

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

MARIA BERTAZZO SANTANA DA SILVA

**ANÁLISE DO CENÁRIO NACIONAL DE VEÍCULOS
ELETRIFICADOS FRENTE À APLICAÇÃO DO ETANOL EM
PROPULSORES HÍBRIDOS**

SÃO CARLOS
2024

MARIA BERTAZZO SANTANA DA SILVA

**ANÁLISE DO CENÁRIO NACIONAL DE VEÍCULOS ELETRIFICADOS
FRENTE À APLICAÇÃO DO ETANOL EM PROPULSORES HÍBRIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica
pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Turra de Ávila

SÃO CARLOS

2024

MARIA BERTAZZO SANTANA DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Turra de Ávila

Data: ____ / ____ / 2025

Aprovado ()

Reprovado ()

Orientador

Prof. Dr. Márcio Turra de Ávila

Universidade Federal de São Carlos

DEMec/CCET/UFSCar

Prof. Dr. Osmar Ogashawara

Universidade Federal de São Carlos

DEE/CCET/UFSCar

Prof. Dr. Sérgio Henrique Evangelista

Universidade Federal de São Carlos

DEMec/CCET/UFSCar

Dedico este trabalho a Ângela, Isis e Helena, pelo apoio e carinho durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, que não mediu esforços para que eu pudesse realizar um sonho. As amigas Ellen, Isabela, Nicole, Mariana e Gabriela, sendo essenciais para que os momentos fossem mais leves e divertidos. Aos amigos João Henrique e Renan, que me ajudaram desde o início. Juliana e Lucas, que mesmo distantes, estiveram presentes, fornecendo amparo e motivações diárias. Ao João Pedro, companheiro que não mediu esforços para demonstrar seu carinho e que divide não só a vida, como também a profissão comigo.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beauvoir

RESUMO

A busca por novas tecnologias para um futuro mais sustentável no setor automotivo tem sido amplamente discutida, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O setor de transportes é um dos principais contribuintes para essas emissões, tornando essencial a reformulação dos sistemas de propulsão e a transição para fontes de energia mais limpas. Para acelerar essa mudança, diversos países têm implementado políticas e regulamentações ambientais mais rigorosas, incentivando a adoção de tecnologias sustentáveis. Nesse contexto, a eletrificação veicular e o uso de biocombustíveis surgem como alternativas viáveis para mitigar os impactos ambientais dos transportes. O Brasil, em particular, se destaca pelo potencial das matrizes energéticas limpas e dos biocombustíveis, como etanol, que já desempenha um papel significativo nessa mudança. Diante disso, este trabalho buscou analisar o cenário nacional de transição energética no setor automotivo, considerando a viabilidade do etanol como uma solução sustentável para a mobilidade. Para isso, foram realizadas a análise do ciclo de vida dos combustíveis e a avaliação do mercado e da infraestrutura disponível para biocombustíveis e veículos eletrificados. Também foram discutidos os desafios e oportunidades da ampliação do uso do etanol, considerando aspectos econômicos, ambientais e tecnológicos. O estudo pretendeu contribuir para a compreensão do papel dos biocombustíveis na redução da poluição e no cumprimento de metas de sustentabilidade no setor de transportes no Brasil.

Palavras-chave: Etanol. Análise do ciclo de vida. Veículos elétricos. Bateria.

ABSTRACT

The search for new technologies for a more sustainable future in the automotive sector has been widely discussed, driven by the need to reduce greenhouse gas emissions. The transportation sector is one of the main contributors to these emissions, making essential to reformulate propulsion systems and transition to cleaner energy sources. To accelerate this change, several countries have implemented stricter environmental policies and regulations, encouraging the adoption of sustainable technologies. In this context, vehicle electrification and the use of biofuels emerge as viable alternatives to mitigate the environmental impacts of transportation. Brazil stands out for its potential in clean energy sources and biofuels, such as ethanol, which already plays a significant role in this transition. Given this, this study aimed to analyze the national energy transition scenario in the automotive sector, considering the feasibility of ethanol as a sustainable mobility solution. To achieve this, it employed life cycle analysis of fuels, as well as an assessment of the market and available infrastructure for biofuels and electrified vehicles. The challenges and opportunities of expanding ethanol use were also discussed, considering economic, environmental, and technological aspects. This study intended to contribute to the understanding of the role of biofuels in reducing pollution and achieving sustainability goals in Brazil's transportation sector.

Keywords: Ethanol. Life cycle analysis. Electric vehicles. Battery.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Motor Ciclo Diesel de 4 tempos
- Figura 2.2 – Configuração de um BEV
- Figura 2.3 – Tipos de veículos elétricos
- Figura 2.4 – Configuração do HEV
- Figura 2.5 – Configuração do PHEV
- Figura 2.6 – Evolução da comercialização de veículos eletrificados
- Figura 2.7 – Infraestrutura de recarga de EV no Brasil
- Figura 2.8 – Emplacamento de eletrificados por estado
- Figura 2.9 – Consumo final de energia por setor
- Figura 2.10 – Consumo energético no Brasil
- Figura 2.11 – Distribuição de metais para baterias pelo mundo
- Figura 2.12 – Esquema da análise de ciclo de vida
- Figura 2.13 – Emissões de GEE do ciclo de vida de veículos médios comercializados no Brasil em 2023
- Figura 2.14 – Veículo a combustão interna: Torque x Potência
- Figura 2.15 – Veículo elétrico: Torque x Potência

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Emissões de dióxido de carbono por kW/h por países por região

Quadro 2.2 – Principais indicadores de impacto utilizados na ACV para EUA e Brasil estimados por MJ de combustível produzido

Quadro 2.3 – Comparação entre Tiggo 8 plug-in e a combustão

Quadro 2.4 – Comparação entre modelos chineses mais vendidos em 2024

Quadro 2.5 – Porcentagem de produção de eletricidade usada por país, adaptado de Orsi (2015)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
ABVE	Associação Brasileira De Veículos Elétricos
BEV	Veículo Elétrico a Bateria (<i>Battery Electric Vehicle</i>)
EV	Veículo Elétrico (<i>Electric Vehicle</i>)
FFV	Veículo de Combustível Flexível (<i>Fuel Flex Vehicle</i>)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>)
HEV	Veículo Elétrico Híbrido (<i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
HEV-S	Veículo Híbrido em Série
HEV-P	Veículo Híbrido em Paralelo
HEV-SP	Veículo Híbrido Combinado
HTP	Potencial de Toxicidade Humana (<i>Human Toxicity Potential</i>)
ICEV	Veículo de Motor a Combustão Interna (<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>)
ILUC	Mudança Indireta no Uso da Terra (<i>Indirect Land Use Change</i>)
KERS	Sistema de Recuperação de Energia Cinética (<i>Kinetic Energy Recovery System</i>)
LIBs	Baterias de íon-Lítio (<i>Lithium-Ion Batteries</i>)
MCI	Motor a Combustão Interna
MHEV	Veículo Híbrido Leve (<i>Mild Hybrid Vehicle</i>)
NCA	Níquel Cobalto Alumínio
NMC	Níquel Manganês Cobalto
PEV	Veículo Elétrico Plug-in (<i>Plug-in Electric Vehicles</i>)
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
TTW	Tanque-à-Roda (<i>Tank-to-Wheel</i>)
WTT	Poço-ao-Tanque (<i>Well-to-Tank</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

eq – Equivalente

G – Giga

g – Grama

h – Hora

J – Joule

kW – Quilo-Watt

km – Quilômetro

M – Mega

MWh – MegaWatt hora

kWh – QuiloWatt hora

ELEMENTOS QUÍMICOS

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

HC – Hidrocarboneto

NO_x – Óxido de Nitrogênio

SO_x – Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

Capítulo 1	
1.Introdução.....	13
1.1. Objetivos.....	15
1.1.1.Objetivo Geral.....	15
1.1.2.Objetivos Específicos.....	16
Capítulo 2	
2.Revisão Bibliográfica.....	17
2.1. Modelos de Veículos.....	17
2.1.1.Veículos a combustão.....	17
2.1.2.Veículos elétricos.....	18
2.1.3.1.Veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV).....	21
2.1.3.2.Veículo híbrido leve (MHEV).....	23
2.2. Aspectos analisados.....	23
2.2.1.Produção e Mercado.....	23
2.2.2.Combustíveis e Emissões.....	27
2.2.3.Baterias.....	31
2.2.4.Análise do Ciclo de Vida do CO ₂	33
2.2.5.Desempenho do Veículo Elétrico x Veículo a Combustão.....	38
Capítulo 3	
3.Metodologia.....	41
Capítulo 4	
4.Resultados e Discussão.....	42
4.1. Gases de Efeito Estufa no Contexto da ACV.....	42
4.2. Desafios da Eletrificação da Frota.....	43
4.3. Viabilidade do etanol.....	46
Capítulo 5	
5.Conclusão.....	47
REFERÊNCIAS.....	49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Quando se analisa o impacto que as emissões de carbono têm na vida da população, é possível observar o porquê da busca por meios de transporte mais sustentáveis. Segundo o relatório do Fórum Internacional de Transportes (ITF) de 2023 (ITF, 2023), as emissões veiculares foram responsáveis por aproximadamente 385 mil mortes prematuras em 2015. Além disso, estima-se que a transição para veículos com emissões nulas tenha evitado o consumo de aproximadamente 1,7 milhão de barris de petróleo por dia em 2022.

Nos modelos produtivos atuais, o crescimento econômico tem sido priorizado em detrimento dos aspectos ambientais, mas novas legislações começam a exigir critérios contra a poluição, mesmo que isso impacte o crescimento econômico e o desenvolvimento produtivo. O aumento populacional e o crescimento econômico mundial intensificam a pressão sobre as políticas de transporte, que precisam atender à crescente demanda e, ao mesmo tempo, cumprir as metas de redução de emissões (CILLERUELO, 2024).

Os veículos particulares contribuem com aproximadamente 75% das emissões de CO₂, enquanto o transporte coletivo (ônibus e trens) gera cerca de 7% das emissões do transporte de passageiros, apesar de atender a um quinto da demanda global. As evidências disponíveis sugerem que as emissões de CO₂ do setor de transportes precisariam ser reduzidas em torno de 70 a 80% em relação aos níveis de 2015 para atender aos objetivos estabelecidos no Acordo de Paris (CILLERUELO, 2024). Por isso, a busca por alternativas à utilização de combustíveis fósseis vem sendo grande alvo dos desenvolvimentos tecnológicos, principalmente no setor de transportes.

Há mais de um século o etanol foi identificado como um combustível importante para o uso em motores de combustão. A gasolina com adição de etanol pode ser utilizada como combustível para veículos e tem sido comercializada há décadas em alguns mercados, como o Brasil e os Estados Unidos (MOURAD; MAHMOUD, 2019). As gasolinas comerciais do Brasil, com alto teor de etanol, podem ser adotadas mundialmente sem mudanças significativas nos motores, proporcionando benefícios ambientais e econômicos, além de contribuir para a redução de gases de efeito estufa. A tecnologia de veículos movidos a combustível flexível (FFV) já é aplicada em diversos países, permitindo o uso de misturas de gasolina e etanol, ou somente etanol (AMARAL et al., 2021).

Os biocombustíveis têm aparecido com notoriedade, principalmente no Brasil, Estados Unidos e Índia. Eles são renováveis e provêm de matérias orgânicas que contêm grandes quantidades de açúcares ou elementos que possam ser convertidos a combustível (amido,

por exemplo), podendo ser cana-de-açúcar, trigo ou milho (ESCOBAR et al., 2009). Quando se fala sobre biocombustíveis, o etanol aparece como uma tendência mundial, inclusive adicionado à gasolina, como se verifica no Brasil. É chamado aqui de E27, por ter 27% de etanol em volume, e nos Estados Unidos, E15, seguindo a mesma lógica, onde as biomassas utilizadas são a cana-de-açúcar e o milho, respectivamente (AMARAL et al., 2021).

O etanol pode ser considerado um combustível de ciclo fechado de carbono, pois o CO₂ liberado em sua queima é compensado pela fotossíntese das plantas. Além disso, sua maior proporção de hidrogênio em relação ao carbono, comparado a combustíveis fósseis, reduz a emissão de hidrocarbonetos (HC) (BARBOSA et al., 2021).

O etanol possui menor poder calorífico em comparação com a gasolina, o que resulta em uma redução esperada na autonomia dos veículos que operam com uma mistura de gasolina e etanol (ORSI et al., 2015). Entretanto, Knoll et al. (2009) observaram uma redução de 3 a 4% no consumo de combustível em veículos usando E10 em comparação com gasolina pura.

A tecnologia de motores híbridos plug-in (PHEV) se destaca pela maior autonomia e flexibilidade em relação a outros EVs, pois combina bateria recarregável e motor a combustão. Isso permite viagens longas sem depender exclusivamente de estações de recarga. Segundo Vonbun (2015), mesmo com a bateria descarregada, o veículo pode continuar rodando com combustível. Além disso, o custo operacional é semelhante ao dos carros a combustão, já que uma das fontes de energia tem preço comparável ao da frota convencional.

Outro estudo positivo aponta que a utilização de veículos elétricos (EVs) de pequeno porte é mais competitiva e ecologicamente sustentável do que veículos de médio e grande porte, pois exigem menos energia para recarga, resultando em menores emissões de CO₂ provenientes da matriz elétrica. No entanto, esses pequenos EVs possuem menor autonomia em comparação com os ICEVs convencionais. Além disso, alguns estudos na China indicaram que os EVs podem ter um maior impacto ambiental do que os ICEVs devido aos processos de fabricação das baterias (VELASQUEZ et al., 2023).

