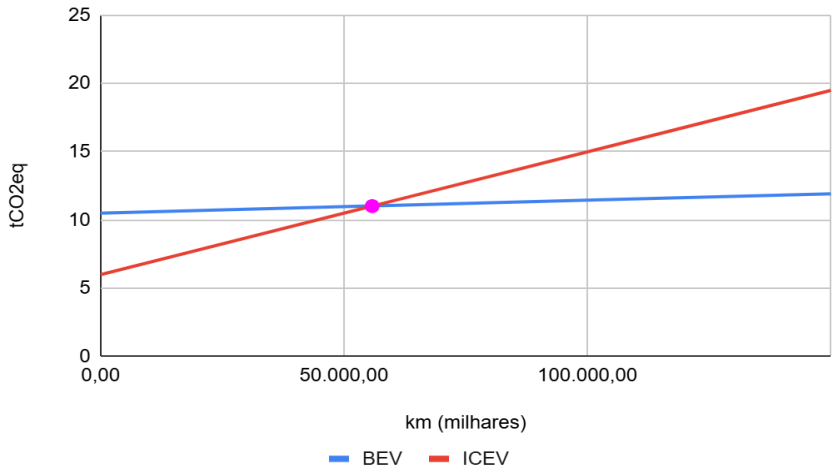


Fonte: próprio autor

Já, para 2027 em relação a 2020, existe uma redução total de GEE dos ICEVs de 7,44%. Mas é importante ressaltar que a emissão da fase de sua produção foi padronizada como 6 tCO2eq . Além disso, o ponto de break-even, comparando ambas as projeções, também foi reduzido. Anteriormente as emissões se igualavam em 58.000 km. Na figura 30, há igualdade em 55.800 km. Isso pode significar um avanço para os eletrificados, uma vez que suas emissões ao longo de sua vida útil é quase 2x menor que os da ICEV e quanto menor o break-even mais competitivo são os VEs.

Quanto aos veículos elétricos, houve um declínio dos GEEs de 1 tCO2eq em seu ciclo de vida total. Comparando as figuras 30 e 31, fica nítida a diferença de uma 1 tCO2eq a menos emitida. O motivo para esse resultado é explicado pela redução da intensidade carbono de 31,77 C02/MJ para 26,62 C02/MJ, simulado pela AEA. No caso dos VEs, a intensidade de carbono é proveniente da matriz elétrica utilizada em sua recarga. Quanto menos poluente for a matriz, mais competitivo ficam os eletrificados .A produção, novamente, também é importante de analisar. Houve redução de 11 tCO2eq para 10,5 tCO2eq.

Figura 30 - Projeção de emissões em 2027.



Fonte: próprio autor

Em 2032, os carros à combustão não apresentaram mudança significativa (alterando de 19,94 tCO2eq para 19,04 tCO2eq), o que reforça a gravidade da estagnação representada na análise do gráfico 4. No entanto, o BEV atingiu seu menor índice de emissão de GEEs, alcançando 9,68 tCO2eq total e 8 tCO2eq em sua produção, segundo projeção do IEA,2021. O número de 8 tCO2eq representa uma evolução acelerada da tecnologia para a bateria, quase equiparando as emissões consumo a de produção.

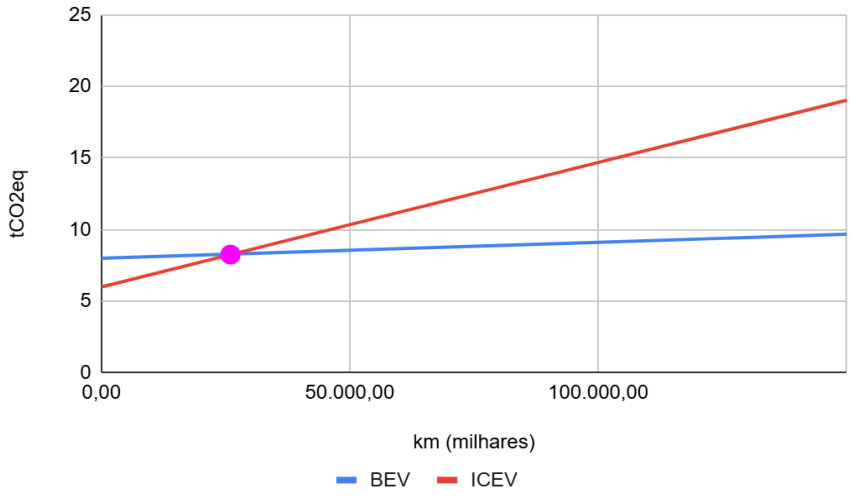
O resultado supracitado explicita o cerne da emissões dos veículos elétricos, a produção de baterias. Nesse momento, comparativamente às emissões de 2020, é exibido um avanço impressionante e otimista, permitindo visualizar um cenário em que, se a queima de fósseis fosse reduzida ao máximo possível, ambientalmente falando, a região metropolitana de São Paulo seria, expressivamente, menos poluída, com menos ruídos e com melhor qualidade do ar. Além de o objetivo da meta de descarbonização também ser tangível.

