

**ICENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW
DA FONSECA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLOS LEONARDO R. BERRIEL

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS VEICULARES: EMISSÕES
VIABILIDADE ECONÔMICA E O FUTURO DA MOBILIDADE NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2025**

CARLOS LEONARDO R. BERRIEL

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS VEICULARES: EMISSÕES
VIABILIDADE ECONÔMICA E O FUTURO DA MOBILIDADE NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Jonatas Motta Quirino

**RIO DE JANEIRO
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B533 Berriel, Carlos Leonardo R.

Análise comparativa das tecnologias veiculares: emissões
viabilidade econômica e o futuro da mobilidade no Brasil / Carlos
Leonardo R. Berriel – 2025.

68f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 64-68.

Orientador: Jonatas Motta Quirino.

1. Engenharia mecânica. 2. Motores elétricos. 3. Motores
híbridos. 4. Transição energética. I. Quirino, Jonatas
Motta (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Dedico este trabalho à minha família e a todos aqueles que acreditaram, incentivaram e compartilharam do meu sonho. Todo esforço, sacrifícios, renúncias e momentos de ausência, nos trouxeram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Neste momento, frustro-me comigo mesmo pois sei que, infelizmente, não conseguirei lembrar de todos que contribuíram para esta jornada. Concluir a graduação e me tornar engenheiro mecânico é um sonho! E a lista de agradecimentos é enorme:

Primeiro, agradeço a Deus, meus Orixás, Exu e a toda a Espiritualidade pelas oportunidades, esclarecimentos e ajuda em absolutamente todos os momentos da minha vida. Agradeço à minha família: meus pais e irmão. Foram estes que me deram força, que sempre me ampararam e incentivaram incansavelmente em todos os momentos, dando-me oportunidade de planejar, projetar e executar meus sonhos. Ao Rafael, pelos nossos momentos de parceria, descontração e sabedoria transmitidas por um adolescente 11 anos mais novo. Muito foi graças a eles.

À minha companheira, Stella, por ter proporcionado momentos únicos e especiais, enquanto estive ao meu lado para as batalhas e desafios que tive que enfrentar.

Ao CEFET que foi minha segunda casa por anos, me proporcionando oportunidades profissionais onde também conheci pessoas e profissionais incríveis; em especial à Equipe Alpha de FSAE por ter me aproximado ainda mais do automobilismo e materializado amizades incríveis. Ao Vinicius Vieira, Felipe Moraes, Ricardo Rocha, Lucas Alexandre, Lucas Costa, Matheus Garcia, Lucas Domingues, Daniel e a todos os Equilibrados MEC e parceiros de turma que conheci pós-pandemia.

A mim mesmo, por não ter desistido, por ter insistido e continuado, não importa o quão difícil fosse ou quantas vezes eu me decepcionasse. Minhas metas sempre foram claras e trabalho para alcançar cada uma delas, sou imensamente grato por encontrar pessoas que, de alguma forma, serviram de motivação ou suporte.

Ao Prof. Dr. Alexandre Lima Silva, pela orientação ao longo dos anos de Alpha, por ter sido referência profissional e pelas longas conversas e gargalhadas, quer fossem sobre motores, cervejas ou viagens. Que esteja em paz, meu amigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jonatas Motta Quirino, pela paciência, colaboração e contribuição neste trabalho. Por sempre ter sido solícito em todas as vezes que o procurei, e nunca ter se negado a ensinar, esclarecer dúvidas ou se debruçar sobre o trabalho.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e desta graduação.

Seja você quem for, seja qual for a
posição social que você tenha na vida, a
mais alta ou a mais baixa, tenha sempre
como meta muita força, muita
determinação e sempre faça tudo com
muito amor e com muita fé em Deus, que
um dia você chega lá. De alguma maneira
você chega lá.

(SENNÁ, Ayrton, 1990)

RESUMO

BERRIEL, Carlos Leonardo. **Análise Comparativa Das Tecnologias Veiculares: Emissões, Viabilidade Econômica E O Futuro Da Mobilidade No Brasil.** 2024. 68. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

A quantidade de veículos no Brasil tem aumentado consideravelmente nos últimos 25 anos. Sendo muito mais do que um meio de transporte, os veículos são produto e instrumento de prestação de serviços: otimizam tempo, movimentam pessoas, cargas, e o PIB brasileiro. Todavia, ainda que as regulações avancem rumo à descarbonização e redução de emissões de gases de efeito estufa, os veículos são fortes ofensores ao meio ambiente. Atualmente seu impacto é conhecido, quantificado e reportado, do berço ao túmulo. A Transição Energética é uma das estratégias que compõem os compromissos globais para amenizar os impactos das Mudanças Climáticas, e um primeiro passo para revertê-las. Ao analisar os principais relatórios de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil, observou-se que o setor de Transportes é o maior emissor de GEE no país. A partir disso, este estudo fora iniciado com o objetivo de analisar a principal proposta para reduzir a emissão de dióxido de Carbono e Gases de Efeito Estufa do setor em questão: a eletrificação dos veículos. Com uma abordagem contemplando todo o ciclo de vida dos veículos, este estudo apresenta uma sólida revisão bibliográfica, buscando argumentos favoráveis e contrários à iniciativa, e busca quantificar se a implementação de veículos elétricos, na frota brasileira, faz sentido pelas perspectivas econômicas (ao usuário/consumidor) e ambientais. O estudo considera premissas e especificidades do cenário brasileiro, tais quais regulações, composições de combustíveis, matriz energética, e outras características. Respeitando longas pesquisas de pegada de CO₂ ao longo do ciclo de vida e analisando os custos de cada uma das opções apresentadas no desenvolvimento do trabalho, a conclusão aponta qual das opções é mais estratégica. Ao contemplar custos de aquisição, manutenção e operação dos veículos, este trabalho conclui qual é a melhor alternativa para o consumidor, mantendo a prerrogativa de impacto ambiental e investimento necessário, defendendo a continuidade dos motores a combustão interna.

Palavras-chave: Transição Energética. Veículos Elétricos. Motores a Combustão. Veículos Híbridos. Eficiência Energética.

ABSTRACT

BERRIEL, Carlos Leonardo. **Comparative Analysis of Vehicle Technologies: Emissions, Economic Viability, and the Future of Mobility in Brazil**. 2024. 68. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

The number of vehicles in Brazil has increased considerably over the past 25 years. More than just a means of transportation, vehicles are both a product and an instrument for delivering services: they optimize time, move people and goods, and drive Brazil's GDP. However, despite regulatory advancements toward decarbonization and the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions, vehicles remain major environmental offenders. At present, their impact is well known, quantified, and reported from cradle to grave. The Energy Transition is one of the strategies within the global commitments to mitigate the impacts of Climate Change and represents a first step toward reversing them. By analyzing the main greenhouse gas emissions reports in Brazil, it was observed that the transportation sector is the country's largest GHG emitter. Based on this finding, this study was initiated with the objective of analyzing the main proposal to reduce carbon dioxide and greenhouse gas emissions in the sector: vehicle electrification. With an approach encompassing the entire life cycle of vehicles, this study presents a comprehensive literature review, seeking both supporting and opposing arguments to this initiative. It also aims to quantify whether the implementation of electric vehicles in the Brazilian fleet is feasible from both: economic perspective (for the consumer) and an environmental perspective. The study considers assumptions and specificities of the Brazilian context, such as regulations, fuel compositions, energy matrix, and other characteristics. By respecting extensive research on CO₂ footprint throughout the life cycle and analyzing the costs of each option presented, the conclusion identifies which option is the most strategic. By evaluating acquisition, maintenance, and operational costs, this work determines the best alternative for consumers, maintaining the premise of environmental impact and required investments - ultimately, it defends the continuation of internal combustion engines.

Keywords: Energy Transition. Electric Vehicles. Internal Combustion Engines. Hybrid Vehicles. Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo Energético no Brasil em 2023, BEN 2024.....	15
Figura 2 - Projeções Shell e Agência Internacional de Energia (IEA) sobre consumo energético. Fonte: Shell, 2024.....	16
Figura 3 - Emissão Total de CO2 (1965-2023), Energy Institute.....	22
Figura 4 - Produção de Biocombustível em 2022, Energy Institute.....	24
Figura 5 - Frota Nacional de Veículos (adaptado de Ministério dos Transportes, Outubro/2024).....	27
Figura 6 - Veículo movido a um motor de combustão - adaptado de HONDA, 2024	28
Figura 7 – os 4 tempos do Ciclo Otto (Fonte: https://abekwar.wordpress.com/2013/04/09/motores-a-pistao/).....	29
Figura 8 - Esquemática pistões e virabrequim (MAHLE, Motores de Combustão Interna, 2019 – p. 14).....	29
Figura 9 - Exemplo de curva Torque e Potência (JAZAR, 2008).....	30
Figura 10 - Mapa de eficiência para um motor de combustão interna genérico (JAZAR, 2008).....	31
Figura 11 - Motor de Indução Trifásico (MIT) - (New Energy and Fuel, 2010)	32
Figura 12 - Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM) - (New Energy and Fuel, 2010).....	33
Figura 13 - Comparação MIT e PMSM (New Energy and Fuel, 2010).....	34
Figura 14 - Veículo movido por motores elétricos - adaptado de HONDA, 2024	35
Figura 15 – Exemplo de Curvas de Torque e Potência em motores elétricos (EHSANI, GAO, et al, 2005).....	35
Figura 16 - Mapa de eficiência para motor de um Nissan Leaf, veículo 100% elétrico. (Davis, K. P. 2020. Simplified electric Vehicle powertrain modelling. PhD Thesis.) ..	36
Figura 17 - Veículo Híbrido - adaptado de HONDA, 2024.....	38
Figura 18 - Veículo Híbrido combinando fontes de energia - adaptado de HONDA, 2024	38
Figura 19 - Emissões médias de GEE no Ciclo de Vida de veículos selecionados (GAUTO et al., 2023)	46
Figura 20 - Custo de aquisição e operação, projetado por 10 anos. Fonte: Autor	56
Figura 21 - Custo de Aquisição e Manutenção Preventiva Programada, projetado por 10 anos. Fonte: Autor	57
Figura 22 - Custo total projetado por 10 anos. Fonte: Autor.	58
Figura 23 - Custo total extrapolado. Fonte: Autor.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Total de Emissões de CO2, por região, entre 1965 e 2023. Fonte: Autor, 2024, adaptado de Energy Institute.....	23
Tabela 2 - Oferta Interna de Energia (OIE) 2023, BEN 2024	40
Tabela 3 - Composição dos combustíveis, no Brasil, ao longo do século XXI – Fonte: Autor, 2024.....	43
Tabela 4 - Comparativo de Infraestrutura e regulações de alguns países. Fonte: Autor, 2024.....	48
Tabela 5 - Comparativo de Estratégias de Descarte de alguns países. Fonte: Autor, 2024	49
Tabela 6 - Características dos veículos selecionados - Fonte: Autor, 2024	52
Tabela 7 - Custos de aquisição e manutenção programada - Fonte: Autor	53
Tabela 8 - Custos de Combustível e Eletricidade por ano	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2 O CENÁRIO NACIONAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E POLUENTES	22
3 A EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS	26
3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	28
3.2 MOTORES ELÉTRICOS.....	31
3.2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT).....	32
3.2.2 Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM).....	33
3.3 MOTORES COMBINADOS (VEÍCULOS HÍBRIDOS).....	37
4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A ORIGEM DOS COMBUSTÍVEIS	40
4.1 INFRAESTRUTURA: CARREGAMENTO, DESCARTE E DESAFIOS REGIONAIS	46
5 ANÁLISE E PROJEÇÃO DE CUSTOS	51
5.1 CUSTOS DE AQUISIÇÃO E OPERAÇÃO.....	54
5.2 CUSTOS DE AQUISIÇÃO E MANUTENÇÃO PROGRAMADA.....	56
5.3 CUSTO TOTAL.....	57
5.4 CUSTO TOTAL EXTRAPOLADO	58
6 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a humanidade encontra como elemento central do seu desenvolvimento, a busca por energias. Há cerca de aproximadamente 1,0 a 1,7 milhão de anos, o *Homo erectus* descobriu o fogo e foi capaz de controlá-lo, habilitando os primeiros hominídeos a cozinhar alimentos, aquecer-se e iluminarem a escuridão, sendo um divisor de águas na história evolutiva. Com o passar do tempo, a humanidade seguiu explorando fontes de energias mais complexas, para reduzir esforços físicos e transformar diferentes tipos de energia, como a força dos rios, dos ventos e de combustíveis fósseis – impulsionando revoluções industriais e transformações sociais (Gowlett, 2016; Berna et al., 2012).