As baterias de íon-lítio, utilizadas em carros elétricos, precisam ser substituídas em um período de 5 a 8 anos de uso ou quando a capacidade atingir 80% ou menos da original. No entanto, a reciclagem dessas baterias enfrenta desafios relacionados ao elevado custo energético e à baixa eficiência na recuperação de metais (MOREIRA et al., 2024), sendo uma das desvantagens desse material. Em relação à vida útil, a durabilidade de uma bateria é de aproximadamente 160.000 km. Comparando com a durabilidade de um motor de combustão interna, que chega a aproximadamente 250.000 km, ainda são necessários avanços importantes nesse sentido (SINIGAGLIA, 2023).

Outro aspecto relevante está relacionado à matriz elétrica. As matrizes elétricas da maioria dos países do grupo BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) ainda são altamente dependentes de combustíveis fósseis. China, Índia e África do Sul apresentam emissões na produção de eletricidade superiores a 500 gCO₂eq/kWh, e a Rússia possui um fator de emissão médio de cerca de 336 gCO₂eq/kWh. Em contraste, o Brasil apresenta emissões de aproximadamente 142 gCO₂eq/kWh, inferior à dos países do BRICS e à maioria dos países desenvolvidos, devido à matriz elétrica predominantemente renovável, composta por hidrelétricas, energia eólica, solar e biomassa (RITCHIE, 2020 apud VELASQUEZ et. al., 2023).

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) no ciclo de vida de BEVs são bem inferiores às de qualquer outra motorização e combustível considerados, devido à alta eficiência energética do veículo elétrico e à matriz elétrica de baixo carbono do Brasil. Para os veículos comercializados em 2023, os BEVs têm emissões 65% a 67% mais baixas que as dos ICEVs flex utilizando o consumo médio de gasolina C (comum) e etanol. Em contraste, HEVs e PHEVs exibem um benefício muito limitado em termos de emissões de GEE em comparação com os ICEVs. Os HEVs têm emissões 14% mais baixas que as dos ICEVs flex quando consomem a mesma proporção de gasolina C e etanol. Os PHEVs atuais, que usam exclusivamente gasolina C, geram emissões apenas 3% menores que as dos ICEVs flex que usam gasolina C e etanol baseados na média de mercado (MERA et al., 2023).

Por fim, o motor híbrido a etanol desponta como uma tecnologia promissora para o Brasil. Com peças e desenvolvimento nacionais, o país poderia assumir uma posição importante no cenário internacional automobilístico, atendendo aos tratados de diminuição de poluentes e às leis de proteção ambiental. Essa tecnologia possibilitaria a chegada de veículos elétricos a custo menor ao consumidor final, viabilizando a implantação de postos de recarga em diversas cidades, além de leis e diretrizes para regulamentação desses serviços (REIS; SILVA, 2017).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar o cenário de veículos no Brasil, com ênfase nos modelos eletrificados, visando identificar alternativas e tecnologias que contribuam para um futuro mais sustentável a longo prazo.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre etanol, veículos híbridos e elétricos, abordando suas vantagens, desafios e impactos ambientais.
- Analisar o ciclo de vida de gases de efeito estufa, considerando as emissões totais desde a produção e utilização dos combustíveis até a fabricação e manutenção dos automóveis.
- Estudar a manufatura e reciclagem de baterias de motores elétricos, avaliando seus impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, desde a produção até o descarte.
- Examinar o cenário de países com ampla utilização de veículos eletrificados, identificando estratégias adotadas e os benefícios observados.
- Analisar o consumo energético do Brasil e a produção de biocombustíveis, com ênfase no papel do etanol na matriz energética nacional.
- Apresentar possíveis cenários futuros para a eletrificação no Brasil, discutindo as consequências e desafios da implementação dessas tecnologias.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os veículos que estão presentes no mercado nacional e que servirão para análise nesse estudo serão apresentados a seguir. São divididos em veículos a combustão, elétricos e híbridos, possuindo suas subcategorias. Além disso, também foram adotados como tópicos para a pesquisa os itens produção e mercado, combustíveis e emissões, baterias, análise do ciclo de vida do CO₂ e desempenho do veículo elétrico *versus* veículo a combustão.

2.1. MODELOS DE VEÍCULOS

Atualmente, as tecnologias veiculares no mercado automotivo podem ser classificadas em duas categorias: veículos a combustão interna e veículos elétricos. Essas configurações serão detalhadas nos tópicos 2.1.1 e 2.1.2.

2.1.1. VEÍCULOS A COMBUSTÃO

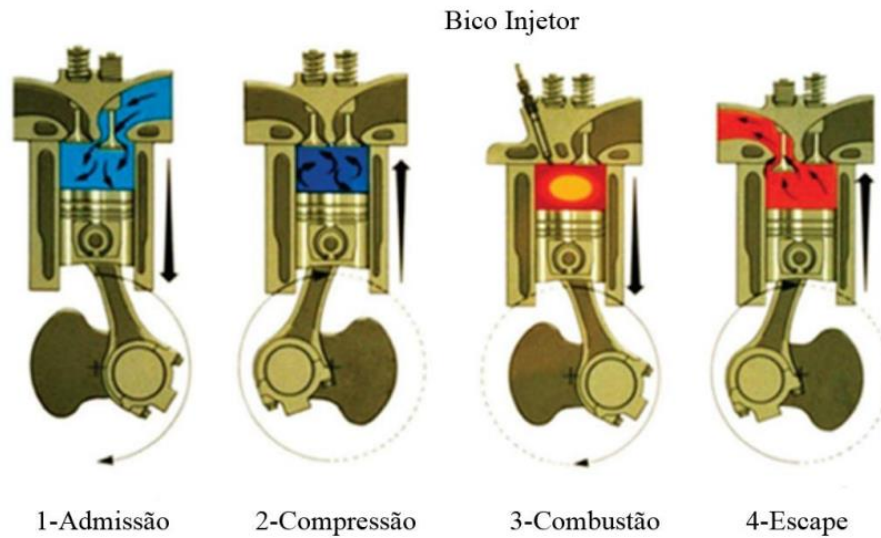
Os veículos com motores de combustão interna (ICEV) são compostos por um motor movido a gasolina, etanol ou diesel.

Existem dois tipos de motores a combustão interna (MCI), os motores de ciclo Otto e os motores de ciclo Diesel. A grande diferença entre esses dois tipos de MCI é a forma como é iniciada sua ignição. No ciclo Otto, uma centelha elétrica criada por uma vela inicia a combustão da mistura ar-combustível que está sendo comprimida. Já no ciclo Diesel, o processo de combustão se inicia quando a mistura ar-combustível se autoinflama devido à alta temperatura dentro da câmara de combustão causada pela alta compressão da mistura (TELLI, 2018).

O motor realiza a queima da mistura formada por combustível e ar, que está dentro dos cilindros, produzindo força mecânica. O motor mais utilizado nos automóveis populares é o de quatro tempos, ilustrado na Figura 2.1. O primeiro tempo é formado pela admissão de ar e combustível que realiza, através do sistema de injeção, o envio de combustível para as válvulas. O segundo tempo é a compressão, onde o pistão sobe até o ponto morto superior, com as válvulas fechadas, comprimindo o ar e o combustível. O terceiro tempo é onde ocorre a combustão, através da faísca gerada pela vela de ignição. Essa pressão movimenta o pistão para baixo, atingindo o ponto morto inferior. Já no quarto tempo, os resíduos da mistura de ar

e combustível são liberados, com a abertura da válvula de escape, para a atmosfera por meio do sistema de escapamento.

Figura 2.1 - Motor de Ciclo Diesel de 4 tempos

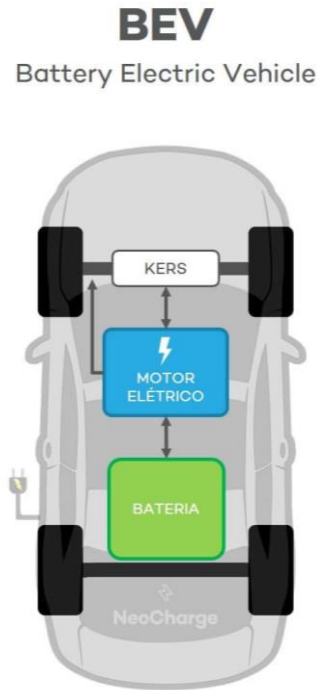


Fonte: Telli (2018).

2.1.2. VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os EVs são compostos por motores elétricos a bateria. Podem ser puramente elétricos ou híbridos, sendo os híbridos compostos do motor elétrico e do motor a combustão interna. Diante da característica de não realizar o processo de combustão para o uso final, esse tipo de veículo pode propiciar ganhos substanciais em termos de economia e emissões de poluentes atmosféricos, já que ao menos no local onde é utilizado, não há emissões de substâncias nocivas ao meio ambiente, pois as emissões de escape são nulas (SOUZA, 2015). Na Figura 2.2 tem-se a ilustração do sistema de um veículo elétrico a bateria (BEV). O sistema de recuperação de energia cinética (*Kinetic Energy Recovery System*, KERS) ou freio regenerativo, é um sistema que recupera a energia cinética do carro durante a frenagem. Essa energia é armazenada para ser utilizada posteriormente na aceleração.

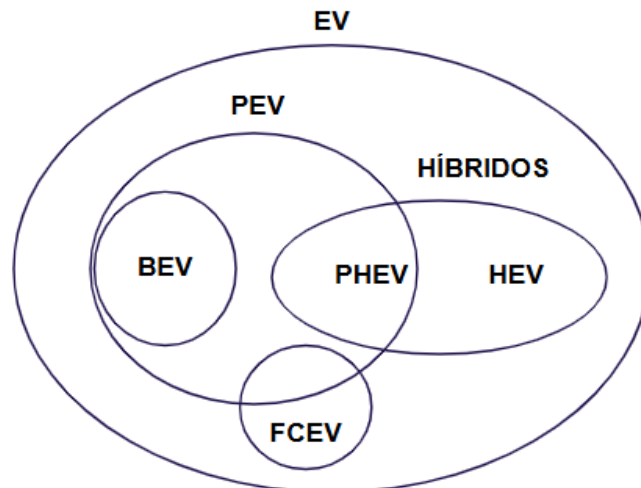
Figura 2.2 - Configuração de um BEV



Fonte: Adaptado de NEOCHARGE (2021).

A classificação dos EVs, apresentada na Figura 2.3, visa auxiliar a compreensão de suas categorias. Todos os BEVs são veículos elétricos plug-in (PEV), uma vez que a eletricidade é fornecida por uma fonte externa. Entre os PEVs, há ainda a inclusão de VEs híbridos, utilizando motores elétricos e à combustão interna para propulsão (FGV ENERGIA, 2017). A seguir, são apresentados mais detalhes sobre cada configuração.

Figura 2.3 - Tipos de veículos elétricos



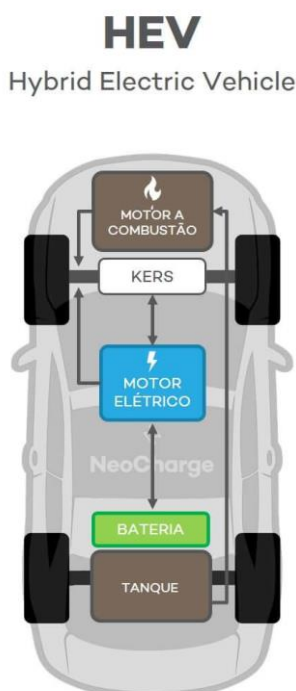
Fonte: Adaptado de FGV Energia (2017).

2.1.3. VEÍCULOS HÍBRIDOS

Os veículos híbridos (HEV) possuem duas fontes diferentes de energia para locomoção: o motor elétrico e uma unidade de força auxiliar, que pode ser o motor a combustão, além de um sistema para o armazenamento de energia. Os veículos HEV e EV possuem uma diferenciação em relação aos aspectos de autonomia e peso. A autonomia é maior nos híbridos justamente pela utilização acessória de um motor a combustão, e o peso do conjunto de baterias é consideravelmente menor. Os demais parâmetros são similares para os modelos estudados (CASTRO; FERREIRA, 2010).

De acordo com Borba (2012, apud SOUZA, 2015), a parte elétrica do veículo pode funcionar como motor ou gerador. No caso do funcionamento como motor, tenta-se trabalhar, sobretudo nas baixas rotações, na zona de funcionamento em que o motor de combustão interna com ciclo Otto tem baixo desempenho energético. No funcionamento como gerador, tenta-se aproveitar a energia cinética de translação do veículo que seria desperdiçada em frenagens, através do KERS. Na Figura 2.4, é possível observar onde está alocada cada parte do sistema de propulsão do HEV.

Figura 2.4 - Configuração do HEV



Fonte: Adaptado de NEOCHARGE (2021).

Os veículos híbridos podem ser classificados em três configurações com base na organização do seu sistema de propulsão: série (HEV-S), paralelo (HEV-P) e combinada

(HEV-SP). A principal diferença entre elas está na forma como o motor a combustão interna (MCI) e o motor elétrico atuam para mover o veículo. Essas configurações serão detalhadas nos parágrafos a seguir.

O HEV-S é composto por quatro componentes principais: o motor a combustão interna, um motor e controlador elétrico, um gerador e uma bateria. O ICEV é responsável por converter a energia presente no combustível em energia mecânica, porém, ao invés dessa energia ser fornecida diretamente para as rodas, ela vai para um gerador onde é convertida em energia elétrica. O gerador, por sua vez, pode alimentar o motor elétrico ou ser armazenar a energia produzida na bateria. Como o MCI não está conectado diretamente às rodas, pode ser programado para trabalhar no seu ponto de máxima eficiência (CASTEL-BRANCO, 2014).