Outro fato importante a ser analisado é, novamente, o break-even de 26.000 km. De 2027 para 2032, houve uma redução de 29.800 km na igualdade de emissões. O dado, como dito anteriormente, é relevante para a competitividade do setor elétrico na frota automotiva quando é discutido o caráter ambiental do transporte.

Complementarmente, o biocombustível possui um papel fundamental na pegada de carbono, uma vez que, é um dos recursos energéticos para veículo leve com uma das menores pegadas de carbono do mundo (UNICA, 2023). Por isso, ao longo da análise de ciclo de vida, foi enfatizado sobre a danosidade da queima da gasolina, por mais que o estudo trabalhou

com um veículo flex-fuel.A análise de etanol e veículos elétricos exige um estudo a parte deste de tamanha importância.

Figura 31 - Projeção de emissões em 2032.



Fonte: próprio autor

Por fim, relacionando a penetração de mercado com a redução de emissões, fica claro a necessidade de celeridade no processo de, principalmente, de incentivos fiscais e construção de uma infraestrutura forte para que o mercado de veículos elétricos tenha oportunidade de crescimento no Brasil. Em relação às emissões em 10 anos, há um significativo avanço. No entanto, a penetração no mercado ainda é lenta e necessitada.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a redução de emissões de gases do efeito estufa a partir do aumento de veículos eletrificados na frota da Região Metropolitana de São Paulo. Era esperado que houvesse um crescimento constante e, consequentemente, redução constante das emissões. Em relação a evolução da frota, foi constatado uma lenta penetração no mercado automotivo, no entanto, para as reduções foi observada uma rápida evolução em 10 anos.

A frota de São Paulo é a maior do país, o que favorece o desenvolvimento acelerado da eletrificação urbana, como aumento de eletropostos de carregamento rápido e incentivos fiscais para diminuir os custos para o mercado consumidor. No primeiro momento são essas as medidas para expandir a circulação de veículos elétricos, em especial os HEVs (com

participação inferior do motor elétrico). Com a Região Metropolitana de São Paulo estruturada para a nova frota, seria possível aumentar a participação do motor elétrico no automóvel por meio do aumento de PHEV, com sua bateria maior e carregamento plug-in e menor necessidade de abastecimento por combustível. E, por fim, estabelecendo plenas condições estruturais e fiscais para manutenção da eletrificação da frota, pode-se instituir o veículo elétrico para atingir o compromisso de descarbonização até 2050.

Pelos resultados obtidos sobre a penetração de veículos elétricos na frota, é possível inferir que, nos 10 anos observados, a transição está engatinhando. Para avançar nesse cenário seria necessário maior fomento a pesquisas em tecnologias, principalmente, para reduzir custos e emissões da produção da bateria e maior incentivo fiscal para aumentar a adoção no mercado automotivo.

Em relação às emissões, foi observado uma redução significativa do VEs ao longo dos anos, de 13 toneladas de dióxido de carbono equivalente para 9 toneladas de dióxido de carbono equivalente, possibilitando break-even menor. Foi observado que, para esse resultado, é importante priorizar uma matriz elétrica com menor índice de emissões possíveis, devido à intensidade de carbono utilizada nos cálculos. E também priorizar a redução do impacto da produção das baterias. Ademais, a quantidade de VEs na frota é fundamental, mas totalmente dependente das iniciativas governamentais e redução de custo das baterias.