Todavia, a larga utilização de recursos não renováveis, trouxe desafios ambientais significativos, tais quais o aquecimento global, mudanças climáticas e degradação de ecossistemas, catalisando os impactos ambientais sentidos no planeta.

De acordo com o 6º Relatório de Avaliação de Mudanças Climáticas, elaborado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), a crise climática já é uma realidade em todo o mundo. As mudanças climáticas e seus impactos são notórios ao longo de todo o globo terrestre, com alterações de temperatura, degelos, enchentes, tempestades, aumento do nível do mar, catástrofes e eventos em proporções inéditas.

Independente de qual região tem a maior parcela de responsabilidade, a consequência virá para todos os países e todos os continentes sofrerão seus impactos. Contudo, estes desdobramentos da crise climática serão mais sentidos nos lugares com menor infraestrutura, nos países subdesenvolvidos e emergentes.

A engenharia tem um papel fundamental na adaptação entre seres humanos e o ambiente em que vivem. Não distante disso, ao longo da história da humanidade, soluções sempre foram criadas para resolver as necessidades humanas, sanar desafios, otimizar tarefas ou aprimorar os ganhos e resultados de cada uma delas.

A mesma linha de raciocínio há de ser aplicada para propor soluções à Crise Climática e Transição Energética, no Brasil e no mundo. Indiscutivelmente, o custo de reverter, as alterações climáticas, é significativamente menor que o de se adaptar a elas. Desta forma, as mudanças climáticas superaram as barreiras políticas e,

agora, tornaram-se um desafio tecnológico para a preservação ambiental e sobrevivência da espécie humana.

Neste contexto, discute-se atualmente duas grandes frentes de atuação: mitigação e redução das emissões de poluentes, através da otimização de processos industriais e Transição Energética, e tecnologias e métodos de captura, estocagem e utilização de carbono para reduzir aquilo que já está presente na atmosfera, isto é, o que já fora emitido.

A Transição Energética é um termo que tem sido amplamente discutido no planeta, sobretudo após a definição de Acordos de Políticas Energéticas (Acordo de Paris), compromissos de descarbonização e redução de emissões, e outros. Desta forma, diversas empresas dos mais variados setores (Energia, Transporte, Alimentícias, Farmacêuticas, Automotivas, Siderurgia, Cimentícias, Construção Civil e outras) têm implementado e desdobrado ações de adaptação de seus processos industriais, visando a otimização energética, tal qual redução de emissões de Gases de Efeito Estufa, redução de consumo de energias, e outros.

Há setores que são considerados de “difícil abatimento” (expressão originada do Inglês, “*Hard to abate*”), como: cimento, aço, vidro, química, alumínio, celulose e outros. Estes setores não apenas demandam elevada quantidade de energia em seus processos produtivos, como também são responsáveis por, em média, 10% das emissões de gases poluentes do Brasil.

Apesar de a América do Sul representar apenas 3,7% das emissões globais de CO₂ e o Brasil 1,2%, iniciativas de transição energética têm ganhado força no país. Motivadas por visibilidade social, econômica e governamental (da sigla em inglês, *ESG*) e estratégias de mercado, empresas brasileiras demonstram um crescente compromisso com a sustentabilidade – como dado divulgado pela Confederação Nacional da Indústria, onde aponta que 60% das empresas no país possuíam uma área ou departamento dedicado à sustentabilidade, já em 2022.

O Balanço Energético Nacional (BEN), de 2024, aponta que a oferta interna de Energia, no Brasil, tem 49,1% de origem renovável (biomassa de cana, hidráulica, eólica, solar...). Este relatório traz a análise não apenas das fontes energéticas adotadas no cenário nacional, como aponta também as características do consumo de energia no país. (EPE, 2024)

A Figura 1 traz uma segunda interpretação das informações presentes no BEN 2024, onde é possível observar que, de todo o consumo energético nacional

em 2023, 33% deste consumo foi demandado pelo setor de transporte – de carga e passageiros. Enquanto o setor industrial demandou cerca de 31,8% de todo o consumo energético deste mesmo ano de referência.

Portanto, se existe o interesse de otimizar o consumo de energia no país, será mais estratégico fazê-lo no setor que efetivamente a demanda em maior grau, isto é, no setor de Transportes.

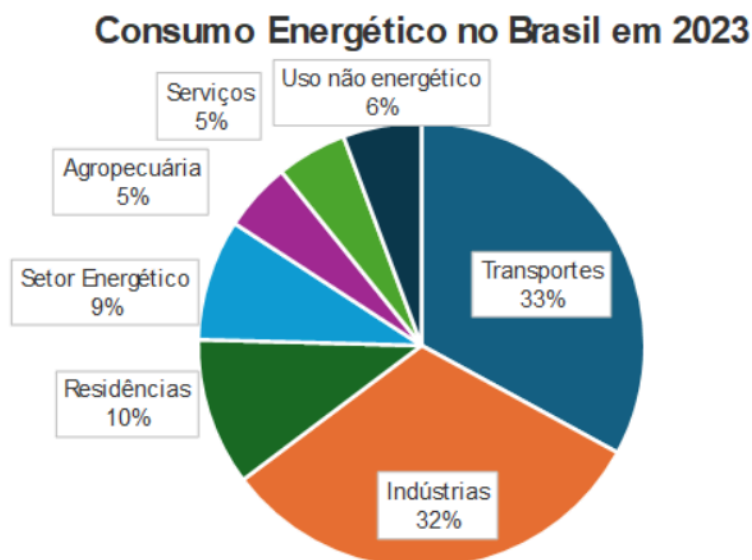


Figura 1 - Consumo Energético no Brasil em 2023, BEN 2024

Quando o relatório em questão segrega o setor de transporte, compreende-se toda a cadeia de transporte: marítima, área e terrestre – quer seja de carga, quer seja de passageiros.

Há algum tempo, as autoridades brasileiras se preocupam com as emissões e o impacto ambiental desta cadeia de transporte, dando início a programas de controle de emissões veiculares, PROCONVE – iniciado em 1986 e evoluindo ao longo de suas diferentes fases.

Em outubro de 2024, o presidente da República sancionou a lei Combustível do Futuro, visando estimular a mobilidade sustentável de baixo carbono. O projeto nasceu em 2021, onde o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) instituiu o Comitê Técnico Combustível do Futuro. A lei em questão aborda alterações da composição do combustível disponível nos postos para os consumidores - gasolina e diesel – apresenta temas como o combustível sustentável de aviação (da sigla SAF, em inglês), introduz a possibilidade de regulação para atividades de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono, e outros.

Contudo, um demasiado esforço ainda há de ser desprendido, pois de acordo com o relatório de Estratégia de Transição Energética da Shell, e dados apurados pela Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*), a expectativa é que, em 2040, a quantidade de quilômetros rodados por veículos de passageiros seja 3,1x maior do que fora em 2000 – como ilustra a Figura 2.

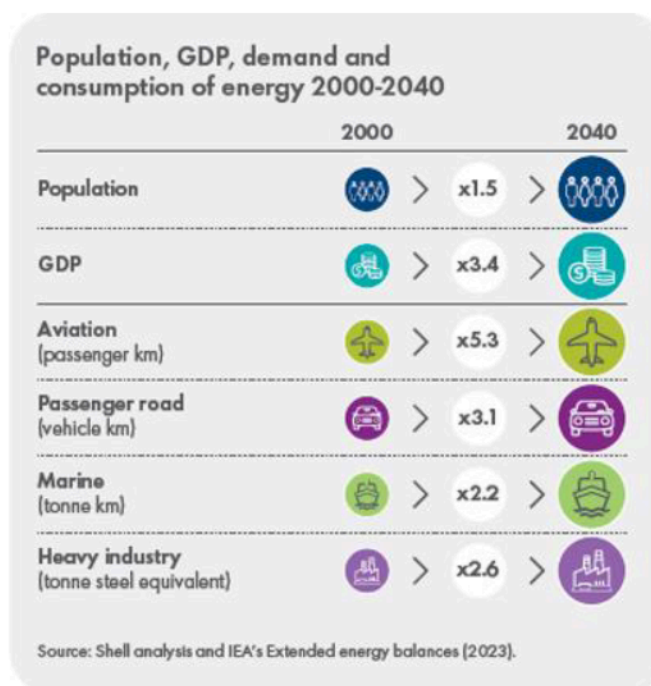


Figura 2 - Projeções Shell e Agência Internacional de Energia (IEA) sobre consumo energético.
Fonte: Shell, 2024

Neste contexto, visando iniciar a otimização do setor de transporte, sob a perspectiva de consumo energético, houve um estopim para o início deste estudo, abordado pelo presente trabalho, sobre a utilização de veículos elétricos a bateria (BEV), híbridos (HEVs) e híbridos plugin (PHEVs) no Brasil, comparando-os com os veículos movidos a motores de combustão interna (ICEVs) – analisando carros, especificamente.

Tal estudo pode ser interessante, inclusive, através da ótica de suportar a segurança energética – uma vez que, compreendendo qual a melhor alternativa, reduz-se o consumo de energia necessário para manter o sistema de transporte no país. Através deste, busca-se responder algumas questões, como: Faz sentido adotar os veículos elétricos no Brasil? O quão econômica é a utilização destes veículos, para o consumidor?

Pretende-se levar em consideração a matriz energética brasileira, bem como o fato de o Brasil utilizar biocombustíveis nos produtos disponíveis nos postos de abastecimento; custos de aquisição, eficiência, infraestrutura disponível no país para suportar estes veículos, autonomia de cada um e outros.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vonbun (2015) discute os impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e dos veículos híbridos *plug-in*. Destaca o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa, os desafios da produção e descarte de baterias, e os benefícios e custos econômicos associados à adoção dessas tecnologias. O autor encontra referências e discorre favoravelmente acerca da estratégia *Vehicle-to-grid* (V2G), onde se utiliza os veículos como grandes *power banks*, carregando-os num momento de baixo consumo da rede elétrica (à noite), e utilizando-os para devolver energia à rede nos horários de picos de demanda – estratégia interessante, porém frágil, uma vez que demandaria o compromisso de diversos usuários para que haja efetividade no sistema elétrico. Vonbun conclui que existem barreiras que impedem a substituição, no curto e médio prazo, dos veículos à combustão pelos veículos elétricos. O autor identifica grande potencial nos veículos híbridos *plug-in* pelo fato de aliar a praticidade de recarga com combustíveis fósseis, e a baixa emissão dos motores elétricos. Contudo, ressalta a importância de analisar a geração de energia, em termos financeiros e ambientais, condicionando a adoção dos híbridos à matriz energética.

Ao mesmo tempo, Souza (2010) analisa o balanço de energia e o desempenho dos veículos híbridos elétricos - incluindo cálculos detalhados e comparações de consumo de energia, eficiência e métricas de desempenho entre HEVs e veículos convencionais. Observando diferentes perspectivas, Souza considera pontos importantes nos modelos analisados: faixas de potência, torque, eficiência, recuperação de energia durante as frenagens (frenagem regenerativa), arrasto aerodinâmico, e outros. Ao finalizar o detalhado trabalho desta dissertação de mestrado, o autor ressalta a necessidade de aprimorar os sistemas de baterias, melhorando a relação de energia por massa; bem como das montadoras compreenderem os ciclos de condução de cada região específica para otimizar os

equipamentos às características de utilização. Durante suas análises, Souza traz dados que demonstram maior eficiência energética e menor custo estimado para os veículos do tipo “Híbrido Série”. Souza sugere, portanto, que haja a criação de mais modelos de dinâmica veicular para proporcionar o desenvolvimento de ciclos de condução personalizados.