Em contraste, o HEV-P pode ser impulsionado diretamente pelo MCI ou pelo motor elétrico, sendo possível a utilização de cada um individualmente ou em conjunto. Esta configuração de veículo pode ter uma transmissão continuamente variável (CVT) em substituição a um câmbio convencional com marchas fixas, tornando possível a escolha dos pontos de operação mais eficientes do MCI. Nessa opção, dispensa-se o uso de um gerador, pois o próprio motor elétrico é utilizado como gerador na recarga das baterias. A sua desvantagem, quando comparado ao HEV-S, é a necessidade de uma estratégia de controle mais aprimorada e aumento do peso, associados à transmissão mecânica (CORREA, 2013).

Segundo Castel-Branco (2014), no HEV-SP, as vantagens dos modelos em série e paralelo são combinadas. Nessa configuração, a potência do motor pode ser dividida em dois componentes: paralelo e série. No modo paralelo, a potência do MCI é transmitida diretamente às rodas, podendo receber auxílio do motor elétrico. No modo série, a potência do MCI é convertida em eletricidade pelo gerador, sendo armazenada na bateria ou usada pelo motor elétrico. O gerador também pode atuar como motor, utilizando energia da bateria. A gestão de energia e os componentes dessa configuração têm sido amplamente estudados pela indústria automotiva. Grandes fabricantes, como Toyota e General Motors, desenvolveram suas próprias versões do sistema HEV-SP, e o Toyota Prius, lançado em 1997, é um dos modelos mais bem-sucedidos com essa tecnologia (WANG et al., 2014).

Dessa forma, os veículos híbridos no mercado se dividem em duas categorias, onde se diferem na forma de recarga da bateria elétrica e da atuação do motor a combustão e do motor elétrico, sendo elas ilustradas a seguir.

2.1.3.1. VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO PLUG-IN (PHEV)

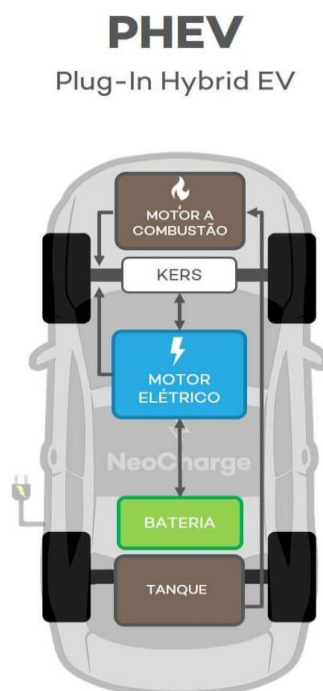
O PHEV possui um motor elétrico, tendo um motor de apoio, que no caso é o de combustão interna. Nesta configuração, é possível reduzir o consumo de combustíveis fósseis

e a emissão de poluentes atmosféricos. Esse tipo de automóvel percorre parte do trajeto no modo exclusivamente elétrico, em que as emissões atmosféricas são nulas, e partes específicas do trajeto são realizadas com o sistema do motor de combustão interna (SOUZA, 2015).

A recarga de um híbrido plug-in pode ser realizada de três maneiras: através do KERS, pelo motor a combustão funcionando como gerador ou diretamente em uma tomada, de forma semelhante a um veículo elétrico. Na Figura 2.5 tem-se a ilustração da configuração do PHEV. A depender da capacidade da bateria, é possível alcançar uma autonomia elétrica suficiente para realizar trajetos cotidianos sem a necessidade de utilizar o motor a combustão.

Em comparação com a Figura 2.4, apesar da configuração apresentar semelhança visual, a bateria e o motor elétrico do HEV são consideravelmente menores, já que a principal forma de propulsão do veículo é à combustão interna. A função do motor elétrico é apenas melhorar a eficiência do MCI ao fornecer tração em baixas potências, sendo carregado através do KERS (FGV ENERGIA, 2017), enquanto no PHEV (Figura 2.5), o motor elétrico tem autonomia para percorrer maiores distâncias, apresentando uma bateria maior que no HEV (NEOCHARGE, 2024).

Figura 2.5 - Configuração do PHEV



Fonte: Adaptado de NEOCHARGE (2021).

2.1.3.2. VEÍCULO HÍBRIDO LEVE (MHEV)

Em sistemas híbridos leves, o motor elétrico e a bateria possuem dimensões e potências bastante reduzidas, o que contribui para a diminuição do peso e dos custos. No entanto, essa limitação resulta em uma contribuição modesta para a redução do consumo de combustível. Nesse tipo de sistema, o motor elétrico atua como motor de arranque para ligar o motor a combustão e o auxilia em momentos de maior esforço, como arrancadas e acelerações, fornecendo um impulso adicional que reduz o consumo de combustível.

Apesar disso, o motor elétrico em um sistema híbrido leve geralmente não consegue mover o veículo de forma independente. A energia necessária para seu funcionamento é recuperada durante processos de desaceleração e frenagem, sem a possibilidade de recarga externa da bateria.

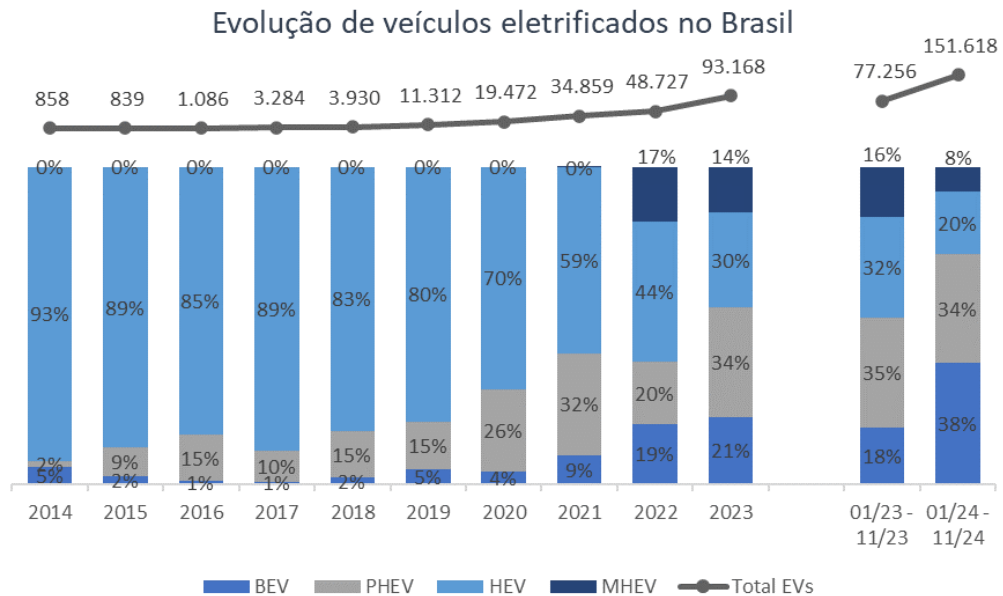
2.2. ASPECTOS ANALISADOS

Para a análise dos cenários de eletrificação e emissões, considerando também o uso de biocombustíveis, a avaliação foi segmentada em três aspectos principais: produção e mercado, combustíveis e emissões e o ciclo de vida do CO₂. O desempenho do VE e do ICEV será detalhado a seguir.

2.2.1. PRODUÇÃO E MERCADO

Considerando o cenário de vendas no Brasil, é possível observar que nos últimos 3 anos houve um aumento no número de veículos híbridos e elétricos, evidenciando que, por parte dos consumidores, essa busca pela mudança de frota também está presente. Conforme os últimos dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), apresentados na Figura 2.6, observa-se que a busca por novas configurações veiculares tem aumentado e, em particular, pelos veículos totalmente elétricos.

Figura 2.6 – Evolução da comercialização de veículos eletrificados

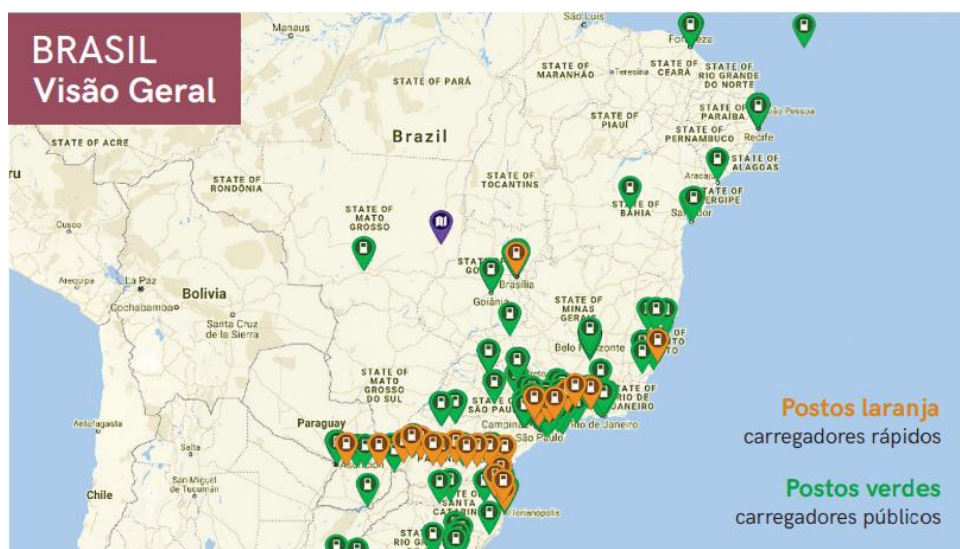


Fonte: Da autora.

Considerando o contexto brasileiro, quando comparada a frota eletrificada com os veículos a combustão, os números também apresentam um aumento considerável, principalmente com a presença de marcas chinesas no território nacional. Segundo a Reuters (2024), atualmente o Brasil é o maior mercado de importação de veículos elétricos e híbridos da China, ultrapassando a Bélgica. As vendas aumentaram 13 vezes quando comparada ao ano anterior.

Nesse panorama, é importante observar que o Brasil apresenta características territoriais que diferem bastante do mercado europeu. O país possui uma extensão muito superior à dos países europeus, fazendo surgir um dos principais impasses para os veículos puramente elétricos: o carregamento das baterias. Percorrer longas distâncias para viagens e deslocamentos maiores acaba sendo um dilema, pois ainda há escassez nas estações de recarga. Segundo Ribeiro (2022), até 2021 o Brasil possuía 800 pontos de recarga instalados, entre estações públicas e semipúblicas. Observa-se, na Figura 2.7, que não existem postos de carregamento público e rápido na região Nordeste e nenhum tipo na região Norte do país. Porém, nas regiões Sul e Sudeste, há maior concentração desses.

Figura 2.7 - Infraestrutura de recarga de EV no Brasil



Fonte: Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica, 2020.

Como observado por DAS et al. (2020), no momento, nem todos os modelos de EVs suportam todos os níveis de recarga, assim como nem todas as estações de recarga públicas possuem instalações para todos os níveis de potência. Isso significa que, dependendo da capacidade do veículo, ele pode ser restrito a certos tipos de estações de recarga, e nem todas as estações públicas oferecem a potência necessária, limitando a conveniência e flexibilidade dos usuários. Em adicional, instalações privadas de recarga rápida, como em residências, ainda são um problema, pois normalmente exigem que os proprietários de EVs obtenham permissões dos fornecedores locais de energia e do governo.

Em relação a recarga, ainda é necessário observar a demanda que a frota de eletrificados causaria na rede elétrica. De acordo com Velasquez et al (2023), o tempo de recarga dos melhores BEVs varia entre vinte minutos e uma hora, utilizando uma potência total entre 50 e 350 kW. Já os PHEVs demandam um tempo de recarga maior, sendo entre uma e duas horas, e para BEVs de categorias intermediárias, o tempo de recarga pode ser ainda mais prolongado, situando-se entre quatro e dez horas, com uma potência total que varia entre 7 kW e 19 kW.

No ano de 2023, as vendas de elétricos atingiram quase 90.000 unidades, com Brasil, Colômbia, Costa Rica e México liderando o mercado na América Latina. No Brasil, o registro de EV triplicou em relação ao ano anterior. Esse crescimento foi impulsionado pela entrada de montadoras chinesas, como a BYD (*Build Your Dreams*), com os modelos Song e Dolphin, a Great Wall Motors, com o H6, e a Chery, com o Tiggo 8, que rapidamente se destacaram entre os mais vendidos em 2023 (IEA, 2024).

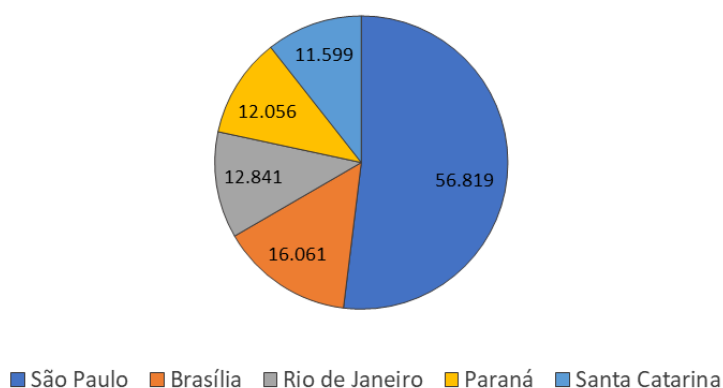
Segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), os eletrificados superaram as previsões para 2024, batendo todos os recordes no ano citado. A venda recorde de 177.358 veículos eletrificados leves emplacados de janeiro a dezembro foi 89% acima dos 93.927 emplacados em 2024 (ABVE, 2025).