A respeito dos carros à combustão, esses estão enraizados na frota de forma que seu crescimento é permanente e extremamente significativo, marcando o maior volume. Sua permanência imutável na frota significa um distanciamento das metas de descarbonização acordadas no Acordo de Paris.

No entanto, é interessante ressaltar que os biocombustíveis, como o etanol, são tão importantes quanto a eletrificação da frota com intuito de diminuir os gases poluentes. Já os veículos elétricos são intimamente ligados a sua fonte de energia e materiais utilizados para sua produção. Sua emissão de GEE já alcança níveis reduzidos em relação a ICEVs, mas podem ser menores se sua fonte de energia for a de menor intensidade de carbono e com maior autonomia da bateria.

Dessa forma, concluí-se que o trabalho atingiu o objetivo esperado. Há uma redução representativa das emissões de CO2eq, por meio da eletrificação dos automóveis da frota urbana da RMSP, mas sem que seja de forma a substituir os movidos a combustíveis e biocombustíveis. Como explicou Nascimento (2022), citado anteriormente, é necessário um sistema multimodal de transporte, que gere diferentes formas de transporte que se complementam, não que sejam concorrentes.

REFERÊNCIAS

ABVE – Associação Brasileira de Veículos Elétricos. **Geografia da eletromobilidade**. Disponível em https://abve.org.br/bi-geografia-da-eletromobilidade/. Acesso em abr 2025.

ABVEData, **Eletropostos**. Disponível em https://abve.org.br/abve-data/bi-eletropostos/. Acesso em ago 2025.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). **Usinas renováveis dominaram a expansão da matriz elétrica em 2025**. Disponível em: https://www.gov.br/aneel. Acesso em: abr 2025.

Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sistema de Cadastro Mineiro**, 2023. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/sistema-de-cadastro-mineiro. Acesso em: abr 2025.

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painel Dinâmico Relatório Revenda**. Disponível em https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODBmZmMwOGItYmI3NC00NzI3LTg1OTQtNDgwN2FhOTU2OWZmIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkxMyJ9. Acesso em ago 2025.

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), **RenovaBio**. Disponível em https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio. Acesso em ago 2025.

AIE, **Veículos Elétricos**. Disponível em https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles. Acesso em ago 2025.

Andrade et al, Life Cycle Emissions Analysis: Direct Comparison Between Combustion Vehicles, Using Fossil and Renewable Fuels, With Electric Vehicles. **Brazilian Society of Automotive Engineering** - SIMEA 2023. Disponível em: https://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/simea2023/PAP65.pdf. Acesso em abr 2025.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **2° Anuário de mobilidade elétrica do Brasil**. Disponível em https://pnme.org.br/biblioteca/2o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica-pnme/. Acesso em abr 2025.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Avançando nos caminhos da descarbonização automotiva no Brasil.** Disponível em https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/09/Anfavea-Avancando-nos-Caminhos-da-Descarbonizacao-2024-Publicacao.pdf. Acesso em abr 2025.

Aoyague, H.Y.S. **Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente.** Disponível em https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6a0a709a-9f17-48db-9486-ba00443d7948/content. Acesso em abr 2025.

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Implementação dos mecanismos de mercado do Acordo de Paris: ajustes correspondentes e oportunidades para o Brasil**. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2025/05/EstudoABEEolica_08052025a.pdf. Acesso em abr 2025.

AEA - Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. **Cartilha do poço à roda**. Disponível em https://www.aea.org.br/home/wp-content/uploads/2024/05/AEA_CARTILHA-CALCULO-POCO-RODA.pdf. Acesso em jan 2025.

BloombergNEF, **Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to $115 per Kilowatt-Hour: BloombergNEF**. Disponível em https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/. Acesso em set 2025.

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento, **Oportunidades na cadeia de materiais minerais para baterias de veículos elétricos**. Disponível em https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/27389/1/PRCapLiv_216301_Oportunidades%20na%20cadeia%20de%20materiais%20minerais_.pdf. Acesso em abr 2025.

Brasil, **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br. Acesso em abr 2025.

Brasil, **Rota 2030 – Mobilidade e Logística**. Disponível em: https://www.gov.br/mdic. Acesso em abr 2025.