Roitman (2019) busca alternativas além dos Veículos Elétricos, comparando-os com a possibilidade de explorar a coexistência de biocombustíveis e veículos elétricos no Brasil - discutindo suas contribuições para a redução de emissões, o impacto econômico da indústria de biocombustíveis e o potencial de integração com soluções de mobilidade elétrica. Apresentando o biocombustível como forte aliado às estratégias de descarbonização, a autora apresenta dados interessantes sobre o mercado nacional em 2018: de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o etanol foi responsável por 40% do consumo de combustível dos motores de combustão interna, do ciclo Otto; enquanto o biodiesel foi capaz de substituir 11% do óleo diesel. A adoção destes biocombustíveis fora capaz de reduzir em 34% as emissões equivalentes de CO₂ pelo setor de transportes. Roitman analisa as emissões de CO₂ equivalentes no mundo e no Brasil, indicando que o maior país da América Latina carece de soluções de descarbonização para o setor de transportes.

O Balanço Energético Nacional, elaborado em uma parceria entre o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), proporciona uma visão detalhada da produção, consumo, geração, emissões e tendências de energia no Brasil. Inclui dados sobre diferentes fontes de energia e suas contribuições para a rede nacional. Excelente para compreender o contexto energético mais amplo em que operam os veículos elétricos e híbridos no Brasil, e para analisar o cenário de origem da energia elétrica utilizada por estes veículos. Adicionalmente, o relatório apresenta dados de emissões equivalentes de CO₂, onde o setor de transportes é o maior ofensor ao indicador: foi responsável por emitir 217,0 Mt CO₂ eq, ou 50,7% das emissões equivalentes totais do Brasil em 2023. (EPE, 2024)

Abordando a realidade brasileira, Soeira (2023) foca na análise da implementação de veículos elétricos na matriz energética do Brasil. Avalia os potenciais benefícios, desafios e estratégias para integrar BEVs à rede nacional. Utilizando alguns modelos para projeção e análise de um cenário base e outros 3

adicionais, a autora leva em consideração dois projetos de Leis que pretendem proibir a comercialização de veículos movidos à motores de combustão interna – um pretende limitar a partir de 2040, enquanto outro pretende restringir a partir de 2060. Na dissertação de mestrado, Soeira conclui que é fundamental desenvolver uma legislação sólida para a área de eletromobilidade, de modo a assegurar que a cadeia produtiva dos Veículos Elétricos seja limpa, e não apenas uma forma de substituir o momento e origem das emissões de gases de efeito estufa – ou ainda agravá-las. A autora indica que a viabilidade da implementação dos veículos elétricos para substituir os de combustão interna, é diretamente dependente da capacidade de geração de energia e os incentivos a este setor. Soeira defende a geração de eletricidade por meio de fontes renováveis, e é outra autora que cita a estratégia “*Vehicle-to-Grid (V2G)*” como aliada ao balanço do consumo e linearização dos picos de consumo elétrico.

Contudo, não se pode ignorar os danos que a produção e utilização destes veículos trazem ao meio ambiente. Nesta linha, Hawkins *et al.* (2012) examinam os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos veículos híbridos (HEVs) e elétricos (BEVs), comparando seu potencial de aquecimento global e outras métricas ambientais com veículos de motor de combustão interna (ICEVs). O autor defende que os resultados preliminares comparativos entre os ICEVs e BEV podem ser inconclusivos ou imprecisos, pois existem diversas especificidades e diferenças que dificultam a comparação direta entre os dois modelos – e a falta de dados claros, com métricas padrões de medições para ambos, torna os estudos ainda mais incertos. Os autores concluíram, ainda em 2012, que para determinar que os veículos elétricos – ou híbridos – são mais amigáveis ao meio ambiente do que os veículos de combustão interna, é preciso compreender melhor o processo de fabricação dos três modelos, aferindo toda a pegada de carbono, emissões de GEE e impacto ambiental do processo de extração de matéria prima, fabricação e distribuição dos veículos. Bem como é de suma importância compreender a origem da energia utilizada para alimentar estes meios de transporte, pois em diversos países, sobretudo na Europa, queimam carvão para produzir eletricidade – sendo pior do que a queima dos combustíveis fósseis pelos motores de combustão interna.

Seguindo esta mesma linha de raciocínio, Gauto *et al.* (2023) exploram as vantagens e desafios dos veículos híbridos, incluindo aspectos técnicos, métricas de desempenho e benefícios ambientais. Embora desconsidere as emissões atribuídas

à Mudança do Uso das Terras (iLUC) – pois no Brasil há uma legislação mais rígida e que já previne a utilização de terras provenientes do desmatamento - ao contemplar as cadeias de produção e reciclagem, estrutura de recargas, eletricidade, combustíveis e produção de baterias, Gauto e seus colegas conseguem desmistificar a ideia de que “elétricos poluem menos”, ou que “motores de combustão interna devem ser extintos”, e até mesmo de que “híbridos são limitados à transição dos veículos a combustão para os elétricos”. Reunindo diferentes relatórios e pesquisas, os autores apresentam um estudo moderno e atualizado, comparando veículos atuais e concluindo que o veículo que apresenta menor emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) ao longo de todo o ciclo de vida, é o veículo híbrido (Não Plug-in) movido a Biometano. Os autores finalizam o trabalho com uma importante frase: “*The engine is not a problem.*” (em tradução direta, O motor não é um problema) – e provam que realmente os motores não são um problema. Sugerem que mantenham o desenvolvimento de híbridos com biocombustíveis, e ainda as células de combustível.

Diferente de Gauto e seus colegas, Mera *et al.* (2023) analisam o ciclo de vida das emissões de gases de efeito estufa de veículos com motor de combustão e carros elétricos no Brasil, comparando seu impacto ambiental geral. Com uma análise robusta e considerando diferentes aspectos como o *iLUC* (impacto indireto na mudança do uso das terras), produção dos veículos, ciclo de vida e utilização dos mesmos, Mera e seus colegas concluem que, para o contexto de geração de energia no Brasil, os veículos elétricos a bateria promovem a viabilização de zerar as emissões de CO₂ na frota de carros de passageiros, no país, até 2050 – enquanto os veículos flex de combustão interna, e híbridos (plug-in e não plug-in), não tornam esta meta alcançável dentro do prazo. Contudo, embora os veículos elétricos não emitam poluentes durante sua operação, é essencial considerar as emissões associadas à produção de baterias e à geração de energia elétrica, especialmente em regiões com fontes fósseis predominantes. Os autores sugerem que haja mais investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento de baterias e tecnologias dos carros elétricos e híbridos, para que o Brasil se mantenha atualizado e não perca a competitividade de mercado e tecnológica. Novamente o uso do biocombustível, em detrimento dos combustíveis fósseis, é incentivado, tal qual maior conscientização por parte dos consumidores.

Antecedendo as discussões atuais, Hackney e Neufville (2001) descrevem um modelo de ciclo de vida para comparar emissões, eficiência energética e trade-offs de custos de veículos com combustíveis alternativos, fornecendo uma estrutura abrangente para avaliar diferentes tecnologias de veículos. Disruptivo para a época, porém embrionário para o material encontrado atualmente, os autores desenvolvem um modelo em um software comum (excel), de fácil utilização, que permite modificar os parâmetros de entrada para explorar os cenários desejados de análise de combustíveis alternativos para veículos.

Desta maneira, é possível observar que alguns autores são favoráveis à implementação dos veículos elétricos, contudo outros ressaltam que para assumir que estes são mais ecológicos, é necessário analisar sob uma perspectiva muito mais holística: compreendendo a pegada e impacto ambiental de todo o processo de exploração, obtenção e transporte da matéria-prima, de manufatura, de utilização e descarte dos veículos – quer sejam elétricos, híbridos ou a combustão.

Todavia, há um consenso entre eles: ainda é necessário desenvolver métricas e padrões de medição de impacto ambiental, desenvolver as tecnologias para as três categorias de veículos, bem como a matriz energética utilizada.

2 O CENÁRIO NACIONAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E POLUENTES

O Brasil é um país com extremo potencial energético: com grande extensão territorial e excelente área de captação da luz solar, apresenta ótimos índices de ventos, grandes bacias hídricas e com potenciais para geração hidrelétrica, um elevado volume de biomassa, além de imensas reservas de recursos não renováveis como petróleo e derivados, gás natural, carvão e outros.

Além do potencial de geração de energia, historicamente, o Brasil possui um baixo nível de emissões de CO₂. De acordo com o Energy Institute, toda a América do Sul e América Central foram responsáveis por emitir apenas 3,6% de todo o CO₂ lançado à atmosfera – informação apresentada na Figura 3.

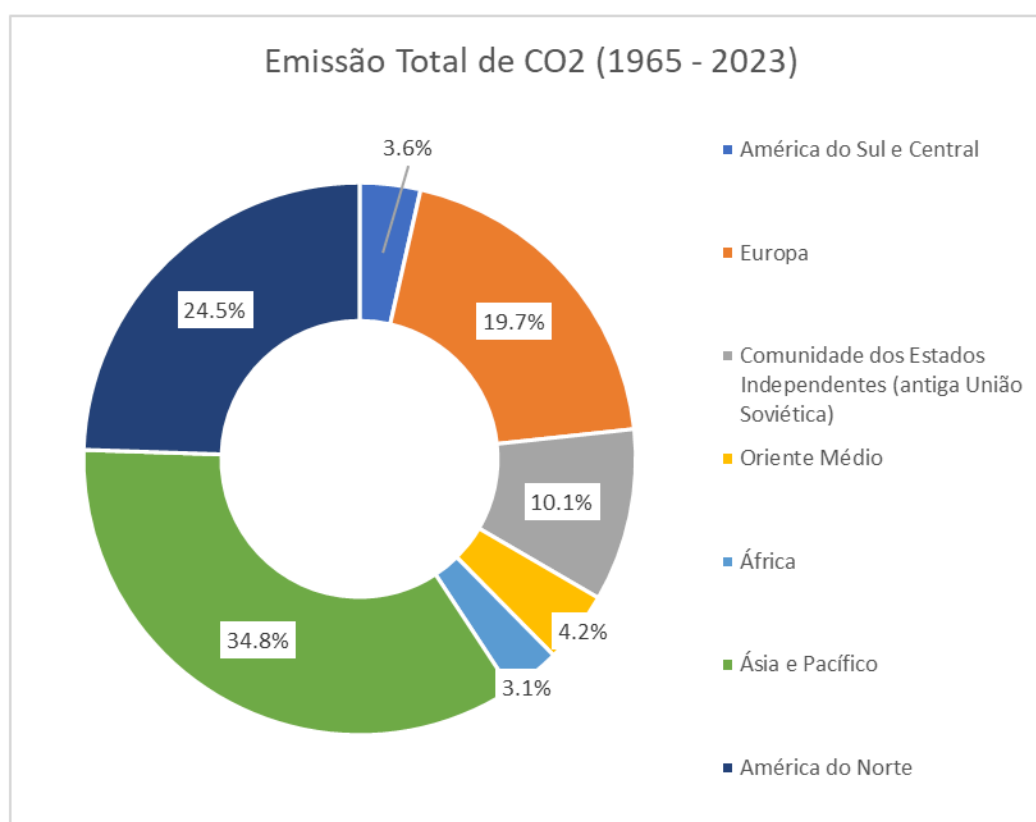


Figura 3 - Emissão Total de CO₂ (1965-2023), Energy Institute

A Tabela 1 apresenta, em valores totais, o quanto que cada região do globo já emitiu de CO₂, em bilhões de toneladas, entre 1965 e 2023.