Os veículos plug-in (BEV e PHEV), de janeiro a dezembro, foram líderes na participação de vendas do mercado de eletrificados, com 71% do total. Em comparação com 2023, que teve 52.359 veículos desse tipo vendidos, em 2024 foram 125.624, um crescimento de 140% (ABVE, 2025). Os veículos híbridos sem recarga externa (HEV e MHEV) tiveram uma participação de 29% em 2024, com um aumento de 24% em relação a 2023, de 41.568 para 51.733.

Os dados de 2024 continuam a fornecer informações relevantes sobre a geografia da eletromobilidade no Brasil. Conforme ilustrado na Figura 2.8, o avanço dessas tecnologias concentrou-se, principalmente, nas regiões Sudeste e Sul do país. Observando as cidades com maior impacto nos emplacamentos, além das capitais São Paulo, Distrito Federal, Rio de Janeiro e Curitiba, que lideram o ranking, nota-se o interior do estado de São Paulo nas primeiras posições. Entre as cidades brasileiras de destaque estão Campinas (3.502 emplacamentos), Ribeirão Preto (1.487), Cariacica (1.393), Uberlândia (1.174) e Barueri (1.123), que lideram o segmento.

Figura 2.8 - Emplacamento de eletrificados por estado

Os 5 estados que mais emplacaram eletrificados em 2024



Fonte: Adaptado de ABVE (2025).

A adesão significativa de cidades paulistas aos carros híbridos pode ser explicada, em parte, pelas iniciativas de incentivo promovidas pelo governo do estado. Desde 2022, São Paulo tem implementado estratégias para fomentar a produção e a comercialização de

veículos mais sustentáveis. Segundo o Portal da Fazenda e Planejamento (2022), naquele ano, foi aprovado o programa Pró Veículo Verde, que disponibilizou até R\$ 500 milhões em créditos de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para montadoras que investirem em modelos ecológicos (Fazenda e Planejamento, 2022).

A eletrificação de transportes não tem se apresentado só no contexto dos carros, mas também de motos, setor de transportes públicos e da aviação. Pelo levantamento da FGV Energia (2017), em 2017 já havia mais de 400 ônibus com tração elétrica em operação na grande São Paulo. Em 2023, São Paulo passou a utilizar 50 novos ônibus elétricos à bateria, assim, a frota do sistema de transportes públicos da cidade subiu para 270 veículos elétricos em circulação, entre ônibus e trólebus (SÃO PAULO, 2023). A NASA também vem revolucionando a aviação, utilizando cada vez mais eletricidade em motores para aviões (NASA, 2024).

Em 2024, foi sancionado o Projeto de Lei 1510/2023 pelo Governo de São Paulo, garantindo isenção do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) até dezembro de 2026 para veículos movidos a hidrogênio e híbridos que atendam a critérios técnicos específicos, como possuir motor elétrico com potência mínima de 40 kW e sistema de tensão de pelo menos 150 volts, capaz de regenerar energia para as baterias (FAZENDA E PLANEJAMENTO, 2024). No entanto, a exclusão de carros e ônibus elétricos dessas isenções contraria tendências globais em mobilidade sustentável.

2.2.2. COMBUSTÍVEIS E EMISSÕES

Embora as fontes renováveis sejam essenciais para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e as emissões de carbono, a eliminação dos motores a combustão enfrenta desafios. Em 29 países europeus, a matriz energética ainda depende majoritariamente desses combustíveis, mesmo em nações líderes na transição, como a Alemanha. Estima-se que, até 2050, menos de 20% das reservas de petróleo e gás permanecerão, tornando a mudança ainda mais urgente (MARTINS et al, 2019).

No ano de 2023, o Brasil teve um aumento na oferta interna de energias renováveis através da biomassa e das fontes eólica e solar. O Brasil apresentou 49,1% de participação de energias renováveis em 2023 em relação a 2022, quando foi de 47,4%. Quando se compara com o mundo, essa porcentagem é de 14,7% em relação a energias não renováveis. No âmbito dessa parcela de energia renovável, 16,9% é derivada da biomassa de cana-de-açúcar (BALANÇO DE ENERGIA NACIONAL, 2024).

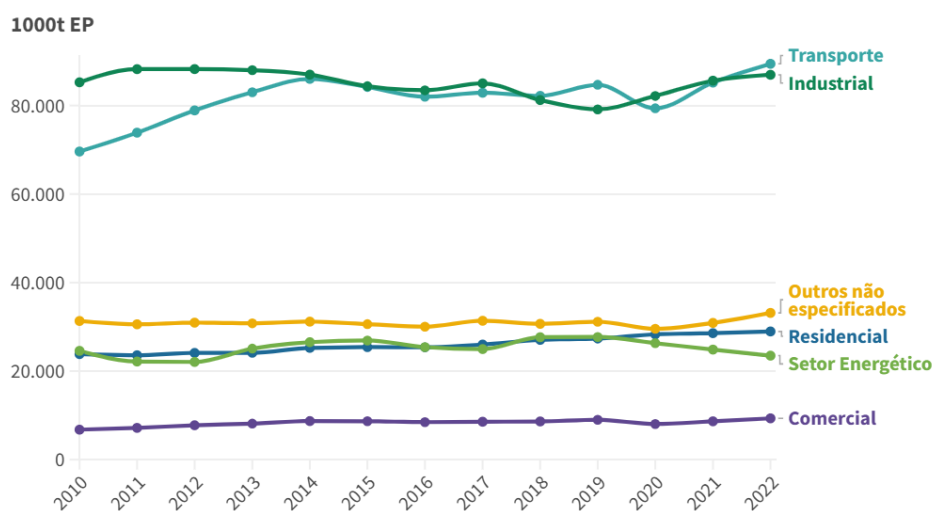
O consumo nacional de combustíveis fósseis no setor brasileiro de transportes é menor do que quando comparado com a média mundial, pela adição de etanol à gasolina e

também a parcela de transportes que utiliza etanol hidratado como combustível puro, uma característica do Brasil. Porém, apesar desse cenário, quando se fala de combustíveis fósseis, é necessário levar em conta o processo de combustão do motor, que emite poluentes como dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO), entre outros (SOUZA, 2015), o que intensifica o efeito estufa e as alterações climáticas.

Conforme os dados do IBGE ilustrados na Figura 9, o setor de transporte no ano de 2022 foi a categoria que teve o maior consumo final de energia, superando o setor industrial. Além disso, o consumo dos setores de transporte e industrial significa quase o dobro do valor representado por outros setores, em toneladas equivalentes de petróleo (EP) que é a unidade utilizada para comparar diferentes formas de energia. O equivalente de petróleo refere-se à energia presente em uma tonelada de petróleo bruto, o que significa, aproximadamente, 42 GJ ou 11,63 MWh. Essa unidade serve para unificar a medição de consumo de energia, possibilitando a comparação entre diferentes fontes, como gás natural, carvão, eletricidade, entre outras, utilizando uma base comum.

Figura 2.9 - Consumo final de energia por setor

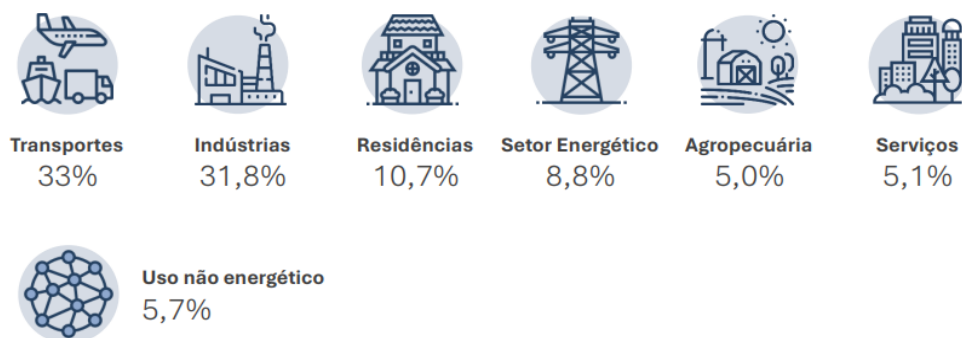
Consumo final de energia



Fonte: IBGE, 2023.

A relação entre o setor de transportes e o industrial é bastante estreita. Ao analisar o ciclo de vida de gases de efeito estufa, percebe-se que eles são emitidos desde a extração de matérias-primas utilizadas na produção de veículos e combustíveis até o uso dos veículos no dia a dia. Na Figura 2.10, nota-se que 64,8% do consumo de energia no país é destinado ao transporte de carga e de passageiros e ao setor industrial.

Figura 2.10 - Consumo energético no Brasil



Fonte: Balanço Energético Nacional, 2024.

Para Arengues et al. (2022), algumas análises evidenciam a necessidade de não somente mudar a classe dos veículos a serem usados, mas também alterar a fonte em que a energia é produzida. Países que tinham em sua matriz energética alta porcentagem de fontes não renováveis continuaram a ter um aumento na emissão de CO₂ mesmo mudando para carros elétricos. Isto porque o uso dos carros elétricos aumenta a emissão indireta de gases em outras partes do seu processo de produção, mostrando-se necessárias mudanças na classe dos carros como também nas fontes de energia utilizadas.

Segundo Velasquez et al. (2023), quando se observa quais países estão na linha abaixo de 131 gCO₂eq/kWh e que podem ser considerados donos de uma matriz energética limpa, apenas 16 países se enquadram nessa categoria, conforme o Quadro 2.1. Além disso, somente 8 fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e seriam capazes de implementar, com sucesso, a transição dos ICEVs para os EVs. Países como o Brasil e o Uruguai, apesar de estarem dentro da faixa eletiva de matriz energética limpa, precisam operar questões econômicas e políticas, como instalação de mais postos de recarga, para que a implantação dos EVs tenha êxito.

Quadro 2.1 - Emissões de dióxido de carbono por kW/h por países e região

Região	Média (gCO ₂ eq/kWh)	Menor gCO ₂ eq/kWh por país	Países abaixo de 131 gCO ₂ eq/kWh
Europa	298	Noruega	Noruega
União Europeia	262	Suíça	Suíça, Finlândia, França, Islândia e Suécia
América do Norte	336	Canadá	Canadá
América Latina e Caribe	240	Paraguai	Brasil, Costa Rica Paraguai e Uruguai
América do Sul	206	Paraguai	Brasil, Paraguai e Uruguai
Oriente Médio	515	Palestina	Nenhum
Ásia	532	Butão	Tajiquistão
África	492	República Central da África	República Central da África, Lesoto, Namíbia, Uganda, Zâmbia

Fonte: Adaptado de Velasquez et al. (2023).

O Quadro 2.2 representa, para cada fonte de combustível, a energia necessária e as emissões de CO₂ liberadas para produzir e transportar 1 MJ do combustível até o posto de abastecimento. O CO₂ proveniente de fontes biogênicas e da mudança no uso da terra considera as fontes renováveis e seu efeito na alteração dos estoques de carbono entre os reservatórios de carbono do ecossistema terrestre. O CO₂ total considera a soma desses três parâmetros (GARCIA, 2020).

Quadro 2.2 - Principais indicadores de impacto utilizados na ACV para EUA e Brasil estimados por MJ de combustível produzido.

Combustível	Energia [MJ]	CO ₂ [g]	CO ₂ Biogênico [g]	Mudança no uso da terra de CO ₂ [g]	CO ₂ total [g]	GWP-100 [g]
E100 USA	1,68	33,00	0,00	7,40	40,40	52,2
E100 BR	3,35	178,00	- 163,4	16,00	30,60	23,4
E85 USA	1,58	29,20	0,00	5,70	34,90	44,7
E85 BR	2,86	140,50	- 125,5	13,60	28,60	22,7
H ₂	1,52	85,90	0,00	0,00	85,90	92,8
Diesel	1,20	13,40	0,00	0,00	13,40	16,7
Gasoline	1,24	16,70	0,00	0,00	16,70	20,2
Electricity USA	1,91	117,20	- 0,7	0,00	116,50	123,8
Electricity BR	1,66	57,30	- 27,5	0,00	29,80	31,9

Fonte: Adaptado de Garcia (2020).

O dióxido de carbono biogênico é o gás que se forma através de fontes biológicas, como biomassa e resíduos orgânicos. O bioetanol possui 100% desse tipo de CO₂, portanto todo o resultante da queima do combustível no motor do veículo é nulo ao final da análise, ou

seja, neutro em carbono. Esse ponto é uma das principais razões pelas quais os veículos movidos a combustível flexível são tão interessantes para o Brasil, pois na utilização do etanol, a ACV apresentaria baixas emissões de GEE.

Além das emissões de GEE pelos veículos de transporte, outro fator essencial para a análise é a política energética do País. Assim, a implantação efetiva do BEV pode diminuir significativamente a dependência de derivados de petróleo, bem como o impacto da oscilação de preços e das importações desses produtos na economia. Pode, ainda, reforçar a segurança energética do país, diversificando as fontes de energia para os transportes e aliando o fomento de BEV com o aumento da geração de energia a partir de fontes renováveis (MEI, 2018).

Quando analisado o fator de potencial de aquecimento global (GWP), em um horizonte de 100 anos, observa-se que o etanol do Brasil é menos prejudicial para o aquecimento global do que quando comparado com o dos Estados Unidos. Isso pode ser relacionado ao fato de o país utilizar carvão e gás natural no processo produtivo, que possuem alta pegada de carbono. Apesar dos valores negativos para CO₂ biogênico, o GWP da cana-de-açúcar não é nulo, pois seu cultivo pode liberar o carbono que estava no solo.

Além disso, para esse parâmetro é importante destacar que ele analisa não somente o dióxido de carbono, como também o metano (CH₄) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Com isso, a combustão do etanol contabiliza a geração de outros GEE, apesar do CO₂ ser baixo ou nulo.