Caldeira, K.B.M., **Avaliação da Sustentabilidade de Veículos Elétricos no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química. 2024. Disponível em https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/c976a1ad-c08b-4a1e-a6f6-2b5c6a11c48e/content#page54. Acesso em fev 2025.

Castro et al, Electric vehicles powered by renewable energy: economic and environmental analysis from the Brazilian perspective. **Sustainability**, v. 17, n. 7, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17072847. Acesso em abr 2025.

Cavagliano, L. **Análise da viabilidade técnica e econômica da substituição de veículos a combustão interna por veículos elétricos e veículos elétricos híbridos no Brasil**. Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d5da0beb-c2fd-4c53-9297-eaa8201cc41a/content. Acesso em fev 2025.

CRU Group International. **Lithium market outlook**. [S.l.]: CRU Group International, 2023. Disponível em https://www.crugroup.com/en/commodities/lithium/. Acesso em abr 2025.

Deng et al, Observing the impact of renewable electricity on the emission factors of electric vehicles. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 15, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-26528-6. Acesso em abr 2025.

Detran.SP, **Frota.** Disponível em https://www.detran.sp.gov.br/detransp?id=frota_dados. Acesso em jul 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda de Energia dos Veículos Leves: 2023-2032**. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-656/NT-EPE-DPG-SDB-2022-09_Demanda_Ve%C3%ADculos_Leves_2023-2032.pdf. Acesso em ago 2025.

EPE– Empresa de Pesquisa Energética. **Estudo do Plano Decenal de Expansão de Energia 2035**. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/PDE%202035_Caderno_Eletromobilidade.pdf. Acesso em abr 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2024**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: abr 2025.

FGV Energia. Carros elétricos. **Cadernos FGV Energia.** ano 4, n. 7. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf. Acesso em: abr 2025.

Freitas et al, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos. **Produto & Produção**, vol. 23, n.3, p. 1-20. 2022. Disponível https://bdlis.ibict.br/bitstream/lis/224/1/guilherme90%2c%2bPaper%2b1.pdf. Acesso em abr 2025.

GHG Protocols, **The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition)**. Disponível em: https://ghgprotocol.org/corporate-standard. Acesso em maio 2025.

Goldie-Scot. A behind the scenes take on lithium-ion battery prices. **BloombergNEF**. 2019. Disponível em: https://about. bnef. com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices. Acesso em ago 2025.

IEA – International Environmental Agency. **Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle**. 2021. Disponível em https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle?utm_source=chatgpt.com. Acesso em abr 2025.

IEA – International Environmental Agency. **Global EV Outlook**. 2019. Scaling-up the transitions to electric mobility, 2019. Disponível em: https://www.iea.org/publications/reports/cglobalevoutlook2019/. Acesso em set 2025.

IEA – International Environmental Agency. **Global EV Outlook.** 2025. Paris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025. Acesso em: abr. 2026.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Ondas de calor são resultados das alterações climáticas nos últimos 60 anos**. Disponível em https://portal.inmet.gov.br/noticias/ondas-de-calor-s%C3%A3o-resultados-das-altera%C3%A7%C3%B5es-clim%C3%A1ticas-nos-%C3%BAltimos-60-anos. Acesso em jul 2025.

IPCC – International Panel of Climate Change**. Sexto Relatório de Avaliação do IPCC**. Disponível em https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/technical-summary/. Acesso em ago 2025.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Indicadores Quantitativos da OCDE e o Brasil: comércio aberto e investimentos**. Disponível em http://dx.doi.org/10.38116/9786556350769cap3. Acesso em ago 2025.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Veículos elétricos: como a china está se preparando para se tornar a maior potência mundial do segm**. Disponível em https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/6e0dd4ba-8373-4217-91a2-899c3b3ef21b/content. Acesso em abr 2025.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Batteries for electric vehicles**. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Critical_materials_Batteries_for_Evs_2024.pdf. Acesso em abr 2025.