Região	Emissão Total de CO2 (Bilhões Toneladas de CO2)
África	43.3
América do Norte	336.7
América do Sul e Central	48.9
Ásia e Pacífico	478.4
Comunidade dos Estados Independentes (antiga União Soviética)	139.2
Europa	271.3
Oriente Médio	57.9
Emissão Total (MTCO2)	1375.61

Tabela 1 - Total de Emissões de CO2, por região, entre 1965 e 2023. Fonte: Autor, 2024, adaptado de Energy Institute

Ainda que a matriz energética brasileira seja praticamente 50% originária de fontes renováveis, e o continente emita menos de 4% das emissões globais de CO2, o Brasil não pode estar a parte do tema. Afinal, tomar responsabilidade, e buscar reverter a crise climática, é um dever de todos. Neste sentido, uma das opções para reduzir a utilização dos derivados de petróleo, no contexto da cadeia de transporte, é a utilização de biocombustíveis.

Biocombustíveis são interessantes pois, além de reduzirem a dependência de combustíveis de origem fóssil - que em larga escala o Brasil precisa importar – cria também a possibilidade de capturar Carbono da atmosfera durante o cultivo da biomassa: quer seja cana de açúcar, milho, soja, algas marinhas e/ou outros. Isto aumenta a relevância do Brasil no contexto de matriz energética, bem como no de créditos de descarbonização (CBIOs) e reduz as emissões de GEE. Conferindo, então, mais autonomia ao Brasil em termos de Matriz Energética, Transição Energética e Descarbonização.

A Figura 4, abaixo, demonstra a produção de biocombustível em 2022, segregada por regiões do planeta. Os dados foram retirados do Energy Institute, e trazem que a América do Sul e América Central foram responsáveis pela segunda maior produção de biocombustível no ano de referência.

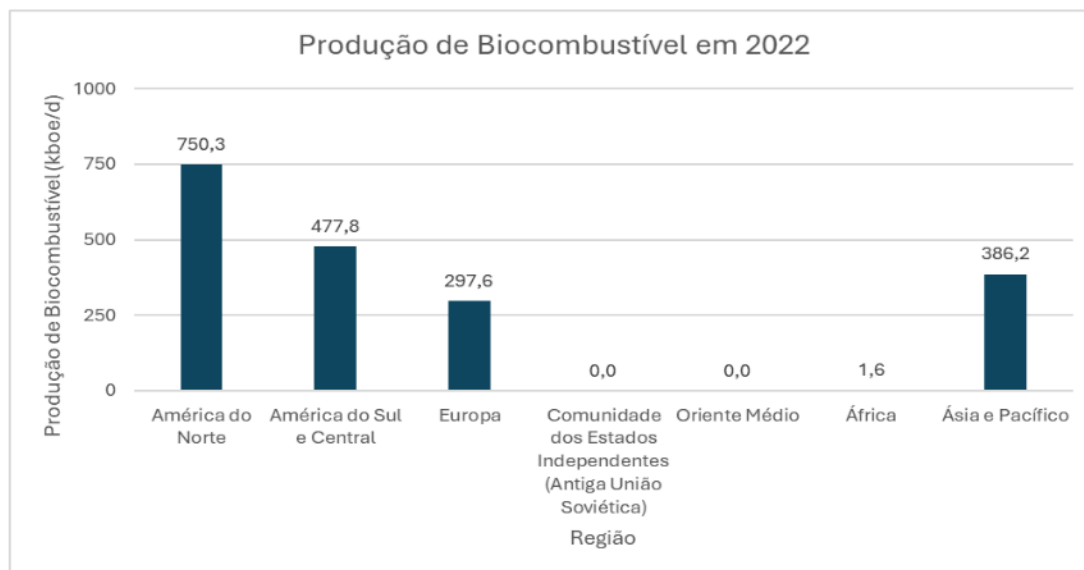


Figura 4 - Produção de Biocombustível em 2022, Energy Institute

Embora a América do Norte tenha sido líder de produção, o Brasil é um forte produtor de Etanol proveniente da cana de açúcar. O etanol derivado da cana de açúcar é considerado um dos biocombustíveis mais eficientes energeticamente, com uma relação energia produzida/energia consumida de cerca de 8:1. Isto é, para cada unidade de energia fóssil utilizada no processo produtivo, oito unidades de energia renovável são geradas. A eficiência do etanol de milho, por outro lado, é inferior, com uma média de 1,3:1 a 1,6:1, devido aos altos custos energéticos de cultivo e processamento do milho (Macedo et al., 2008).

O combustível derivado da cana de açúcar é considerado mais “verde” e reduz em até 90% as emissões de GEE quando comparado à gasolina, devido ao sequestro de carbono realizado pelo cultivo da cana e ao uso de subprodutos, como o bagaço, para gerar energia durante o processo produtivo (Goldemberg, 2008).

Numa movimentação para descarbonizar os combustíveis no Brasil, os órgãos reguladores têm trabalhado para incentivar a adoção dos biocombustíveis através de incentivos fiscais e políticas públicas para implementar diluições de “combustíveis verdes” (biocombustíveis) nos combustíveis fósseis.

Neste contexto, atualmente utiliza-se, no Brasil, o B14 - o Diesel comercializado nos postos tem 14% de BioDiesel em sua composição. Enquanto a lei Combustível do Futuro traz a perspectiva de aumento, anual, de 1 ponto percentual até 2030, onde atingirá a diluição de 20% de biodiesel na composição do diesel disponível nos postos para os consumidores.

Já para a gasolina, atualmente existe o valor mínimo de 18% de Etanol na gasolina presente nas bombas de abastecimento disponíveis ao consumidor comum – valor que atualmente pode alcançar até 27,5%. Importante ressaltar que a mistura de Etanol na gasolina poderá chegar a 35% com a nova lei Combustível do Futuro.

Estas alterações da composição dos combustíveis, somadas às diferentes fases do PROCONVE, demonstram a seriedade que os órgãos reguladores brasileiros têm tratado os automóveis e demais veículos, compreendendo a relevância destes para as emissões de GEE do país.

Aliado às alterações citadas acima, o Brasil também tem desenvolvido políticas de incentivo à pesquisa de novas tecnologias para aprimorarem a eficiência dos motores, carros e processos produtivos de toda a cadeia de transportes – cujos avanços têm sido notórios.

3 A EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS

A criação dos primeiros automóveis e motores de combustão interna remetem a raízes no contexto internacional do final do século XIX. O desenvolvimento do motor de combustão interna, criado por Nikolaus Otto em 1876, e os avanços subsequentes de inventores como Karl Benz, que produziu o primeiro automóvel movido a gasolina em 1885, impulsionaram a revolução nos transportes, especialmente na Europa e nos Estados Unidos (LUZ; CAMPOS, 2019). Em 1908, a Ford lançou o modelo T, primeiro veículo produzido em larga escala, solidificando a indústria automotiva e popularizando os motores de combustão interna, especialmente na América do Norte (GOLDEMBERG, 2008).

No Brasil, a utilização de veículos automotores, no setor de transporte, se iniciou no final do século XIX com a importação dos primeiros automóveis, que chegavam como símbolo de modernidade – naturalmente eram utilizados pelas elites, nas capitais. Contudo, o avanço substancial só ocorreu no século XX, quando, já na década de 1930, o governo de Getúlio Vargas deu início a políticas de incentivo à produção industrial local, incluindo a fabricação de peças automotivas, dando os primeiros passos para um setor automotivo brasileiro (FARINA, 2006).

O grande marco de industrialização do setor no Brasil ocorreu nos anos 1950, com o Plano de Metas de Juscelino Kubitschek. A instalação de montadoras como Volkswagen, General Motors e Ford no país facilitou o acesso aos automóveis movidos a motores de combustão interna, impulsionando a produção nacional de veículos. Nos anos 1970, em resposta à crise do petróleo, o Brasil criou o Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), incentivando a produção de etanol como alternativa à gasolina. Esse programa consolidou o país como pioneiro no uso de biocombustíveis para motores a combustão interna, resultando na fabricação de veículos adaptados para rodar com etanol (COSTA et al., 2012).

Em 2003, o lançamento de veículos “flex-fuel”, no Brasil, permitiu o uso combinado, tanto de gasolina quanto de etanol, representando uma inovação no setor automotivo global. Esta tecnologia consolidou o Brasil como referência no uso de fontes renováveis em transportes e é hoje um exemplo de como a adaptação tecnológica aos motores de combustão pode colaborar com a sustentabilidade e independência energética (MOURA; LUCENA, 2017).

Atualmente, com uma indústria local mais desenvolvida e acordos de importação, é possível encontrar diversos tipos de veículos no Brasil, variando modelos, montadoras, motorização, quantidade de passageiros e finalidade de uso. Contemplando motos, carros de passeio, utilitários, veículos para transportar cargas pesadas ou uma maior quantidade de pessoas, como são os ônibus.

Líder na América Latina, o Brasil é um dos maiores produtores de veículos automotores do mundo. Contando com incentivos fiscais e políticas inovadoras, como o Programa Rota 2030, o país busca se atualizar na forma de utilizar e produzir os veículos para solucionar a atual defasagem tecnológica enfrentada pela indústria nacional. (BRASIL, 2018).

De acordo com o Ministério dos Transportes, em um levantamento feito em Outubro de 2024, 91,5% dos veículos apurados utilizam o Ciclo Otto como fonte de propulsão, enquanto 8% utiliza motores a Diesel. Já a parcela de veículos híbridos corresponde a 0,24% e a de elétricos corresponde a 0,14%. Atualmente é possível encontrar veículos movidos a Metano ou Células de Combustível, contudo ainda representam uma parcela insignificante da frota brasileira. Os dados extraídos do relatório do Ministério dos Transportes, foram tratados e trabalhados para formar o gráfico disponível na Figura 5 abaixo.

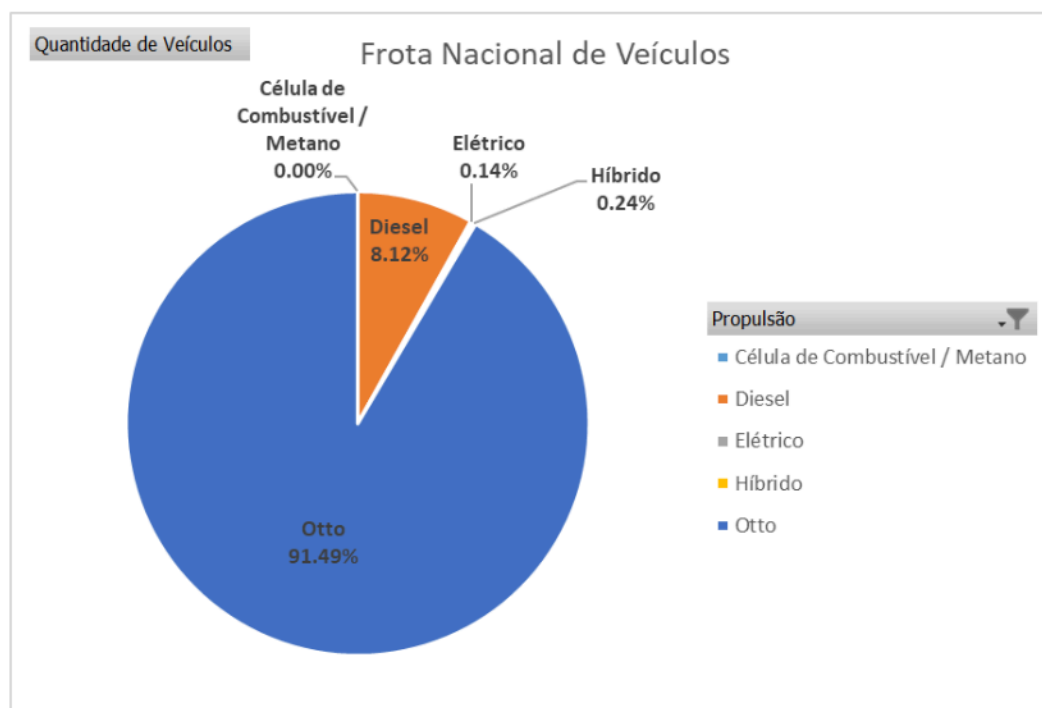


Figura 5 - Frota Nacional de Veículos (adaptado de Ministério dos Transportes, Outubro/2024)

Com a prerrogativa de otimizar a tecnologia atual e desenvolver novas soluções mais eficientes, novos motores têm sido desenvolvidos para comporem os veículos encontrados no Brasil: motores de combustão interna mais eficientes, motores elétricos, tecnologias híbridas que combinem os motores de combustão e os motores elétricos. Tais possibilidades de propulsores serão descritas a seguir.