Sobre o etanol, as principais barreiras para seu uso em larga escala nos demais países do mundo são: a necessidade de se construir uma infraestrutura de distribuição e abastecimento, dado que os tanques e dutos usados para derivados de petróleo estariam suscetíveis a corrosão se usados para o etanol; e a necessidade de importação do etanol, devido à pequena capacidade de produção local nos países de maior consumo (POMPERMAYER, 2010).

2.2.3. BATERIAS

As baterias de íon-lítio (LIB), reconhecidas como fontes de energia sustentável por não conterem metais pesados tóxicos como cromo, mercúrio e chumbo, têm menor impacto ambiental em comparação às baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio. No entanto, os materiais do cátodo, ânodo e eletrólito em baterias descartadas ainda apresentam riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana, sendo as mesmas classificadas nos Estados Unidos como tóxicas, inflamáveis, corrosivas e reativas. Quando descartadas sem tratamento ou reaproveitamento, essas baterias não apenas desperdiçam recursos valiosos,

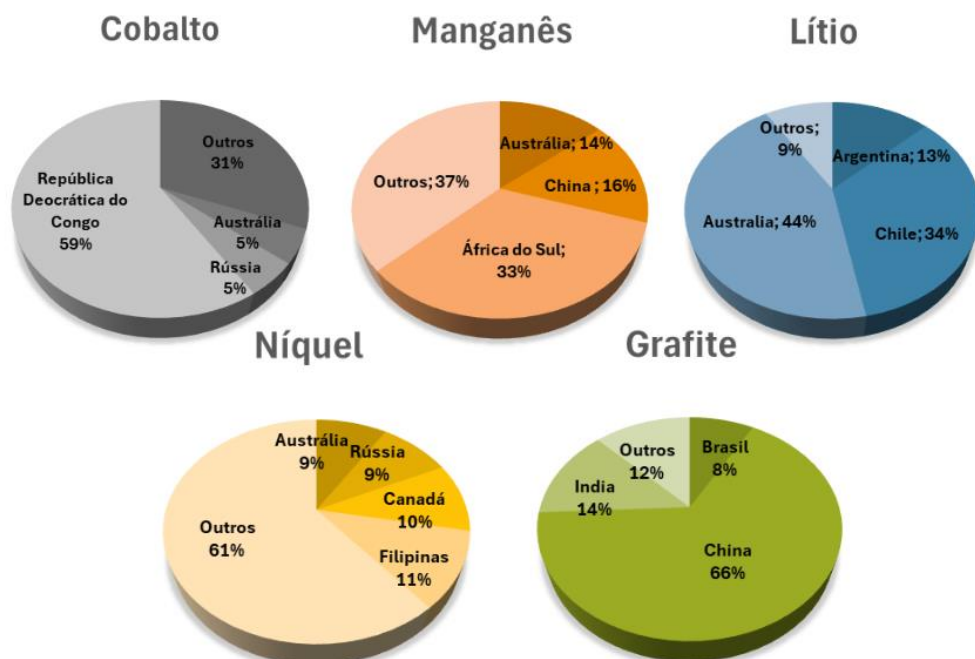
mas também representam uma séria ameaça ao meio ambiente e à saúde humana. (DU et al., 2022).

Segundo Li-BRIDGE (2023), a tecnologia de armazenamento de energia com baterias de lítio será uma das principais tecnologias do século XXI. As baterias de lítio alimentarão a maioria dos veículos fabricados nos próximos 50 anos e serão essenciais para sistemas militares, redes elétricas (cada vez mais dependentes de fontes renováveis e variáveis) e uma ampla variedade de dispositivos eletrônicos de consumo como os médicos e os industriais.

Atualmente, cerca de 35% do lítio produzido mundialmente é usado na fabricação de LIBs, e estima-se que um pequeno incremento na produção desse metal pode não equilibrar a cadeia de oferta e demanda (MISHRA et al, 2022). À medida que a demanda por LIBs aumenta, a necessidade de tecnologias de reciclagem eficaz se torna ainda mais importante (MOREIRA et al., 2023).

Na Figura 2.11, nota-se como a distribuição de matérias-primas importantes utilizadas na fabricação das baterias está presente em poucas regiões, fazendo com que o fornecimento de tais metais dependa da estabilidade política, social e econômica do país. Além disso, a extração desses metais é feita de forma invasiva no solo. Por exemplo, a extração do lítio é feita através de bombeamento de água rica em lítio para a superfície, para que posteriormente ele seja resgatado. Esse processo demanda uma alta quantidade de água, além de muita energia (MAGDALON, 2021).

Figura 2.11 - Distribuição de metais para baterias pelo mundo



Fonte: Adaptado de Magdalon (2021).

Na América do Sul, formado pelo Chile, Bolívia e Argentina, há o chamado “triângulo de lítio”; juntamente com a Austrália, esses países possuem mais de 90% das reservas mundiais de lítio. Por ser um metal raro, sua extração exige um grande esforço, ocorre em áreas de difícil acesso e gera resíduos que são frequentemente descartados na natureza. Além disso, o processo libera toxinas que representam riscos à saúde dos mineradores e ao meio ambiente. Quanto mais complexa a extração, maior a necessidade de equipamentos de alta potência, que demandam grandes quantidades de energia, nem sempre provenientes de fontes renováveis (FGV ENERGIA, 2017).

A demanda por baterias de lítio deve crescer rapidamente, impulsionada principalmente pela maior adoção de EVs e sistemas de armazenamento de energia na rede elétrica. A necessidade global deve aumentar mais de 5 vezes, e os Estados Unidos já demonstraram que sua demanda será quase 6 vezes maior até 2030, prevendo que continuarão altamente dependentes de importações (LI-BRIDGE, 2023).

Quando as baterias perdem 20% da sua capacidade inicial, considera-se que já não são adequadas para tração, pois podem apresentar problemas na capacidade de condução, acarretando queda na energia de saída, problemas de segurança e perda da capacidade de armazenamento de energia (MAGDALON, 2021).

Ao analisar o Potencial de Toxicidade Humana (HTP), os veículos elétricos possuem um impacto maior nessa categoria, principalmente devido aos materiais utilizados na produção da bateria elétrica. Na fabricação da bateria, a produção do cátodo e a montagem da bateria são os fatores de emissão mais significativos, representando 61% do total de emissões da bateria na fase “do berço ao portão da fábrica” (*cradle-to-gate*) (MASELLI FILHO, 2022).

O fator da temperatura também é algo que afeta as baterias. Temperaturas muito altas ou muito baixas sensibilizam seu desempenho, acarretando problemas na autonomia dos VE. Governos, fabricantes e motoristas têm requisitos semelhantes para baterias: elas devem durar mais tempo, apresentar carregamento rápido, ter maior densidade e ser mais baratas e leves. Além disso, também devem ser seguras e facilmente recicláveis (FGV ENERGIA, 2017).

Nesse sentido, tanto o modelo HEV quanto o PHEV são opções mais adequadas para muitos países, ao invés do BEV, principalmente onde serão necessários pesados investimentos em infraestrutura, como no Brasil, que já tem uma rede bem estabelecida de biocombustíveis (IEA BIOENERGY, 2024).

2.2.4. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO CO₂

Será abordada uma visão geral da vida útil do veículo, e para isso utilizou-se a análise “do berço ao túmulo”, pois através dela observa-se a extração de materiais e a fabricação dos componentes do veículo, o uso do veículo (do tanque à roda, TTW) e a manutenção. Adicionalmente, também se inclui na avaliação a produção e o abastecimento do combustível (do poço ao tanque, WTT), assim como as etapas de descarte e reciclagem ao término da vida operacional do automóvel. A Figura 2.12 apresenta um esquema com os parâmetros considerados na análise. Para a produção e reciclagem, observam-se os componentes da bateria dos BEVs e PHEVs, o chassi e o trem de força.

Segundo Bieker (2021), para a ACV do chassi e o trem de força, são considerados a produção do veículo, extração e processamento de matéria-prima, fabricação de componentes e montagem. Além disso, observam-se a reciclagem de componentes do veículo e o benefício ambiental obtido ao evitar a produção de novos materiais. Para a bateria, considera-se a fabricação da mesma, com extração e processamento das matérias-primas, produção da célula e montagem. Sobre a manutenção, inclui-se a substituição de peças do sistema, além de elementos como óleo, líquido de arrefecimento, etc.

Figura 2.12 - Esquema da análise de ciclo de vida



Fonte: Adaptado de Garcia (2020).

Conforme o critério de etiquetagem produzido pelo Inmetro (INMETRO, 2024), se analisado o modelo Tiggo 8 da CAO Cherry, verifica-se que o modelo plug-in possui emissão de CO₂ 85% menor quando comparado ao regime urbano, enquanto na estrada esse valor é de 77%. Além disso, conforme se observa no Quadro 2.3, a média do consumo também é significativamente mais baixa, apresentando um valor 67% menor nos veículos plug-in.

Quadro 2.3 - Comparação entre Tiggo 8 plug-in e a combustão

Marca	Modelo	Tipo de Propulsão	CO2 Urbano E22 [g/km]	CO2 Estrada E22 [g/km]	Média do Consumo Energético [MJ/km]
CAOA CHERY	TIGGO 8	Plug-in	25,16	29,81	0,67
CAOA CHERY	TIGGO 8	Combustão	167,25	129,05	2,01

Fonte: Da autora.

Os veículos eletrificados mais vendidos no primeiro semestre de 2024, conforme ilustrado no Quadro 2.4, são das marcas BYD e GWM, ambas chinesas e sem fábricas no Brasil. Verifica-se que os veículos elétricos não geram emissões diretas de CO₂ durante sua operação, enquanto os PHEV dependem de como a motorização está configurada. No caso do Song Plus PHEV, o motor a combustão atua principalmente como gerador, sendo um sistema que visa otimizar a máxima eficiência elétrica. Já o H6 da GWM, apesar de ser PHEV, prioriza menos o motor elétrico, tendo maior participação da parte ICEV.

Ainda sobre a GWM, nota-se que o H6 HEV possui menores emissões de CO₂ do que o PHEV, porém seu consumo demonstra ser o menos eficiente, como costuma ser observado em carros com motores a combustão.

Quadro 2.4 - Comparação entre modelos chineses mais vendidos em 2024

Marca	Modelo	Tipo de Propulsão	CO2 Urbano E22 [g/km]	CO2 Estrada E22 [g/km]	Média do Consumo Energético [MJ/km]	Autonomia modo elétrico [km]
BYD	DOLPHIN MINI	Elétrico	0,00	0,00	0,41	399,6
BYD	SONG PLUS	Plug-in	40,19	58,15	0,65	40,6
GWM	HAVAL H6	Plug-in	143,58	149,50	0,75	162,00
GWM	HAVAL H6	Híbrido	118,87	129,64	1,65	-

Fonte: Da autora.

Para todas as tecnologias de veículos convencionais, a fase de operação é a que mais contribui para as emissões de GEE na ACV de um veículo, com cerca de 85% a 90% dos valores totais. Para os BEVs, a etapa que mais contribui é a de produção da eletricidade. Dessa forma, o veículo que utiliza uma matriz energética diversificada, sendo a maior parte proveniente de fontes fósseis, a etapa WTT, ou seja, que considera a produção da fonte de energia, mas não a etapa de uso, apresentará mais de 75% das emissões do ciclo de vida do veículo. Por sua vez, quando a matriz energética é proveniente de fonte nuclear ou renovável, as emissões de GEE serão maiores na produção do veículo e da bateria, com pelo menos 50% das emissões. Em termos de ACV, os gases de efeito estufa nas etapas de manutenção e eliminação de veículos somam menos de 10% das emissões globais (SOUZA, 2015).

A geração de eletricidade resulta em maiores emissões de CO₂ na etapa WTT em todos os cenários. No entanto, em países onde a eletricidade é gerada com menor uso de combustíveis fósseis, como no Brasil e na França, conforme mostrado no Quadro 2.5, essas emissões ficam mais próximas de fontes convencionais (ORSI, 2015). No Brasil, isso pode ser atribuído às hidrelétricas, enquanto na França à energia nuclear.