ISO. **ISO 1404: 2025** (en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Disponível em: iso.org https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:37456:en. Acesso em jan 2025

Kester et al, Public perceptions of electric vehicles and vehicle-to-grid (V2G): Insights from a Nordic focus group study. **Transportation Research Part D**, v. 74, p. 277–293, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.006. Acesso em ago 2025

Li et al, The Role of Government in the Marketplace for Electric Vehicles: Evidence from China. **Journal of Policy Analysis and Management**, v. 41, n. 2, p. 450-485, 2022. Disponível em https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pam.22362. Acesso em ago 2025.

Martins; Souza. **Carros elétricos e meio ambiente: uma análise do ciclo de vida da bateria dos carros elétricos e seu impacto ambiental**. Trabalho Associação de Graduação apresentado à Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica. Disponível em https://repositorio.aedb.br/jspui/bitstream/123456789/224/1/Carros%20el%c3%a9tricos%20e%20meio%20ambiente%20-%20uma%20an%c3%a1lise%20do%20ciclo%20de%20vida%20da%20bateria%20dos%20carros%20el%c3%a9tricos%20e%20seu%20impacto%20ambiental.pdf. Acesso em abr 2026.

Mera, et al. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil**. 2023. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-PORT-v4.pdf. Acesso em maio 2025.

Ministério da Fazenda. **Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE).** Disponível em: https://www.gov.br/fazenda. Acesso em: abr 2025.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mma. Acesso em abr 2026.

MME – Ministério de Minas e Energia; **Brasil gera 88% da sua energia elétrica a partir de fontes renováveis**. Disponível em: https://www.gov.br/mme. Acesso em: abr, 2026.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Álcool completa 49 anos com impactos positivos na economia e no meio ambiente**. Disponível em https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-do-alcool-completa-49-anos-com-impactos-positivos-na-economia-e-no-meio-ambiente. Acesso em jul 2025.

Monteiro, R.S. Novas químicas de materiais para as baterias de lítio impulsionam o mercado de veículos elétricos. **MIT Technology Review**. Disponível em: https://mittechreview.com.br/novas-quimicas-de-materiais-para-as-baterias-de-litio-impulsionam-o-mercado-de-veiculos-eletricos/?srsltid=AfmBOoppHLmnsFYiyLeXsgEozzmRQv0Tvx6cDEe6NvweTnvXzJHklcrx. Acesso em abr 2025.

Moreira et al, Reciclagem de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas. **Brazilian Journal of Production Engineering**. 10(1):36-52. 2024. Disponível em: https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42817. Acesso em abr, 2026.

Moro; Lonza, Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. **Transp Res D Transp Environ**, Oct:64:5-14, 2018. Disponível em https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30740029/. Aceso em dez, 2025

Moura, F.V.G. **A Importância Etanol Brasileiro no Contexto de Mitigação das Mudanças Climáticas.** Monografia apresentada ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia como pré-requisito a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas. Disponível em https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/35679/1/Import%c3%a2nciaEtanolBrasileiro.pdf. Acesso em ago, 2025

Nações Unidas Brasil. **Sobre nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Disponível em https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em jul, 2015.

Nações Unidas. **Brasil teve 10 eventos climáticos extremos em 2024**. Disponível em https://news.un.org/pt/story/2025/03/1846766#:~:text=No%20Brasil%2C%20foram%20reportados%2010,mercados%20de%20todo%20o%20pa%C3%ADs. Acesso em jul de 2025.

Neder, T.N. **Desafios e perspectivas da transição na indústria automotiva**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. 2022. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4329/6/MONOGRAFIA_DesafiosPerspectivasTransi%C3%A7%C3%A3o.pdf.Acesso. Acesso em janeiro de 2025.

NOEL, et al, Understanding the socio-technical nexus of Nordic electric vehicle (EV) barriers: A qualitative discussion of range, price, charging and knowledge. **Energy Policy**, v. 138, p. 111292, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111292.

Nuwenhuis, Alternative business models and entrepreneurship: The case of electric vehicles. **International Journal of Entrepreneurship and Innovation**, 19(1), 33-45. doi: 10.1177/1465750317752885. Acesso em abr 2025.

OECD, **Companion to the inventory of support measures for fossil fuels 2021**. Disponível em: https://doi.org/10.1787/ e670c620-en. Acesso em ago 2025.