3.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

No que tange os motores de combustão interna, há uma ampla variedade no mercado nacional: a quantidade de cilindros (3 a 10, ou mais), volume, potência, combustível utilizado – podendo ser de 2 ou 4 tempos - e outros. A maioria dos carros encontrados no Brasil atualmente, utilizam o ciclo Otto. Na Figura 6 a seguir, é possível encontrar uma ilustração de um veículo que utiliza motor de combustão interna (ICEV), com a configuração de tração dianteira.



Figura 6 - Veículo movido a um motor de combustão - adaptado de HONDA, 2024

O ciclo Otto é um ciclo termodinâmico inventado por Nikolaus Otto, em 1867. Este ciclo é composto por 4 tempos, onde convertem, em movimento, a energia liberada pela gasolina durante sua queima – os ciclos são ilustrados na Figura 7 abaixo.

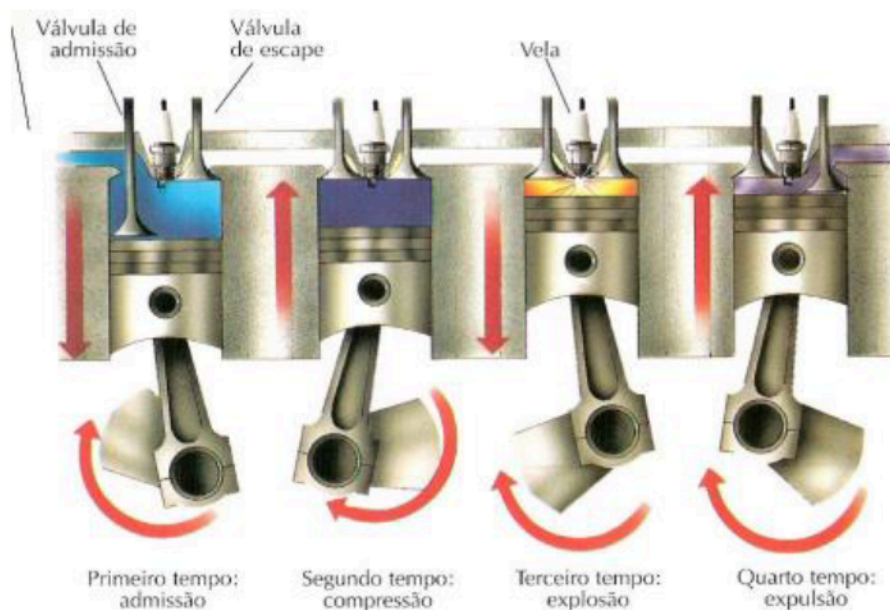


Figura 7 – os 4 tempos do Ciclo Otto (Fonte: <https://abekwar.wordpress.com/2013/04/09/motores-a-pistao/>)

A extração de energia deste ciclo se dá pelo movimento dos pistões. Embora estes pistões se movam de forma linear, o virabrequim – ou Eixo de Manivelas - é responsável por converter este movimento linear em movimento rotativo. Esta rotação é transferida para a caixa de transmissão, fazendo com que as rodas do carro tenham movimento (MOREIRA et. al., 2019). Na Figura 8 abaixo, é possível visualizar a esquemática dos pistões e virabrequim.

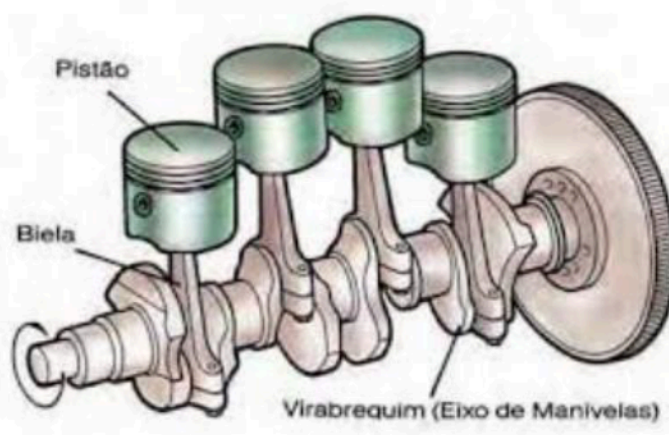


Figura 8 - Esquemática pistões e virabrequim (MAHLE, Motores de Combustão Interna, 2019 – p. 14)

Como todo processo de conversão termodinâmica, existem perdas de energia ao longo do processo. Tratando-se de conversões combinadas, as perdas são somadas, reduzindo assim a eficiência do processo. Há diversos estudos acerca

da eficiência dos motores de combustão interna, tendo chegado a resultados amplamente aceitos pela academia e indústria. Jazar, em 2008, publicou o livro *Vehicle Dynamics Theory and Application*, no qual também descreveu exemplos de curvas de Torque e Potência, associando-os a faixas de rotação – em rpm e rad/s, como é possível encontrar na Figura 9 abaixo.

No mesmo estudo, foi descrito um mapa de eficiência para um motor genérico, demonstrando que a eficiência, e potência, estão diretamente associadas à rotação do motor. Estes dados, descritos na Figura 10, indicam que a eficiência do carro pode variar de acordo com o operador – isto é, o condutor do veículo – e seu modo de condução.

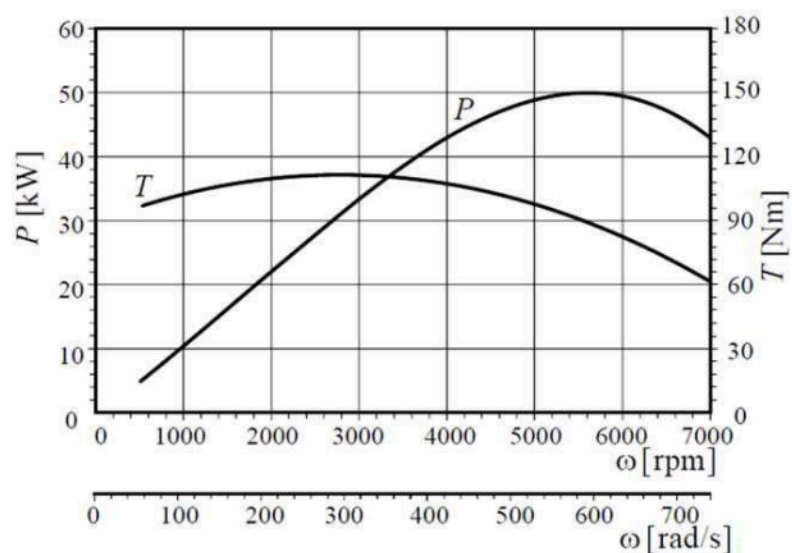


Figura 9 - Exemplo de curva Torque e Potência (JAZAR, 2008)

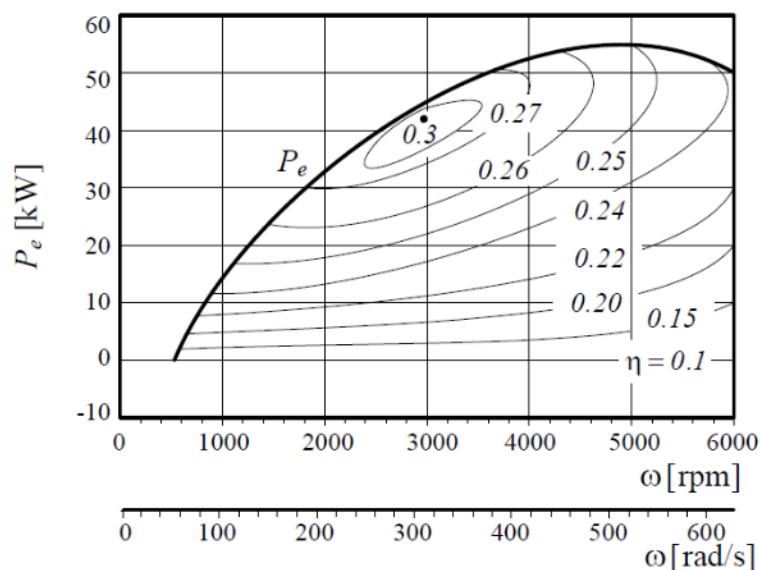


Figura 10 - Mapa de eficiência para um motor de combustão interna genérico (JAZAR, 2008)

Através destes gráficos das Figuras 9 e 10, é possível observar que o Torque tem seu ápice a aproximadamente 2800 rpm. Enquanto a maior Potência fora encontrada no ponto de, aproximadamente, 5600 rpm. Embora possa existir leves variações destes valores de rotações em função do equipamento e modelo utilizado, estas são faixas amplamente aceitas na comunidade técnica e científica.

Da mesma maneira, é possível encontrar no Mapa de eficiência, ou performance, que a eficiência máxima do ICEV é alcançada consideravelmente antes do seu pico de potência. A eficiência máxima, de acordo com JAZAR, é obtida numa faixa entre 2500 e 3500 rpm – contudo, o maior valor de eficiência é algo em torno de 30%.

3.2 MOTORES ELÉTRICOS

Os veículos movidos por motores elétricos não são exclusividade ou invenção do século XXI. Bem distante disto, a Porsche desenvolveu seu primeiro carro elétrico ainda em 1898, denominando-o como “P1” (PORSCHE, 2023). Populares entre 1890 e 1910 devido à operação silenciosa, os carros elétricos tiveram seu declínio decretado em função das limitações de autonomia e velocidade, bem como a partir da descoberta do petróleo a preços mais acessíveis.

Há diferentes tipos de motores elétricos empregados em veículos, como o Motor de Indução Trifásico (MIT) e Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM),

sendo este último, o mais comum. De forma geral, eles convertem energia elétrica em energia mecânica, sendo compostos principalmente de dois componentes: rotor e estator. Ao criar campos magnéticos no rotor e estator, ocorre a repulsão e atração magnética entre os polos, gerando rotação, que assim como no motor de combustão interna, é transmitida às rodas do veículo.

3.2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)

Este tipo de motor opera por meio do campo magnético girante gerado no estator, que induz correntes no rotor, criando um campo eletromagnético que interage com o campo do estator e gera torque. O estator é alimentado por uma corrente alternada, criando um campo magnético girante. O campo magnético criado, induz uma corrente elétrica no rotor, que por sua vez gera seu próprio campo magnético. A interação entre os campos do estator e do rotor faz com que o rotor gire, conferindo rotação ao equipamento.

O MIT, ilustrado na Figura 11 abaixo, possui uma construção robusta, boa confiabilidade e vida útil, assim como bom funcionamento em altas velocidades. Todavia, possui maior necessidade de resfriamento em função das perdas por Efeito Joule no rotor, assim como requer um inversor de frequência de alta capacidade para controlar o torque e velocidade.