Quadro 2.5 - Porcentagem de produção de eletricidade usada por país

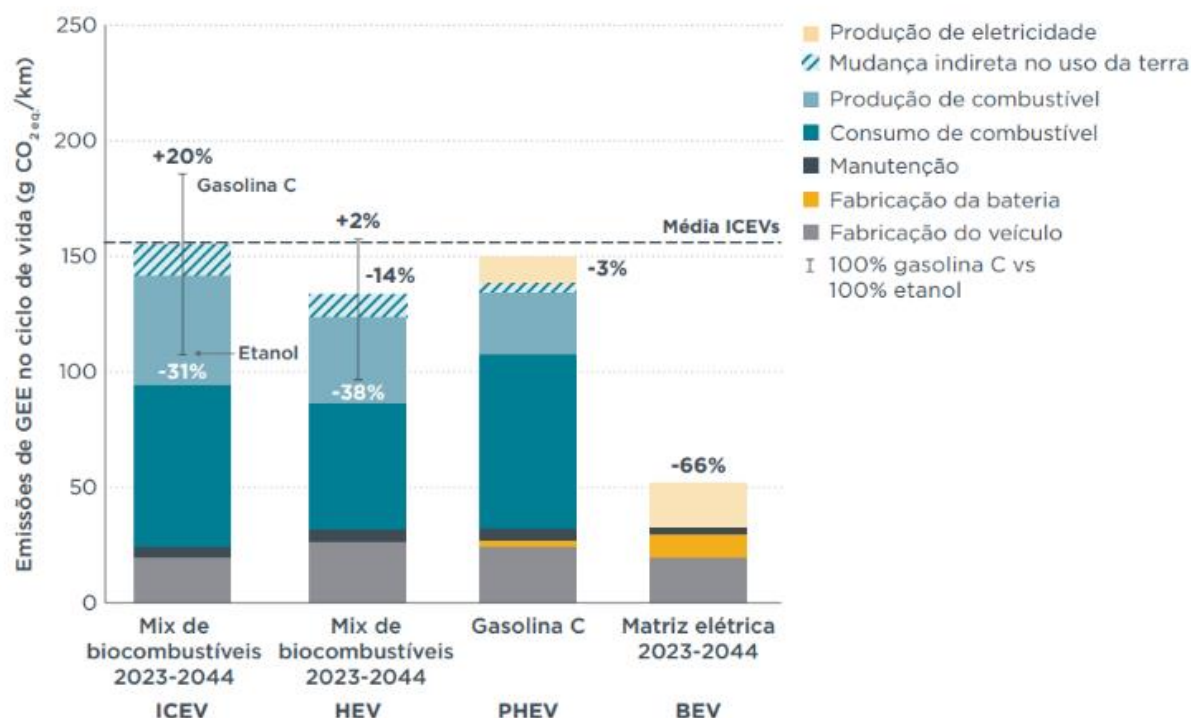
	Óleo (%)	Carvão (%)	Gás Natural (%)	Nuclear (%)	Biomassa (%)	Renováveis (%)
Brasil	2,7	3,9	6,7	2,8	6,6	77,4
China	0,5	75,2	1,4	1,8	0,9	20,2
França	1,2	3,2	4,0	76,1	1,0	14,6
Itália	2,3	18,3	46,5	0,0	4,4	28,5
EUA	2,3	42,1	25,8	19,0	1,8	10,9

Fonte: Adaptado de Orsi (2015).

Entretanto, as emissões de GEE correspondentes à produção da bateria são pequenas quando comparadas ao grande benefício do uso de BEVs em termos de emissão de GEE. Com uma substituição de bateria durante a vida útil do veículo, as emissões de GEE do ciclo de vida dos BEVs aumentariam, porém mesmo com esse aumento nos carros compactos, médios e SUVs, os valores ainda seriam 57% a 60% mais baixos que o dos ICEVs flex (MERA et al., 2023).

Como observado por Mera et al. (2023) na Figura 2.13, as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos ICEVs flex que utilizam gasolina C e etanol hidratado como combustíveis atingem 155 g CO₂ eq/km para veículos dos segmentos compacto e médio, e 181 g CO₂ eq/km para SUVs compactos. Já para os BEVs, essas emissões são 65% a 67% menores, correspondendo a 55 gCO₂eq/km para carros compactos, 52 gCO₂eq/km para carros médios e 59 gCO₂eq/km para SUVs compactos. Essa redução nas emissões de GEE dos BEVs é explicada por dois fatores principais: primeiro, o consumo de energia dos BEVs (0,7–0,8 MJ/km) é aproximadamente três vezes menor do que o dos ICEVs equivalentes (2,0–2,3 MJ/km); segundo, as emissões no ciclo energético de veículos elétricos alimentados pela matriz elétrica brasileira são quase três vezes inferiores às dos ICEVs flex que utilizam a média de mercado de gasolina C e etanol hidratado durante sua vida útil.

Figura 2.13 - Emissões de GEE do ciclo de vida de veículos médios comercializados no Brasil em 2022



Fonte: Mera et al. (2023).

Algumas outras considerações que podem ser destacadas é que a operação de ICEVs exclusivamente com etanol hidratado resulta em emissões 31% menores do que quando utilizada a média da mistura do etanol mais gasolina. Em contrapartida, utilizar somente gasolina C resulta em emissões 20% maiores. Assim, as emissões de GEE do ciclo de vida dos ICEVs flex que operam exclusivamente com etanol hidratado são duas vezes maiores que as dos BEVs. Para ICEVs que operam exclusivamente com gasolina C, as emissões são quatro vezes maiores. Para os HEVs, as emissões de GEE do ciclo de vida se apresentam 14% mais baixas que as do ICEVs quando consumida a mesma proporção de gasolina C e etanol.

Sobre os híbridos plug-in, as emissões são apenas 3% menores que as dos ICEVs flex, uma vez que as emissões de GEE são determinadas pela operação com combustível ou eletricidade. Mera et al. (2023) consideram que esse valor pode ser ainda mais baixo, pois foi considerada uma proporção de 50% utilizando operação elétrica, porém essa suposição seria otimista em comparação com valores obtidos na Europa e nos Estados Unidos, sendo que ambos possuem uma infraestrutura de recarga muito mais extensa que a do Brasil.

De acordo com estudos energéticos realizados na UNICAMP, para as análises do ciclo de vida é necessário observar o tempo considerado para o ciclo de vida da bateria e quantos quilômetros estão sendo contabilizados. Caso o estudo ultrapasse o tempo de garantia das

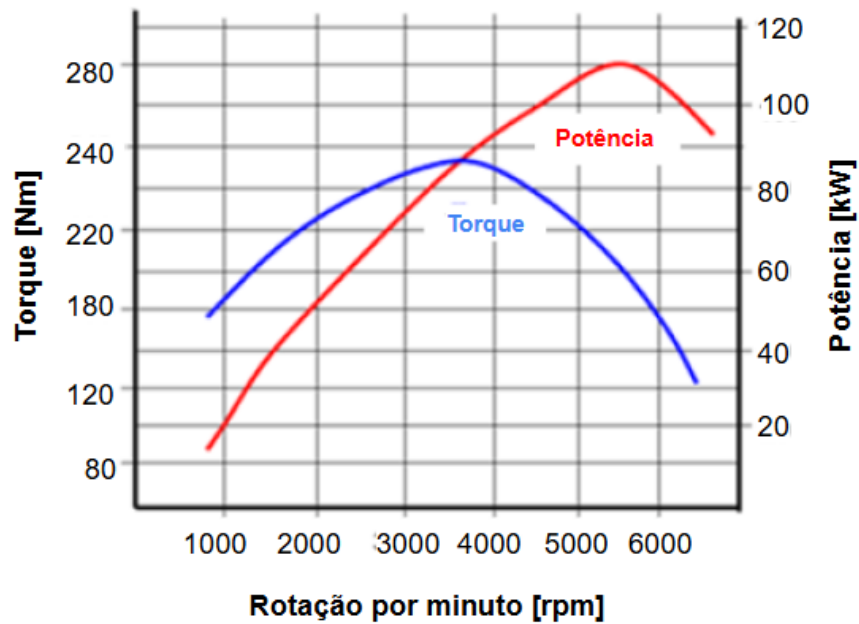
baterias indicado pelo fabricante, seria necessário contabilizar a troca das mesmas, o que muitas vezes não acontece. Com isso, a emissão de GEE na fabricação das baterias é diluída em um período de tempo e quilometragem muito maiores (IEA BIOENERGY, 2024).

2.2.5. DESEMPENHO DO VEÍCULO ELÉTRICO X VEÍCULO A COMBUSTÃO

Em relação ao desempenho, há uma grande diferença entre as curvas de torque e potência dos motores a combustão em relação aos elétricos. Nos motores a combustão interna, a rotação do motor relaciona essas duas curvas e o pico delas geralmente não coincide. Sendo assim, em uma certa rotação, o motor disponibilizará o máximo torque, e em outra, a máxima potência, e a partir de uma determinada rotação, o motor passa a ser ineficiente. Nos motores elétricos, o sistema é diferente: não existe caixa de marcha e os potenciômetros situados no pedal do acelerador regulam a quantidade de corrente a ser passada da bateria para o motor, de acordo com o acionamento do dispositivo pelo seu motorista; além disso, esses motores operam no dobro de revoluções por minuto de um MCI e seu torque é instantâneo e constante até que se atinja o máximo da potência, o que permite que o veículo se movimente em uma aceleração gradual até sua velocidade final (BRUNETTI, 2018).

De acordo com a Figura 2.14, o torque em um MCI apresenta um aumento progressivo até atingir seu máximo, por volta de 2000 rpm. Nesse momento, há seu decaimento. Porém, quando se observa a potência, ela atinge seu valor máximo em torno de 5500 rpm, antes de diminuir. Com isso, a eficiência do motor a combustão fica por volta de 35% no ponto de torque máximo. O desempenho é muito afetado pela conversão de energia térmica, pois grande parte é dissipada como calor.

Figura 2.14 - Veículo a combustão interna: Torque x Potência

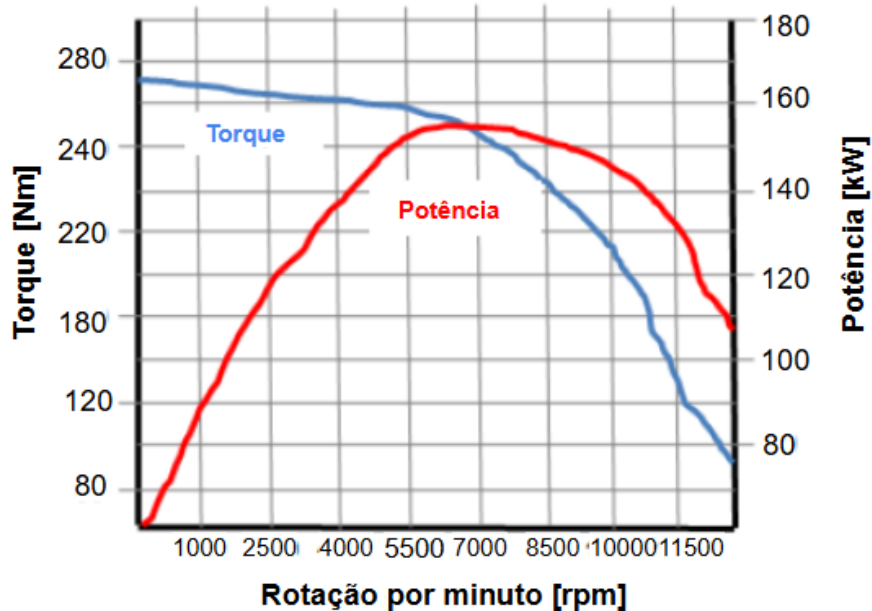


Fonte: Cavalcante Junior e Couras (2021).

Para Sinigaglia (2023), uma vantagem da utilização do etanol combustível é o índice de octanas (medida da resistência de um combustível à detonação espontânea dentro do motor) mais alto do que o da gasolina e seu alto calor latente de vaporização, que possibilitam desempenho superior e aumento da eficiência do motor a combustão.

Já na Figura 2.15, o motor elétrico apresenta torque quase constante em baixas rotações, começando a decair após 5500 rpm. Para a potência, há o crescimento até o pico, próximo de 7000 rpm, antes de decair. Portanto, ao contrário do MCI, o elétrico consegue fornecer alto torque desde o início das rotações, não necessitando da caixa de marcha, apresentando uma eficiência que pode superar 90%, o que, juntamente com a frenagem regenerativa, tornam sua eficiência maior que as de outras categorias de veículos (SOUZA, 2015).

Figura 2.15 - Veículo elétrico: Torque x Potência



Fonte: Cavalcante Junior e Couras (2021).

Adicionalmente, os motores elétricos, ao agregarem potência aos motores a combustão, permitem que esses sejam menores e mais eficientes em termos energéticos, pois podem fornecer potência adicional quando necessário (VONBUN, 2015).

Segundo Leach et al (2020), atualmente, cerca de 99,8% do transporte é movido por motores de combustão, e aproximadamente 95% da energia utilizada no transporte provém de combustíveis líquidos derivados do petróleo. Para os autores, mesmo em 2040, espera-se que 85–90% da energia do transporte ainda seja fornecida por combustíveis convencionais em MCIs, sendo fundamental melhorar o desempenho desses motores em termos de eficiência e emissões de poluentes para a redução de gases de efeito estufa.

Para reduzir emissões e o consumo de combustível sem comprometer o desempenho, será essencial aprimorar o refinamento e adaptação desses motores. Os principais desafios futuros envolvem controle de emissões, novos combustíveis, combustão aprimorada e eficiência energética (SINIGAGLIA, 2023).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Para a análise dos automóveis eletrificados no mercado nacional, observou-se a produção e comercialização desses veículos, identificando o aumento da oferta de modelos eletrificados e a adesão da população. Além disso, avaliou-se a infraestrutura necessária para abastecer essa frota e as transformações na indústria automotiva diante dessas novas tecnologias.

A questão dos combustíveis e das emissões geradas pelos diferentes modelos de veículos também foi analisada, com ênfase na viabilidade dos modelos híbridos que utilizam etanol de cana-de-açúcar. Esse biocombustível apresenta-se como uma alternativa estratégica para o Brasil devido à sua disponibilidade e menor impacto ambiental em comparação com combustíveis fósseis.

Outro aspecto relevante é a análise das baterias utilizadas nos motores elétricos, considerando sua produção, eficiência, vida útil e descarte. O impacto ambiental associado a esses fatores é significativo, influenciando métricas como a pegada de carbono e outros indicadores ambientais.

Além disso, a pesquisa inclui a análise do ciclo de vida do carbono dos veículos eletrificados. Por meio das metodologias do poço ao tanque, *well-to-tank* (WTT), e do tanque à roda, *tank-to-wheel* (TTW), identificam-se quais etapas do ciclo de vida do veículo mais contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, permitindo uma avaliação detalhada da sustentabilidade desses modelos no contexto brasileiro.

A metodologia adotada baseia-se no levantamento e análise de parâmetros técnicos, estudos acadêmicos e relatórios fornecidos por órgãos governamentais e entidades do setor automotivo. Foram considerados dados sobre vendas, infraestrutura, políticas públicas e impactos ambientais, de forma a proporcionar uma visão abrangente sobre os desafios e oportunidades dos automóveis eletrificados no Brasil.