Oliveira, J.L.R. **Cenário atual do mercado internacional e nacional dos veículos elétricos (VE).** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/73910/3/2023_tcc_jlroliveira.pdf. Acesso em: fev 2025.

Oluwalana, O.J.; Grzesik, K. A Systematic Review of Life Cycle Assessment of Electric Vehicles Studies: Goals, Methodologies, Results and Uncertainties. **Energies**, 18(22), 5867, 2025. Disponível em https://www.mdpi.com/1996-1073/18/22/5867. Acesso em nov 2025.

Onat, N.C.; Kucukvar, M.; Tatari, O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? Life cycle assessment based comparison of energy and greenhouse gas emissions. **Applied Energy**, July 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275100213_Conventional_hybrid_plug-in_hybrid_or_electric_vehicles_State-based_comparative_carbon_and_energy_footprint_analysis_in_the_United_States. Acesso em 02/2025.

Onohara, E.Y.; Onohara, M.M. Comparações entre a eficiência energética de carros elétricos e carro à combustão: uma análise dos impactos socioambientais e financeiros. **Revista de Empreendedorismo e Gestão de Micro e Pequenas Empresas**. v.7, n.1, p.73-92, Jan/Abr. 2022. Disponível em: https://revistas.editoraenterprising.net/index.php/regmpe/article/view/439/657. Acesso em fev 2025.

ONS, **PEN 2024**. Disponível em https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Apresentação%20PEN%2024.pdf. Acesso em abr 2025.

QY Research. **Global synthetic graphite market research report 2023**. Disponível em www.qyresearch.com/reports/909670/synthetic-graphite. Acesso em abr 2025.

Ribeiro, M.S.S. **O papel da coerência regulatória para o desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga de veículos elétricos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso do MBA em Governança e Controle da Regulação - ENAP, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista. Disponível em https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/8363/1/TCC%20MAGNO.pdf#page20. Acesso em ago 2025

Rodríguez, T.B.; Consoni, F.L. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. Revista Brasileira de Inovação. n.19, 2020. Disponível em: DOI: https://doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658394 . Acesso em abr 2025.

Ruoso, A. C. **Estudo de elementos que influenciam a difusão de veículos elétricos**. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/291118/001244298.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page53. Acesso em abr 2025.

Severis, R. M. **Sensibilidade de impactos ambientais potenciais às escolhas metodológicas na Avaliação do Ciclo de Vida**. Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor em Engenharia Ambiental. Disponível em https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/255034/PGEA0766-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Acesso em jan 2025.

Sistemas de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG), **Emissão de GEE (2023) São Paulo**. Disponível em https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/sao-paulo. Acesso em jul 2025.

Sousa, et al, Análise da viabilidade econômica e ambiental de veículos elétricos, híbridos e de combustão no Brasil. **Revista de Administração do UNIFATEA - RAF** / v26, nº2, Jul. - Dez. 20. Disponível em http://revistas.unifatea.edu.br:8081/seer/index.php/raf/article/view/577/503. Acesso em jan 2025.

Stolf, R.; Oliveira, A.P.R. The success of the brazilian alcohol program (proálcool) - a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. **Eng. agríc. (Online)**, v. 40 (2), ed. Mar-Apr, 2020. Disponível em https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p243-248/2020. Acesso em ago 2025.

Surovtseva, et al, “Toward a life cycle inventory for graphite production”. Disponível em **Journal of Industrial Ecology**, v. 26/3, p. 964–79, https://doi.org/10.1111/jiec.13234. Acesso em abr 2025.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), **Acordo de Paris. Paris Agreement. Paris**. Disponível em: https://unfccc.int. Acesso em: 26 abr. 2025.

UNICA, **“Etanol”.** Disponível em https://unica.com.br/setorsucroenergetico/etanol/. Acesso em mar 2023.