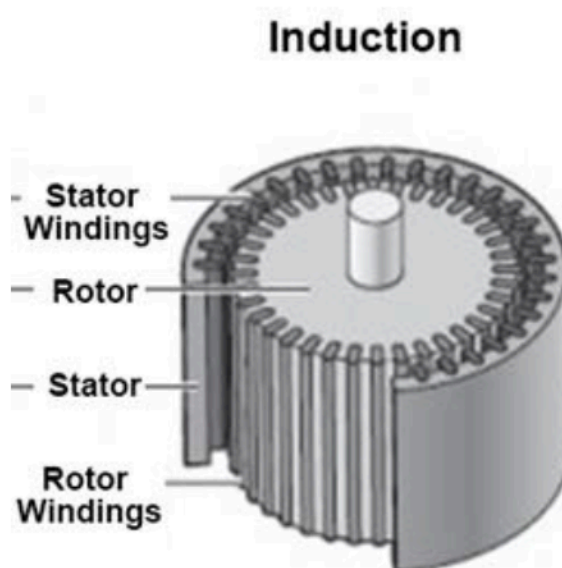


Figura 11 - Motor de Indução Trifásico (MIT) - (New Energy and Fuel, 2010)

O Motor de Indução Trifásico fora amplamente adotado nos primeiros modelos da montadora Tesla (Model S e Model X), contudo atualmente está sendo substituído por motores síncronos de ímã permanente devido à maior eficiência destes últimos. Ainda assim, algumas montadoras utilizam motores de indução no eixo traseiro para potência extra, enquanto o eixo dianteiro usa um PMSM – combinando as duas tecnologias.

3.2.2 Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM)

O PMSM é um motor de corrente alternada no qual o rotor contém ímãs permanentes, permitindo que ele gire exatamente na mesma velocidade do campo magnético gerado pelo estator (ou seja, não há deslizamento). O PMSM e seus componentes estão ilustrados na Figura 12 abaixo. O estator é alimentado por corrente alternada trifásica, criando um campo magnético girante. Enquanto o rotor, contendo ímãs permanentes de neodímio, é atraído e sincronizado com esse campo.

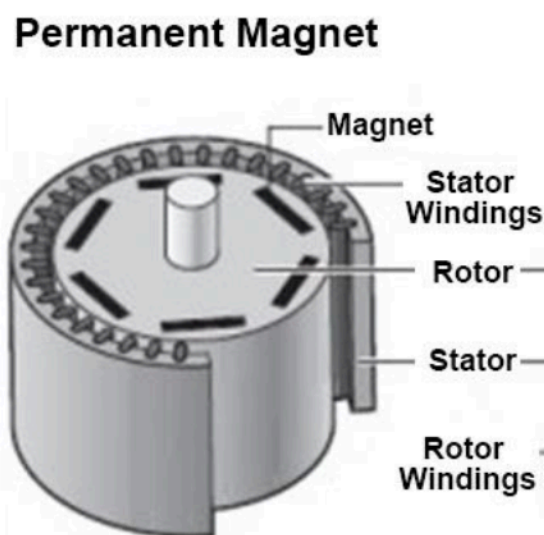


Figura 12 - Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM) - (New Energy and Fuel, 2010)

Na Figura 13 há uma comparação de ambas as tecnologias de motores elétricos citadas acima.

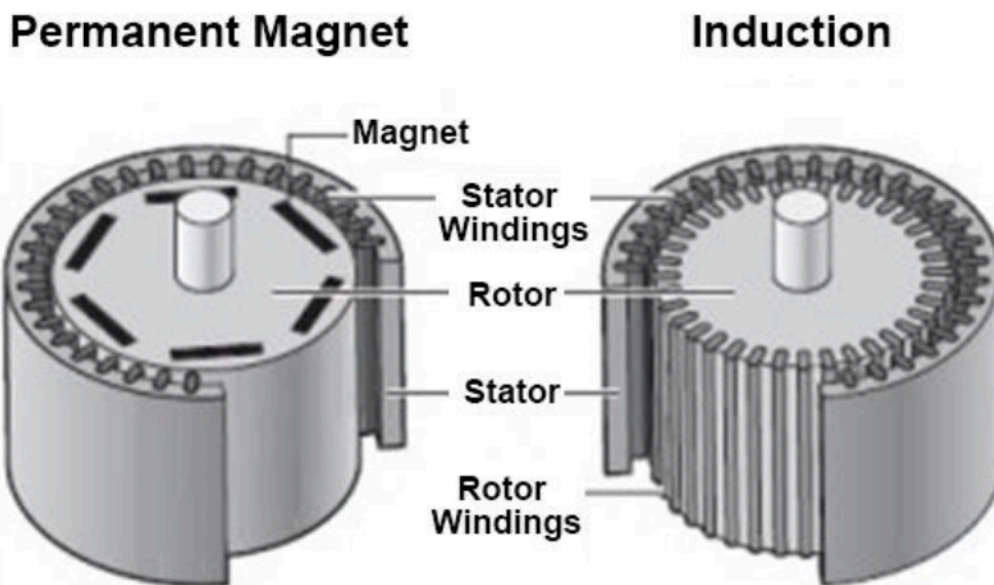


Figura 13 - Comparação MIT e PMSM (New Energy and Fuel, 2010)

Como o rotor do Motor Síncrono de Ímã Permanente não depende de correntes induzidas para gerar seu campo magnético, há menores perdas elétricas e maior eficiência neste tipo de equipamento, quando comparado com o Motor de Indução Trifásico, por exemplo.

A tecnologia PMSM apresenta maior eficiência energética, melhor densidade de potência – isto é, requer menos espaço físico para gerar a mesma quantidade de energia – e apresenta excelente controle de torque, proporcionando acelerações rápidas e suaves.

Entretanto, por utilizar terras raras como neodímio, disprósio e outras para compor os ímãs, apresentam elevado custo de produção. Há ainda indícios de que elevadas temperaturas podem levar ao risco de desmagnetização dos ímãs permanentes, porém ainda não há estudos conclusivos a respeito.

Sendo este, o tipo de motor mais utilizado em Veículos Elétricos a Bateria (BEV), de diversas montadoras como Audi, BMW, BYD, Hyundai, Tesla e outras. Na Figura 14 abaixo, há uma ilustração da esquemática de um veículo movido por dois motores elétricos.

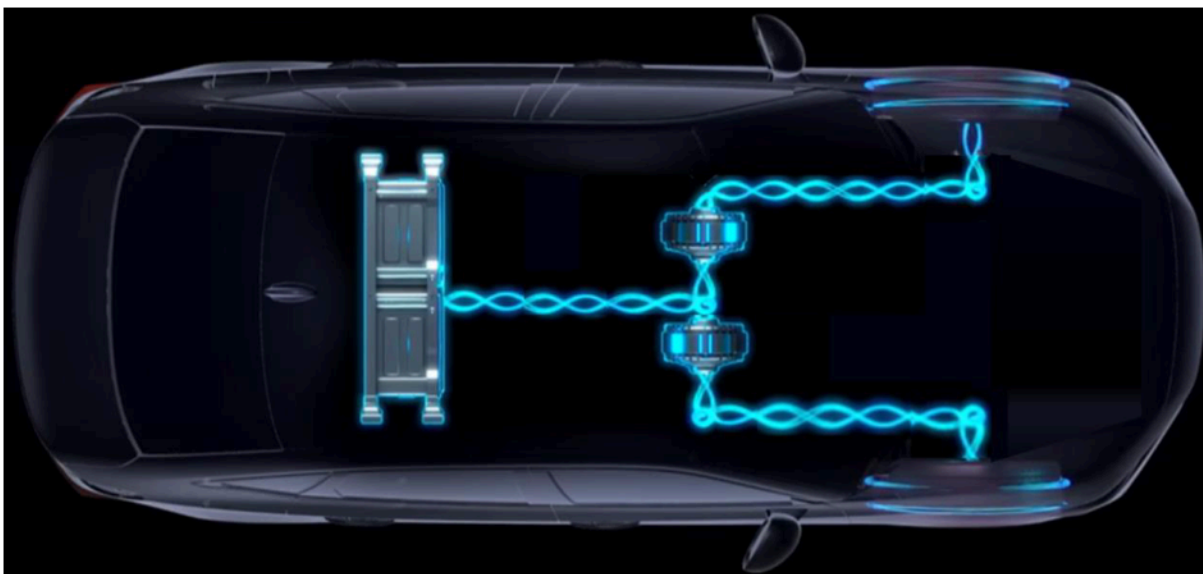


Figura 14 - Veículo movido por motores elétricos - adaptado de HONDA, 2024

O Motor Síncrono de Ímã, ou magneto, Permanente, também é fruto de constante estudo acerca da performance, em termos de Torque, Potência e Eficiência. Diferentes autores apresentam resultados sobre estes ensaios, que serão exibidos nas Figuras 15 e 16 abaixo.

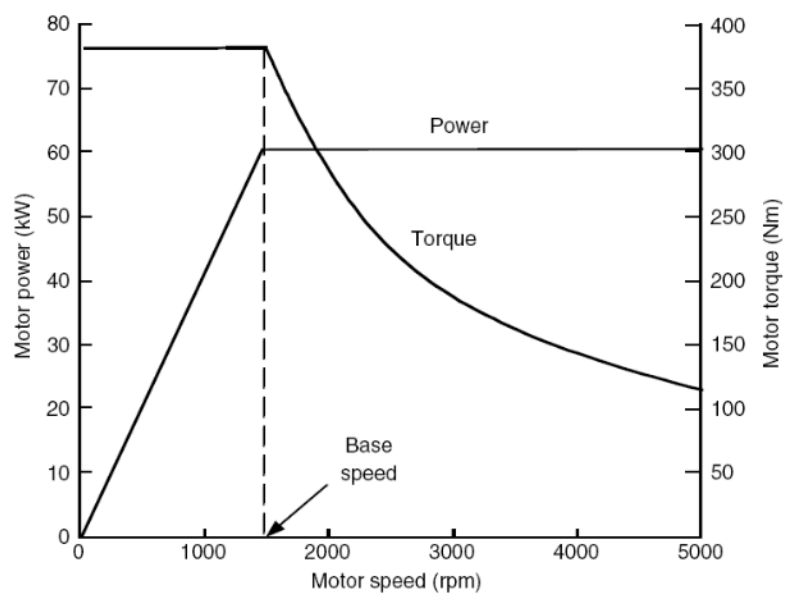


Figura 15 – Exemplo de Curvas de Torque e Potência em motores elétricos (EHSANI, GAO, et al, 2005)

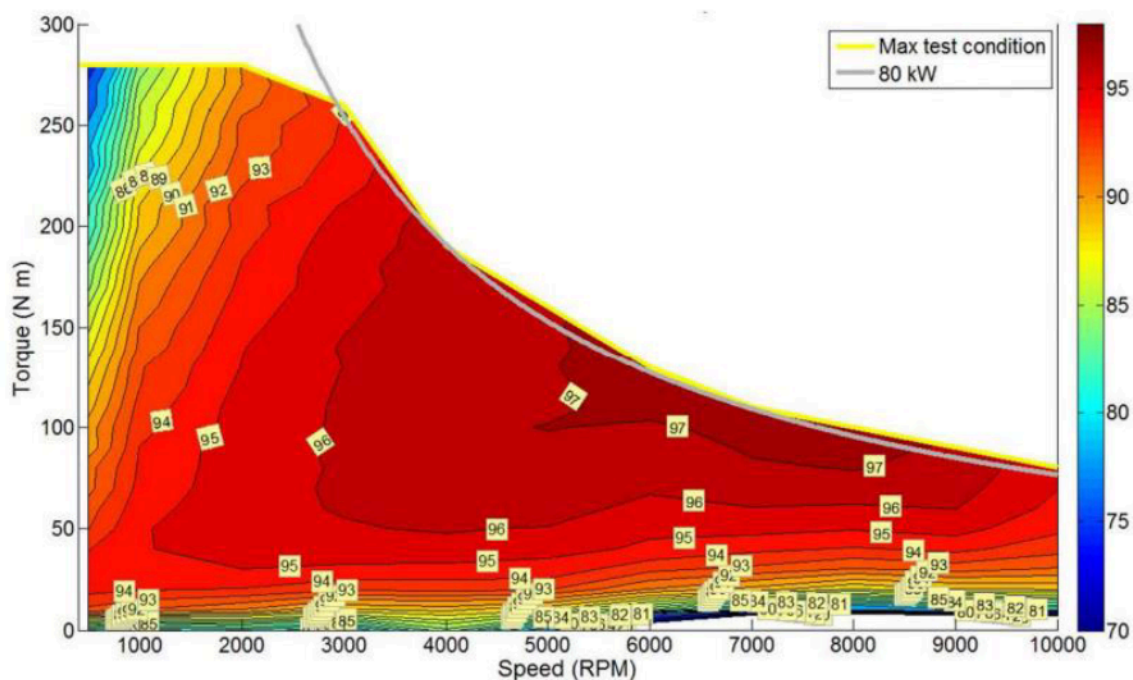


Figura 16 - Mapa de eficiência para motor de um Nissan Leaf, veículo 100% elétrico. (Davis, K. P. 2020. Simplified electric Vehicle powertrain modelling. PhD Thesis.)