Os documentos utilizados para o presente trabalho foram obtidos através dos sites governamentais, nacionais e internacionais, que disponibilizam esses dados de forma pública. Também foram utilizados os sites de revistas, principalmente voltadas para ciência, energia e sustentabilidade, sendo acessados de forma gratuita por meio de comprovação de vínculo com instituição de nível superior. Já os artigos acadêmicos, por meio das plataformas das instituições públicas as quais pertenciam, foram acessados e consultados também de forma gratuita.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. GASES DE EFEITO ESTUFA NO CONTEXTO DA ACV

Os GEE têm sido um tema central quando se discute mobilidade e transportes, e a utilização da ACV para medir esses valores e realizar comparações é um dos principais métodos adotados. No entanto, os parâmetros utilizados são um ponto crítico, pois podem apresentar variações que afetam os resultados. Com isso, regulamentações específicas para os estudos de ACV são fundamentais, a fim de evitar que se tornem tendenciosos, influenciados por interesses econômicos e geopolíticos. Como mencionado anteriormente, muitos países priorizam a economia, buscando segurança energética e maior independência em relação à importação de combustíveis.

Quando analisado o solo utilizado para o cultivo da matéria prima dos biocombustíveis, é necessário um ponto de atenção sobre essa questão. Esse método, conhecido como ILUC (*indirect land use change*), pode desencadear análises baseadas em cenários hipotéticos, de difícil comprovação. Por exemplo, caso a cana-de-açúcar, matéria prima do etanol, seja plantada em um terreno que anteriormente era utilizado para a plantação de outras lavouras, essa plantação pode ter sido alocada para uma área de desmatamento, então o cultivo do etanol teria tido impacto negativo no ecossistema. Entretanto, por mais que essa discussão seja válida e de inegável preocupação, é difícil obter esses dados com precisão ou confiabilidade.

Assim, caso seja utilizado o parâmetro do ILUC, o estudo pode apresentar dados que diminuam o potencial de descarbonização dos biocombustíveis, com destaque para o etanol. Esse tipo de situação pode elencar outras tecnologias em vantagem, o que de fato pode se apresentar como uma solução para outras nações, porém para o Brasil, que é um dos maiores produtores de etanol e com uma distribuição bem estabelecida, há a necessidade de maior atenção com a aplicabilidade dessas tecnologias e soluções no solo nacional. Os estudos adotados para esse trabalho utilizaram para análise do ciclo de vida a avaliação das emissões de carbono e outros gases, sem adotar o ILUC.

O que foi observado, através dos resultados apresentados nos estudos analisados, é que ao se referir à extração e ao uso de combustíveis fósseis, os ICEVs são os automóveis com maiores valores de GEE, pois suas emissões se destacam dos demais modelos. Além disso, as análises do ICEV flex demonstraram que ele e o ICEV com biocombustível se situam

no topo do ranking, pois para o flex há também a utilização dos combustíveis fósseis. No caso específico da utilização do biocombustível, o emprego de diesel no transporte da cana-de-açúcar e na distribuição do etanol combustível eleva sua ACV. Porém, uma solução para as altas taxas de emissões nessas etapas seria o emprego de etanol nos veículos que realizam esses transportes, ao invés de diesel.

Os menores resultados foram dos BEV, mesmo com o impacto da produção do automóvel e da bateria apresentando valores mais altos de GEE. O fato da matriz energética brasileira ser, em grande parte, limpa ajuda a colocá-lo em posição de destaque. Porém, apesar de serem uma potencial alternativa que apresentou grande crescimento no Brasil nos últimos 10 anos, conforme foram analisados os dados de emplacamentos, fica claro que essa tecnologia está sendo estabelecida em uma pequena parcela do país e, por isso, há a necessidade de avaliar o contexto nacional e quais alternativas podem ser adotadas como forma de mitigar os GEE e seus impactos ambientais, para que chegue a uma maior parcela da população.

4.2. DESAFIOS DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

Quando se analisa o cenário automotivo e a adoção dos eletrificados, é importante ressaltar que a discussão vai além das emissões de GEE. A França, conforme observado no Quadro 2.5, no Capítulo 2, tem sua base energética concentrada na fonte nuclear (76%). Como mostrado pela Mobilização Empresarial pela Inovação (2018), o país depende quase que integralmente da importação de petróleo, sendo boa parte destinada ao transporte, então a adoção em massa de veículos elétricos pode levar a benefícios relacionados a custos, segurança energética e redução de emissões.

Ainda segundo a Mobilização Empresarial pela Inovação (2018), devido ao uso intensivo do carvão para geração de 75,2% da eletricidade do país, a China não deverá ter redução significativa de suas emissões globais, porém, a adoção de EVs visa a diminuição das emissões concentradas. Além disso, os chineses veem a oportunidade de promover a indústria local e concorrer com as grandes fabricantes de veículos. Conforme o *Global EV Outlook* de 2024, feito pela Agência Internacional de Energia (IEA), em 2023, mais de 1 a cada 3 carros novos registrados na China eram elétricos, aumentando em 35% em relação a 2022 (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2023).

Embora as vendas de carros elétricos estejam aumentando em nível mundial, continuam significativamente concentradas em apenas alguns dos principais mercados. Segundo a IEA (2024), em 2023, cerca de 60% dos novos registros de automóveis ocorreram na China, em torno de 25% na Europa e 10% nos Estados Unidos. Combinados,

correspondem a quase 95% das vendas globais de automóveis elétricos. Em contrapartida, na África e Oriente Médio, os carros elétricos ainda são raros, representando menos de 1% do total de vendas.

Um dos pilares para a implantação de automóveis elétricos é a colaboração entre o governo e a iniciativa privada. No final de 2023, o Brasil implementou o Programa de Mobilidade Verde e Inovação (MOVER), que visa promover a expansão de investimentos em eficiência energética, através de incentivos fiscais ao setor, totalizando mais de R\$ 19 bilhões, entre 2024 e 2028 (GOVERNO FEDERAL, 2023). Através dessa medida, diversas montadoras atuantes no país decidiram investir em desenvolvimento, estudando modelos híbridos movidos a etanol e eletricidade. Além disso, a BYD está investindo mais de USD 600 milhões em sua fábrica no Brasil, a primeira fora da Ásia (IEA, 2024).

Os EVs têm tido destaque principalmente quando se fala de veículos leves (automóveis e motocicletas). Porém, a aplicação dessa tecnologia não tem se restringido somente a essa categoria. Como observado anteriormente, em 2017 já havia mais de 400 ônibus com tração elétrica em operação na grande São Paulo. A aviação também vem apresentando tendências de eletrificação, sendo a Embraer e a WEG as empresas brasileiras responsáveis pela eletrificação na aeronáutica (EMBRAER, 2023). Ambos os setores precisam reduzir suas emissões, pois além de trazer benefícios para o meio ambiente e para a saúde humana, outro ganho com a aplicação de motorização elétrica é a diminuição do ruído gerado por eles, impactando também na saúde da população.

Apesar dos ganhos que a utilização de motores elétricos apresenta, as baterias empregadas nos mesmos expõem o desafio de ser encontrada a melhor solução em questão de sustentabilidade para a mobilidade urbana. Os metais utilizados são de fonte finita, e a grande quantidade de energia empregada na extração da matéria-prima, o descarte e a reciclagem são alguns dos pontos de atenção que vem sendo levantados acerca das baterias.

Atualmente, as baterias de íon-lítio são as mais utilizadas. Como foi discutido, mais de 90% do lítio está concentrado em apenas três países. Essa distribuição geográfica limitada gera preocupações quanto à necessidade de políticas estáveis, garantindo que as relações entre esses países e o restante do mundo sejam cooperativas, assegurando um fornecimento contínuo e seguro. Além disso, outros metais citados, como cobalto, manganês, níquel e grafite também são utilizados em processos da cadeia de produção e abastecimento dos motores elétricos, e da mesma forma apresentam reservas limitadas.

A implementação dos EVs no Brasil enfrenta ainda a barreira social e demográfica. Esses veículos possuem um valor de compra muito acima de automóveis com MCI, dificultando a troca da frota em curto prazo. Além disso, a implantação da infraestrutura de recarga por todo o território nacional teria um custo elevado para os cofres públicos e privados,

pois apesar de empresas privadas realizarem essas instalações, ainda há a necessidade de adaptar as regiões para essa demanda de energia elétrica, para que não haja apagões ou quedas de eletricidade em momentos de grande fluxo de carregamento. Sinigaglia (2023) destaca ainda que, em muitos países da Europa precursores da disseminação de veículos elétricos, a crise energética ocasionada pela situação política na Ucrânia tem aumentado as dificuldades para adoção dos mesmos em larga escala.

Através do Quadro 2.3, no Capítulo 2, nota-se que o consumo energético do modelo PHEV do Tiggo 8 é cerca de 3 vezes maior que o modelo ICEV, o que pode ser atribuído ao fato do motor elétrico apresentar uma menor perda de energia. Na coluna de CO₂, o modelo plug-in destaca-se também com emissões mais baixas. O estudo dos veículos híbridos movidos a etanol é de grande relevância para o Brasil, pois combina os benefícios de ambas as tecnologias. De um lado, o etanol se destaca pelo baixo nível de emissões de gases de efeito estufa; de outro, a tecnologia híbrida contribui para aumentar a autonomia do veículo, tornando essa alternativa ainda mais eficiente e sustentável.

O Capítulo 2 apresentou o funcionamento dos veículos híbridos combinados (HEV-SP), que se diferenciam pela alta eficiência ao operar o motor a combustão em sua faixa de máximo rendimento, em conjunto com o sistema elétrico. Essa combinação permite que ambas as formas de propulsão sejam acionadas nos momentos mais adequados, garantindo um melhor desempenho. Por essa razão, seu estudo e aplicação representam uma alternativa promissora para o mercado brasileiro, que já conta com automóveis utilizando essa tecnologia, apontando um caminho para o desenvolvimento futuro.

No Quadro 2.4, apresentado no Capítulo 2, quando se compara Haval H6 HEV com o PHEV, a diferença de consumo energético é explícita, pois o HEV apresenta o maior consumo energético, o que demonstra como os HEV são menos eficientes que os PHEVs e BEVs. Outro destaque é para os dois PHEVs do quadro. Comparando os modelos PHEVs dos Quadros 2.3 e 2.4, o Song Plus e o H6 possuem emissões mais altas que o Tiggo 8, que conta com um motor a combustão e dois elétricos. Ou seja, já há tecnologias capazes de combinar a utilização de motores elétricos e a combustão de forma que tenham bons valores energéticos e baixas emissões.

Tecnologias que mitiguem a utilização de combustíveis fósseis são uma boa saída para o Brasil, uma vez que ele tem quase 80% de sua matriz energética baseada em fontes renováveis, e sua estrutura de distribuição e abastecimento do etanol já está bem consolidada. Alternativas como PHEV, HEV e FFV podem servir como ponte nessa transição de tecnologias, além de promover o setor sucroenergético do país.

4.3. VIABILIDADE DO ETANOL

A utilização de biocombustíveis é uma das alternativas para os países que não conseguem realizar a transição para a frota eletrificada em curto prazo, apesar de terem interesse em reduzir suas emissões. O etanol surge como uma solução para a evolução de tecnologias já existentes, de forma que se possa aproveitar as décadas de desenvolvimento dos MCIs, que são uma tecnologia madura e já empregada.

Conforme observado no Quadro 2.1, citado no Capítulo 2, poucos países podem se considerar donos de matrizes energéticas limpas, e uma quantidade menor ainda faz parte da OCDE, sendo os países que teriam maior facilidade no emprego de novas tecnologias, como a difusão de VEs. Os países em desenvolvimento que apresentam valores positivos de fontes de energia sustentáveis ainda contam com obstáculos econômicos e políticos, o que determina atraso na aderência às inovações tecnológicas

A existência de uma matriz energética efetivamente renovável é positiva, pois reduz o impacto ambiental e proporciona independência energética. A definição da fonte de energia mais adequada deve considerar, sobretudo, as condições da matriz energética de cada região do planeta. Malaquias et al. (2019) acreditam que a hibridização, combinando motores a etanol, altamente eficientes e compactos, com motores elétricos, seja uma excelente solução para muitos dos desafios atuais da indústria automotiva e um modelo para futuros desenvolvimentos.

Alguns pontos negativos que o etanol apresenta são a necessidade de um volume aproximadamente 50% maior de combustível para gerar a mesma potência quando comparado a gasolina. Por ser um álcool, possui maior potencial de corrosão para os componentes do motor e seus sistemas, exigindo uma tecnologia própria para a utilização desse combustível. Além disso, apesar da maior parte do Brasil ser de clima tropical com altas temperaturas, a utilização do etanol apresenta dificuldades no arranque em temperaturas baixas, o que pode ocasionar baixa aceitação em locais que tenham climas mais frios (MALAQUIAS et al, 2019).

A aplicação do etanol poderia entrar em conflito com a ideia de os países reduzirem a dependência de combustíveis importados, pois o etanol se restringe a poucos países produtores; mesmo que houvesse a expansão de cultivo e da produção, dada a característica para o plantio de cana-de-açúcar, ainda haveria restrição na oferta do biocombustível. Portanto, é extremamente importante desenvolver tecnologias automotivas aplicadas para o Brasil, pois o país seria um dos principais beneficiados a partir da expansão do uso desses veículos.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

A introdução de uma nova tecnologia no mercado acarreta a movimentação de toda uma rede. No caso dos veículos eletrificados, nessa nova cadeia de produção há a necessidade da participação do governo, das empresas distribuidoras de eletricidade, donos de postos de recarga, usuários de veículos e centros de pesquisa. Todos esses colaboradores precisam estar alinhados para que a implantação dessa nova matriz seja bem sucedida.