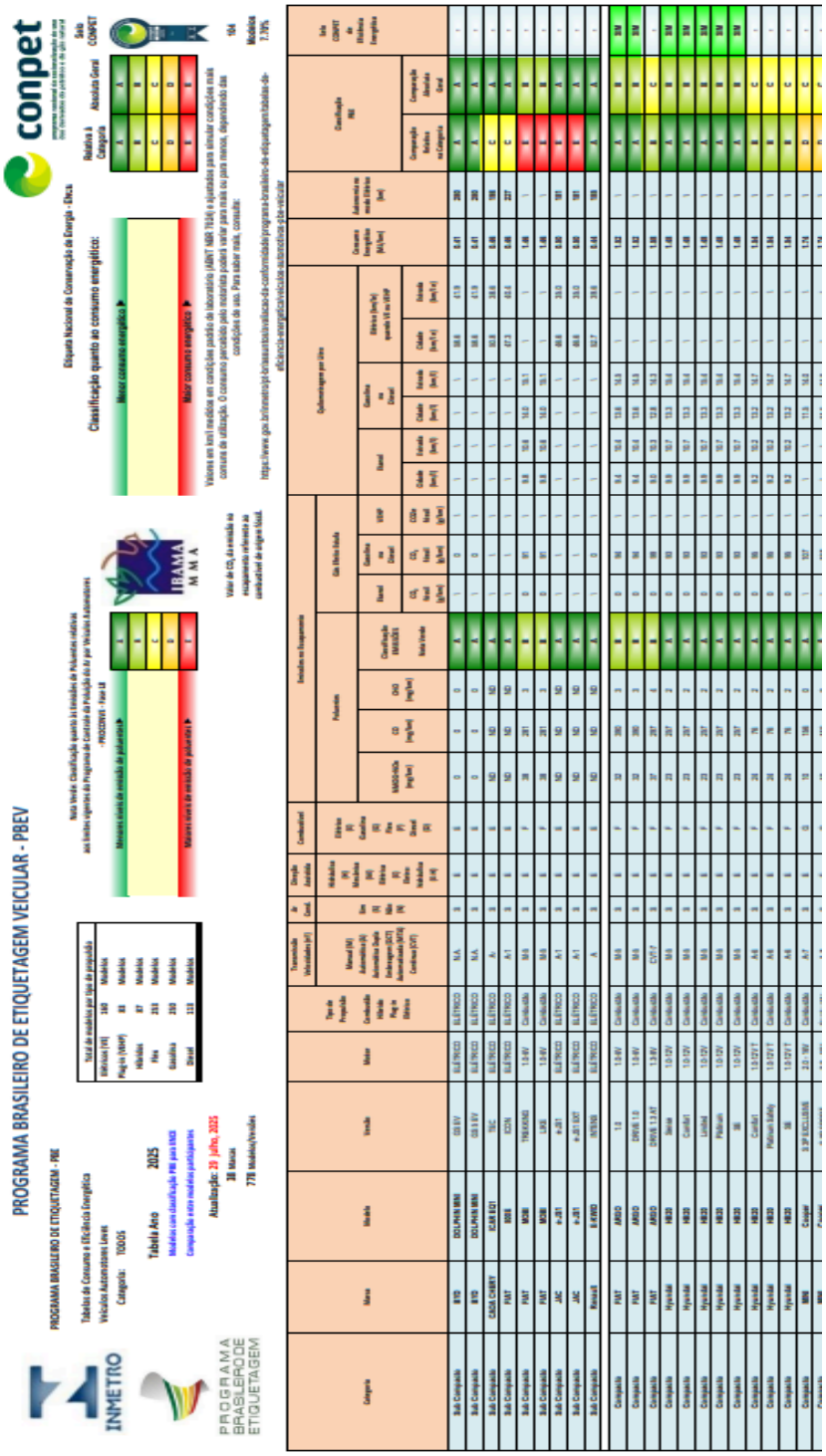
USGS. **Mineral Commodity Summaries**. 2024. Disponível em https://doi.org/10.3133/mcs2024. Acesso em 2024.

Vasconcellos, L.H.R. O Dilema Verde: o que descobri sobre carros elétricos após um ano pesquisando sua produção. **Portal FGV**. Disponível em https://portal.fgv.br/artigos/o-dilema-verde-o-que-descobri-sobre-carros-eletricos-apos-um-ano-pesquisando-sua-producao. Acesso em set 2025.

World Bank. **The Role of Government in the Market for Electric Vehicles: Evidence from China**. Disponível em: https://documents.worldbank.org/. Acesso em: jul 2025.

ANEXO A

Tabela 4 - Tabela PBEV



Fonte: INMETRO, 2023.