Como é possível observar, há uma enorme diferença no padrão de Torque e Potência entre as curvas padrões de motores de combustão interna e de motores elétricos. Embora haja variações de Torque encontrado em cada faixa de operação, em função das características e especificidades de cada equipamento utilizado, é possível observar que a eficiência é consideravelmente superior à de motores de combustão interna. Possuindo eficiência de até 97% em faixas de 5000 e 9000 rotações por minuto deste motor – como ilustrado na Figura 16.

Os motores elétricos são capazes de entregar o torque máximo desde a partida, do “ponto zero” de operação – ou condução. De acordo com o gráfico da Figura 15, a Potência máxima, no entanto, somente é atingida a partir da “rotação base”, no equipamento de estudo, encontra-se no marco de 1500 rpm – a partir da qual, se torna constante.

Entregando características completamente distintas, os motores elétricos apresentam vantagens sobre os de combustão interna, contudo carecem de um importante ponto: a autonomia. Para alimentar estes motores, grandes baterias são utilizadas.

Ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologias de baterias conferiu à estas, maior capacidade enquanto reduziam o seu peso efetivo. Entretanto, deve ser considerado o tempo de carregamento destes componentes.

3.3 MOTORES COMBINADOS (VEÍCULOS HÍBRIDOS)

Apresentado por diversos autores como a melhor solução para a transição entre os motores de combustão e os motores elétricos – isto é, enquanto se desenvolvem tecnologias de manufatura e operação dos veículos e seus componentes, bem como as matrizes de geração de energia – os veículos híbridos são aqueles que combinam ambas as configurações citadas anteriormente: motores de combustão interna e os motores elétricos.

Com os benefícios da praticidade de reabastecimento de um carro movido por um motor de combustão, aliado à tecnologia dos motores elétricos, os veículos híbridos possuem elevada eficiência. Nestes veículos, o consumo de combustível apresentado é inferior ao daqueles propulsionados pelos motores de combustão, enquanto combinam a autonomia de ambos os motores. Podendo conter, ou não, baterias, os veículos são capazes de converter energia das frenagens, dos motores e se retroalimentarem.

Nas Figuras 17 e 18, é possível conferir o funcionamento de veículos híbridos quando extraem energia apenas do motor de combustão, e quando combinam com a energia armazenada nas baterias.

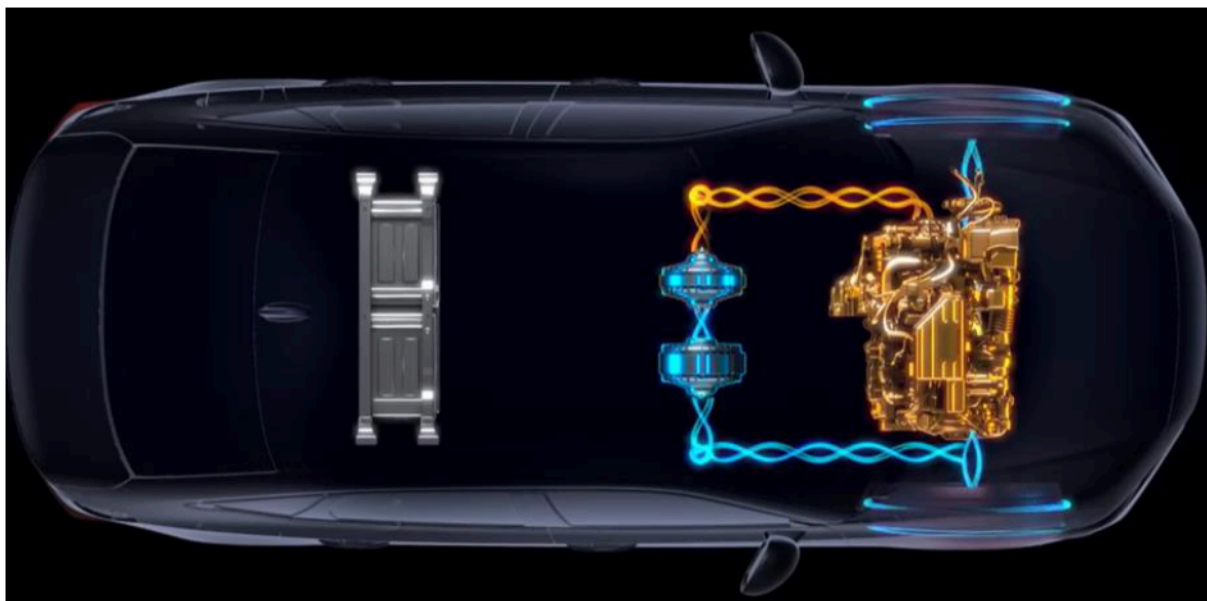


Figura 17 - Veículo Híbrido - adaptado de HONDA, 2024

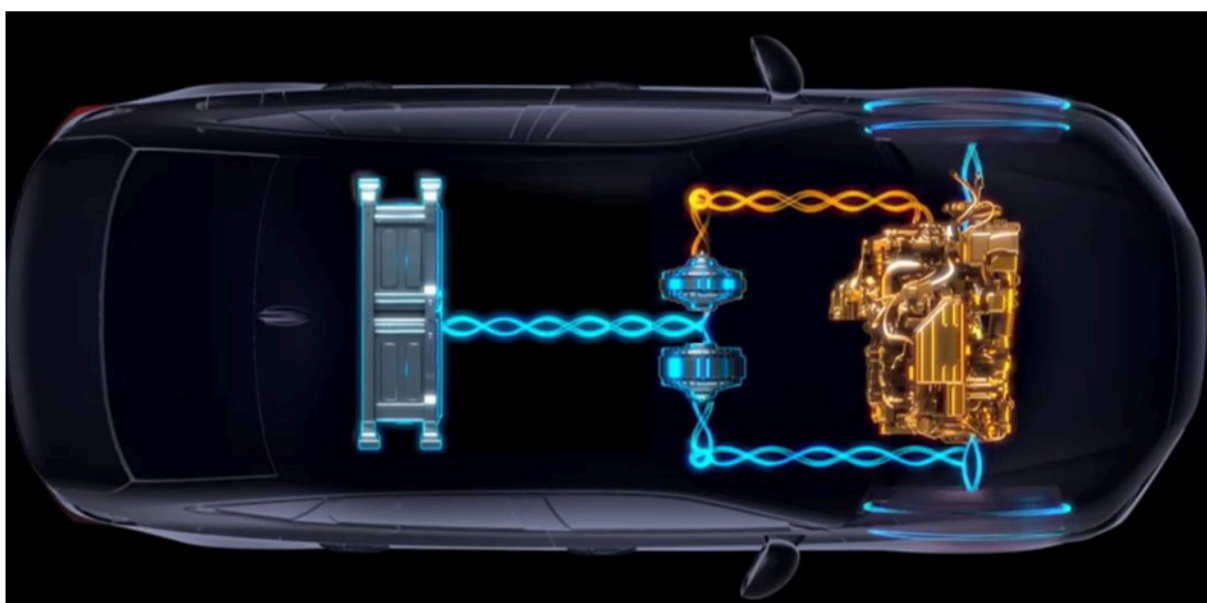


Figura 18 - Veículo Híbrido combinando fontes de energia - adaptado de HONDA, 2024

Neste sentido, há 2 subtipos de veículos híbridos: os “Plug-in” e os “Não Plug-in”:

- “Plug-in” - são aqueles que possuem baterias com maior capacidade, recarregadas pela rede elétrica disponível (PHEV).
- “Não Plug-in” - têm os motores de combustão como fonte de energia, possuindo baterias menores, projetadas apenas para armazenarem o excedente de energia produzido momentaneamente em um momento de menor consumo (HEV).

Para os híbridos “Não Plug-in”, o motor de combustão pode funcionar como uma espécie de gerador de energia para os motores elétricos, enquanto estes últimos são os responsáveis por conferir movimento ao veículo.

4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E A ORIGEM DOS COMBUSTÍVEIS

Compreendendo as principais configurações de motorização dos veículos encontrados no país, o próximo passo é analisar a matriz energética brasileira para comparar os impactos ambientais da utilização de cada uma das possíveis motorizações de veículos.

Em função dos dados de emissões e matriz energética nacional, é possível observar que, no Brasil, o setor de combustíveis desempenha um papel estratégico, sustentado pela produção de combustíveis fósseis e biocombustíveis. A diversificação de fontes energéticas visa atender à demanda interna, reduzindo a dependência de importações e mitigando emissões de gases de efeito estufa.

O Balanço Energético Nacional, relatório disponibilizado em 2024, aponta que a Oferta Interna de Energia, em 2023, foi 49,1% renovável – dados apresentados na Tabela 2, abaixo. Com forte presença da Biomassa de Cana e Energia Hidráulica na matriz energética brasileira, o Brasil é um dos países com a matriz mais limpa do mundo.

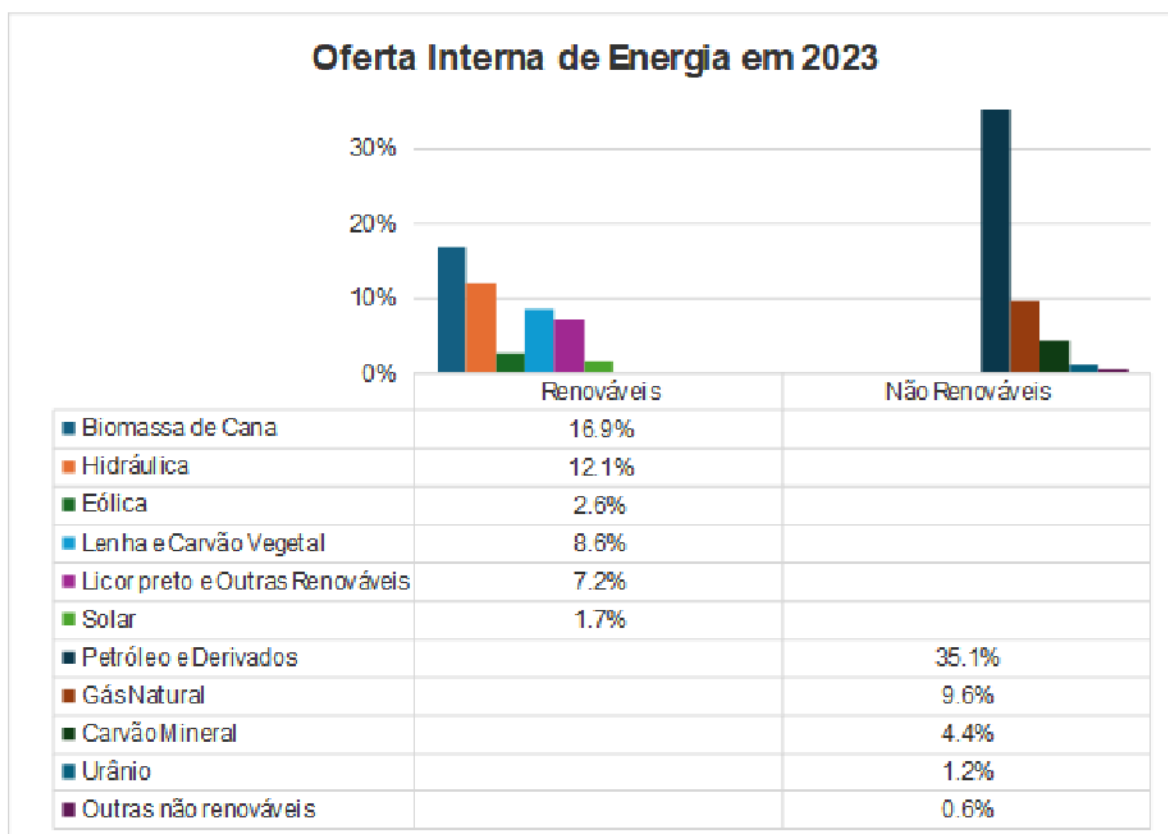


Tabela 2 - Oferta Interna de Energia (OIE) 2023, BEN 2024

Esta matriz energética nacional, que é referência mundial, reflete diretamente no baixo índice de emissões de GEE da América Latina, sobretudo do Brasil, citados ao longo do capítulo 2.