Os veículos elétricos podem ser um caminho para um futuro mais sustentável, porém é necessário que cada região e organização governamental analise quais as tecnologias que melhor se aplicam a seu cenário. Além disso, direcionamentos devem ser feitos para responder perguntas como: qual a melhor tecnologia para ter a menor dependência energética externa? A tecnologia consegue ser aplicada no contexto social dessa nação? Há alguma solução sustentável em termos de combustíveis e energia limpas que o país já possui e pode explorar? Esses direcionamentos auxiliam a análise do contexto nacional em que se está inserido.

Outro ponto importante é a necessidade de cautela ao afirmar que os VEs possuem emissões zero, pois o fato desses veículos não emitirem gases de efeito estufa não significa que estão isentos de impacto ambiental. O estudo provou que há valores elevados de GEE ao longo de todo o ciclo de vida dos eletrificados, desde a extração de matérias-primas, a produção das baterias e componentes, até a consideração de sua vida útil pela necessidade da reciclagem dos seus componentes. Além disso, tem-se a toxicidade dos metais da bateria, influenciando a vida dos trabalhadores que são responsáveis por extrair esses materiais.

A importância das indústrias, que estão em solo brasileiro, de desenvolverem produtos para o contexto nacional é fundamental, pois como foi citado anteriormente, para a utilização do etanol são necessárias alterações nos componentes mecânicos do sistema. Além disso, através de legislações e incentivos governamentais, determinadas tecnologias podem apresentar maior desenvolvimento, aumentando seu impacto no mercado. Caso o VE seja a principal tecnologia de mobilidade no futuro, ainda seria de máxima importância que houvesse o desenvolvimento dessas tecnologias aqui, para que outros segmentos do mercado nacional participassem e se beneficiassem dessas mudanças.

Como a tecnologia dos motores a combustão já está consolidada e amplamente aceita pela população, incentivar seu desenvolvimento para que possa alcançar novos níveis de eficiência e melhores processos de fabricação é um caminho válido.

Dessa forma, não há uma única tecnologia com o melhor desempenho em todos os aspectos analisados, e sim diversos caminhos e opções de mercado que podem atender interesses, o que depende do contexto onde forem aplicados. A análise de cenário empregada neste trabalho foi um recorte de um tema extremamente amplo, que pode ser estudado abrangendo outros tópicos como mudanças climáticas, crescimento ou recessão econômica das nações, custo de produção, comportamento do consumidor, cultura local, desigualdade social e acesso a recursos, além do nível de desenvolvimento tecnológico da região, capacidade produtiva e escalabilidade da referida tecnologia.

Assim sendo, como sugestão, caberá a estudos posteriores analisarem como será o comportamento do Brasil frente a essas inovações no mercado automotivo e de mobilidade, também observando como as discussões sobre o emprego do etanol nesses setores pode ser explorado. Como o Brasil está à frente na utilização desse biocombustível, deve se apresentar como principal ator nesse debate.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. V.; SANTOS, N. D. S. A.; ROSO, V. R.; SEBASTIÃO, R. C. O.; PUJATTI, F. J. P. Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, janeiro. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110196>>.

ARENGUES, I. R.; SIQUEIRA, A. F.; AGUIAR, L. G.; RÓS, P. C. M.; NAPOLEÃO, D. A. S. IZÁRIO FILHO, H. J.; ANCÂNTARA, M. A. K. Veículos elétricos: Um estudo descritivo de seus impactos ambientais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, 2022. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.32235>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (ABVE). **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024**. Janeiro, 2025. Disponível em: < <https://abve.org.br/eletrificados-superam-previsoes-passam-de-170-mil-e-batem-todos-os-recordes-em-2024/>>. Acesso em: 8 de jan. 2025.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese 2024**: Ano Base 2023. 2024.

BARBOSA, P. B.; ECKERT, J. J., ROSO; V. R., PUJATTI, F. J. P.; SILVA, L. A. R.; and GUTIERREZ, J. C. H. Fuel saving and lower pollutants emissions using an ethanol-fueled engine in a hydraulic hybrid passengers vehicle. **Energy**, v. 235, p. 121361, novembro. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121361>>.

BIEKER, G. **A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars**. Berlim, Alemanha. 2021.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 2ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

CASTEL-BRANCO, A. J. P. S. **Configuração ótima de um veículo híbrido com motor de combustão interna**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Lisboa, Portugal, 2014.

CASTRO, B. H.; FERREIRA, T.T. **Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, out. 2010.

CAVALCANTE JÚNIOR, L. C. P.; COURAS, D. J. N. P. **Análise comparativa da substituição de motores a combustão por motores elétricos no setor de transportes**.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural do Semiárido, Rio Grande do Norte, 2021.

CILLERUELO, J. L. **Estudio energético, económico y medioambiental de los e-fuels para automoción en comparación con los vehículos eléctricos de baterías**. 2024. 75 f. Dissertação – Universidade do País Basco. País Basco, Espanha, 2024.

CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO (ICCT). **Evolução recente do mercado brasileiro de veículos leves: a chegada de elétricos e híbridos (2021–2024)**. [S.l.].

CORREA, F. C. **Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela**. 2013. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas). São Paulo, 2013.

DAS, H.; RAHMAN, M.M.; LI, S.; TAN, C.W. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 1 mar. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>>.

DU, K.; ANG, E. H.; WU, X.; LIU, Y. Progresses in sustainable recycling technology of spent lithium-ion batteries. **Energy and Environmental Materials**, p. 1012-1036. 2022. DOI: 10.1002/eem2.12271

EMBRAER. **Embraer expõe avião elétrico pela primeira vez no Congresso SAE Brasil, em São Paulo**. 2023. Disponível em: <<https://embraer.com/br/pt/noticias?slug=1207267-embraer-expoe-aviao-eletrico-pela-primeira-vez-no-congresso-sae-brasil-em-sao-paulo>>. Acesso em: 02 de mar. 2025.

ESCOBAR, J. C.; LORA, E. S.; VENTURINI, O. J.; YÁÑEZ, E. E.; CASTILLO, E. F.; ALMAZAN, O. Biofuels: Environment, technology and food security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], p. 1275–1287. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>>.

FAZENDA E PLANEJAMENTO. **Governo de São Paulo lança programa de incentivo aos veículos sustentáveis**. 2022. Disponível em: <<https://portal.fazenda.sp.gov.br/Noticias/Paginas/Governo-de-S%C3%A3o-Paulo->

lan%C3%A7a-programa-de-incentivo-aos-ve%C3%ADculos-sustent%C3%A1veis.aspx>.
Acesso em: 20 de nov. 2024.

FAZENDA E PLANEJAMENTO. **Sefaz-SP regulamenta Lei que garante isenção de IPVA para veículos menos poluentes**. 2024. Disponível em:
<<https://portal.fazenda.sp.gov.br/Noticias/Paginas/Sefaz-SP-regulamenta-Lei-que-garante-isen%C3%A7%C3%A3o-de-IPVA-para-ve%C3%ADculos-menos-poluentes.aspx>>. Acesso em: 20 de nov. 2024.

FGV ENERGIA. **Carros Elétricos**. Rio de Janeiro, 2017.

GARCIA, A.; MONSALVE-SERRANO, J.; MARTÍNEZ-BOGGIO, S.; RÜCKERT, V. R.; DUARTE, N. S. A. S. Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles. **Renewable Energy**, v.150, p. 58–77. 2020. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.102>>.

GOVERNO FEDERAL. **Programa de Mobilidade Verde é lançado**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. 2023. Disponível em:
<<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/dezembro/rograma-de-mobilidade-verde-e-lancado>>. Acesso em: 8 de dez. 2024.

IEA (International Energy Agency). **Global EV Outlook 2024: Moving towards Increased affordability**. [S.I.]. 2024.

IEA BIOENERGY. **Comparative analyses of carbon emissions from electric and hybrid vehicles: who's right after all?**. International Energy Agency, 2024. Disponível em:
<<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/comparative-analyses-of-carbon-emissions-from-electric-and-hybrid-vehicles-whos-right-after-all/>>. Acesso em: 5 de fev. 2025.

INMETRO. **PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM VEICULAR – PBEV: Veículos leves 2024 - 16º Ciclo**. 2024.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). **ITF Transport Outlook 2023**. OECD Publishing. Paris, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>>.

KNOLL, K.; WEST, B.; CLARK, W.; GRAVES, R.; ORBAN, J.; PRZESMITZKI, S.; THEISS, T. Effects of Intermediate Ethanol Blends on Legacy Vehicles and Small Non-Road Engines. **National Renewable Energy Laboratory**. Colorado, Estados Unidos, 2009.

LEACH, F.; KALGHATGI, G.; STONE, R.; MILES, P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. **Transportation Engineering**, [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>>.

LI-BRIDGE. **Building a Robust and Resilient U.S. Lithium Battery Supply Chain**. Estados Unidos, 2023.

MAGDALON, I. M. **Valorização das Baterias de Iões Lítio em Fim de Vida de Veículos Elétricos**. 2021. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, 2021.

MALAGUIAS, A. C. T.; DINIZ NETTO, N. A.; RODRIGUES FILHO, F. A.; COSTA, R. B. R.; LANGEANI, M.; BAÊTA, J. G. C. The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the Brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. [S.l.], novembro. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-019-2076-1>>.

MARTINS, F.; FELGUEIRAS, C.; SMITKOVA, M.; CAETANO, N. Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. **Energies**, v. 12, p.964. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en12060964>>.

MASELLI FILHO, M. **Life cycle assessment of battery electric and internal combustion engine vehicle in the context of São Paulo**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MERA, Z.; BIEKER, G.; REBOUÇAS, A. B.; CIEPLINSKI, A. Comparação das emissões de gases de efeito estufa o ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil. **Conselho Internacional De Transporte Limpo (ICCT)**. [S.l.], 2023.

MISHRA, G.; JHA, R.; MESHARAM, A.; SINGH, K. K. A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. [S.l.], setembro. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108534>>.

MOBILIZAÇÃO EMPRESARIAL PELA INOVAÇÃO. **Estudo de sistema produtivo automotivo**. Brasília, 2018.

MOREIRA, Y. H. B.; MANTEGAZINI, D. Z.; ANDRADE, G. R. S.; BACELOS, M. S. Reciclagem de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e

perspectivas. **Brazilian Journal of Production Engineerin**, Espírito Santo, fevereiro. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i1.42817>>.

MOURAD, M.; MAHMOUD, K. Investigation into SI engine performance characteristics and emissions fuelled with ethanol/butanol-gasoline blends. **Renewable Energy**, v. 143, p. 762-771. [S.l.], maio. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.064>>.

NASA. **NASA, MagniX Altitude Tests Lay Groundwork for Hybrid Electric Planes**. 2024. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-magnix-test-hybrid-electric-planes/>>. Acessado em: 7 de janeiro de 2025.

NEOCHARGE. **Conheça os tipos de carros elétricos**. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>>. Acessado em: 28 de novembro de 2024.

ORSI, F.; MURATORI, M.; ROCCO, M.; COLOMBO, E.; RIZZONI, G. A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. **Applied Energy**, p. 197-209. [S.l.], dezembro. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.039>>.

PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA (PNME). **1º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica**. Brasília e Rio de Janeiro, 2020.

POMPERMAYER, F. M. **Veículos elétricos: via de mão única ou dupla?**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

REIS, S. R.; SILVA, E. A. Motores Elétricos Flex a Etanol: uma nova Era no Setor Automotivo Mundial. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologias**, São Paulo, v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17921/1890-1793.2017v12n12p45-48>>.

REUTERS. **Brazil surpasses Belgium as top export market for Chinese EVs, hybrids, data shows**. Maio, 2024. Disponível em: <<https://www.reuters.com/business/autos-transportation/brazil-surpasses-belgium-top-export-market-chinese-evs-hybrids-data-shows-2024-05-27/>>. Acesso em: 10 de nov. 2024.

RIBEIRO, S. **Mobilidade Elétrica e Estações de Recarga para Veículos Elétricos: Um Estudo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2022.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **50 ônibus elétricos chegam a São Paulo: O clima e os paulistanos agradecem!.** 2023. Disponível em:

<https://capital.sp.gov.br/web/secretaria_executiva_de_mudancas_climaticas/w/noticias/354556#:~:text=Com%20isso%2C%20a%20frota%20do,270%20ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20em%20circula%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 2 de dez. 2024.

SINIGAGLIA, T. **Análise do ciclo de vida da tecnologia dos veículos com motores de combustão interna e dos veículos eletrificados.** 2023. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Maria). Rio Grande do Sul, 2023.

SOUZA, L. L. P. **Avaliação do ciclo de vida do sistema veículo/combustível no Brasil.** 2015. 150 f. 2015Dissertação (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2015.

TELLI, G. D. **Análise do desempenho de um motor a combustão de ignição por compressão monocilíndrico no funcionamento bicombustível diesel-etanol.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de Caxias do Sul). Rio Grande do Sul, 2018.

TILLMANN, C. A. C. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas.** Rio Grande do Sul, 2013.

VELASQUEZ, C. E.; CHAVES, G. M.; MOTTA, D. M.; BITENCOURT, F. G. L.; ESTANISLAU. Carbon dioxide life cycle assessment for Brazilian passenger cars fleet towards 2050. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** [S.l.], outubro. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113952>>.

VONBUN, C. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: Uma revisão da literatura.** Instituto de Pesquisa Aplicada, Brasília, 2015.

WANG, W.; SONG, R.; GUO, M.; LIU, S. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle. **Mechanism and Machine Theory.** China, março. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.019>>.