Há algumas décadas, o maior país da América Latina compreendeu e investiu no potencial de geração de biocombustível e a possibilidade de redução de dependência dos combustíveis fósseis. Incentivando a produção e utilização de biocombustíveis por meio de incentivos fiscais, políticas de reformulação de combustíveis e outras, o Brasil tem disseminado a utilização dos “combustíveis verdes”.

Ainda em 1920, motivado pela instabilidade do mercado internacional de petróleo, o Brasil se interessou pela diversificação de sua matriz energética, através da utilização de óleos vegetais como combustíveis alternativos. Este interesse pavimentou o caminho para pesquisas e políticas públicas futuras, como o Pró-Óleo, lançado em 1975 pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT) para investigar o potencial destes óleos para substituir os combustíveis fósseis (CARVALHO et al., 2021)

Seguindo este interesse, de acordo com o Energy Institute, em 2023 o Brasil foi o segundo maior produtor de biodiesel do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Sendo atualmente um dos maiores produtores globais de biocombustíveis, o Brasil acredita que este setor movimentará R\$ 1 trilhão entre 2025 e 2034, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética. Aliando estratégias ambientais e econômicas, aos poucos o setor de transporte reduz suas emissões de dióxido de Carbono.

De acordo com a ANP, apenas em 2023, a produção de etanol alcançou mais de 30 bilhões de litros, enquanto o biodiesel atingiu cerca de 6 bilhões de litros (ANP, 2024).

Buscando atender aos compromissos determinados no tratado global do Acordo de Paris, em 2017 instituiu-se a Lei nº13.576, onde o RenovaBio é uma Política Nacional de Biocombustíveis para atender as demandas econômicas, sociais e ambientais advindas dos biocombustíveis. A Lei objetiva ampliar a utilização dos biocombustíveis e reduzir a intensidade de carbono da cadeia de transportes no Brasil. Iniciando a comercialização de Créditos de Carbono, os produtores seriam capazes de certificar seus biocombustíveis, aferindo a neutralidade ou baixa pegada de Carbono.

A interação entre o mercado de combustíveis e a frota de veículos no Brasil é um fator crucial para alcançar metas de sustentabilidade e descarbonização, sobretudo no contexto de Transição Energética. Com base no cenário atual, uma abordagem mais profunda envolve aspectos como políticas públicas, tecnologias emergentes e desafios estruturais.

A frota brasileira inclui principalmente veículos leves flexfuel, caminhões e ônibus movidos a diesel. Em 2023, mais de 80% dos automóveis leves eram flexfuel, refletindo políticas como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Os caminhões e ônibus continuam fortemente dependentes de motores a diesel, devido à robustez e ao custo operacional inferior em longas distâncias (DENATRAN, 2024).

Atualmente, a frota brasileira apresenta desafios como a idade média dos veículos, que é superior a 10 anos – implicando em consumo de combustíveis e emissões mais elevadas, uma vez que as Normas Reguladoras eram mais brandas na época que estes veículos foram fabricados (ANFAVEA, 2023).

Outra adversidade enfrentada pela frota brasileira é a segmentação regional, pois as Regiões urbanas têm maior penetração de tecnologias modernas como as de veículos híbridos e elétricos, enquanto áreas rurais dependem amplamente de motores a combustão interna.

Contudo, a tecnologia Flexfuel implementada nos motores apresenta um elevado potencial de redução de emissões de GEE, pois o uso de etanol como substituto parcial da gasolina reduz as emissões de CO₂ em até 90% devido ao sequestro de carbono durante o crescimento da cana-de-açúcar (IPEA, 2022). Enquanto os incrementos da proporção de etanol anidro misturado à gasolina, atualmente acima dos 27%, pode gerar ganhos ambientais imediatos.

Tratando a gasolina e os derivados de petróleo de forma individual, é notório que a Petrobras lidera a extração do petróleo bruto, processamento, refino e produção de gasolina no Brasil. Apenas em 2023, o país produziu cerca de 2,78 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boed), dos quais uma parte significativa foi destinada à produção de gasolina e diesel (PETROBRAS, 2023). As refinarias brasileiras seguem padrões ambientais regulados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que estabelece limites para emissões atmosféricas e especificações técnicas dos combustíveis (ANP, 2024).

A produção interna de gasolina busca equilibrar a demanda doméstica com a exportação de excedentes. No entanto, a dependência de derivados de petróleo

torna o Brasil vulnerável a flutuações internacionais de preços e à volatilidade cambial. Além disto, o país enfrenta desafios logísticos significativos devido à grande extensão territorial e concentração de refinarias em regiões específicas.

No que tange o diesel, atualmente a mistura de 12% de biodiesel (B12) ao diesel é obrigatória. Contudo, estudos sugerem que a elevação para 15% (B15) pode evitar a emissão de 20 milhões de toneladas de CO₂ por ano (ANP, 2024). Aliado a esta estratégia, surge também o uso de diesel verde e HVO (óleo vegetal hidrotratado), que pode substituir o diesel fóssil, reduzindo emissões sem a necessidade de ajustes significativos nos motores.

Na Tabela 3 é possível notar a evolução da composição dos combustíveis em função da implementação de políticas públicas ao longo do século XXI.

Combustível	Composição Principal	Diluição Obrigatória ao Longo do Tempo	Política Pública Associada	Anos de Implementação/Atualização
Gasolina C	Gasolina A + Etanol Anidro	2024: 18 - 27,5%	Lei 8.723/1993 Lei 13.576/2017 (RenovaBio) Lei 14.993/2024 (Combustível do Futuro)	1993 (início) 2017 (RenovaBio) 2024 (Combustível do Futuro)
		Combustível do futuro: 22 - 27%, podendo alcançar até 35% se comprovada viabilidade técnica.		
Etanol	Etanol Hidratado (E100)	100% (E100)	Proálcool RenovaBio	1975 (Proálcool) 2017 (RenovaBio)
Diesel B	Diesel + Biodiesel	2008: 2% (B2)	Lei 11.097/2005 Lei 13.576/2017 (RenovaBio) Lei 14.993/2024 (Combustível do Futuro)	2005 (Lei) 2008 (B2) 2024 (B14) Previsto: 2030 (B20)
		2010: 5% (B5)		
		2014: 7% (B7)		
		2022: 10% (B10)		
		2024: 14% (B14)		
		2030 Projeção: 20% (B20)		

Tabela 3 - Composição dos combustíveis, no Brasil, ao longo do século XXI – Fonte: Autor, 2024.

Contudo, se o Brasil pretende expandir a utilização de biocombustíveis, será de extrema importância expandir usinas de etanol e biodiesel nas regiões Centro-Oeste e Sudeste pode assegurar oferta contínua e mitigar impactos logísticos.

Afinal, a biomassa apresenta elevado potencial energético para a matriz energética nacional. A eficiência do etanol brasileiro é reconhecida mundialmente devido ao uso da cana-de-açúcar, pois possui alta produtividade e balanço energético positivo. O biodiesel, por sua vez, produzido a partir de óleos vegetais e gordura animal, contribui para a redução de emissões de GEE. Algumas pesquisas em novas tecnologias, como o etanol de segunda geração (E2G) e o diesel verde, demonstram avanços significativos na ampliação da sustentabilidade do setor.

Ao comparar combustíveis fósseis e biocombustíveis, é possível observar vantagens ambientais significativas para estes últimos. Além da redução de emissões de CO_2 em até 90% ao substituir a gasolina pelo etanol, a substituição parcial do diesel por biodiesel contribui para a mitigação de poluentes como óxidos de enxofre e materiais particulados.

Contudo, ainda existem desafios na cadeia produtiva, incluindo a sustentabilidade agrícola, a emissão indireta por mudanças no uso da terra (ILUC) e os impactos sociais e econômicos relacionados à expansão das áreas de cultivo. O equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental exige políticas públicas robustas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Para os veículos híbridos, que combinam motores a combustão e elétricos, é notada maior eficiência em centros urbanos. Enquanto os elétricos emitem zero poluentes na operação, seu impacto ambiental depende da matriz elétrica nacional e das condições das instalações das fábricas produtoras.

Visando retirar veículos antigos, e mais poluentes, de circulação, o Brasil adotou o programa “Renove”, similar a iniciativas de alguns países como Alemanha e Japão, para renovar suas frotas. Apesar do elevado valor de aquisição, os incentivos fiscais e reduções de impostos objetivam aumentar a participação de veículos híbridos e elétricos no Brasil.

Contudo, o aumento da frota híbrida e elétrica apresenta desafios não apenas fiscais e de percepção do consumidor, como também de infraestrutura. A ampliação das estações de carregamento, públicas e privadas, além de investimentos em redes inteligentes de energia, regulações, padronizações e fiscalização, são elementos centrais para o avanço da eletromobilidade no país – que deverá ser sólida, robusta e acessível para assegurar conveniência, praticidade e usabilidade destes veículos.

Embora o Brasil registre um aumento progressivo na instalação de estações de carregamento, especialmente nas regiões Sul e Sudeste – apresentando, em 2024, mais de 1000 pontos de recarga públicos e semipúblicos, distribuídos em rodovias, centros comerciais e estacionamentos, segundo um levantamento da Tupi Mobilidade, e compartilhado pela Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE, 2024) – o país enfrenta um enorme desafio geográfico para implementação desta malha de recarga, devido às suas dimensões continentais.

Devido à ausência de produção local e elevado índice de importação de tecnologia, este investimento em infraestrutura de carregamento ainda é consideravelmente elevado. Em paralelo, o Brasil carece de regulamentações claras para padronizar e trazer segurança ao processo de carregamento, como protocolos, padronizações e parceria público-privado – sobretudo na modernização e expansão da rede elétrica nacional para suportar um aumento exponencial na demanda por eletricidade.

Visando solucionar isto, o Plano Nacional de Eletromobilidade, anunciado pelo Governo Federal em 2023, porém ainda em desenvolvimento, prevê a instalação de 10 mil novas estações até 2030, com prioridade para rodovias estratégicas e grandes centros urbanos (BRASIL, 2023). Além disso, empresas como a Eletrobras e multinacionais automotivas têm investido na expansão de redes de carregamento no país.

Expandindo a infraestrutura, espera-se reduzir as Emissões de Gases de Efeito Estufa ao substituir veículos a combustão interna por elétricos, especialmente devido à matriz energética brasileira, majoritariamente renovável (IEA, 2024). Neste contexto, seriam notados progressos tecnológicos, econômicos e sociais através da criação de empregos - diretos e indiretos - no setor de eletromobilidade, desde a fabricação até a manutenção de estações.

No artigo de GAUTO et al. (2023), é possível encontrar um gráfico que compara as emissões médias de Gases de Efeito Estufa ao longo de todo o Ciclo de Vida de diferentes veículos, de acordo com o combustível utilizado. Embora os autores tenham tomado exemplos de modelos específicos, é possível ter uma percepção mais detalhada sobre o impacto de cada motorização, bem como de como elas são alimentadas. A Figura 19 exibe o gráfico, em inglês, onde ICEV representa os Veículos com Motores de Combustão Interna, HEV representa os

Veículos Híbridos (Não Plug-in), PHEV representa os Veículos Híbridos Plug-in, e BEV representa os Veículos Elétricos a Bateria.

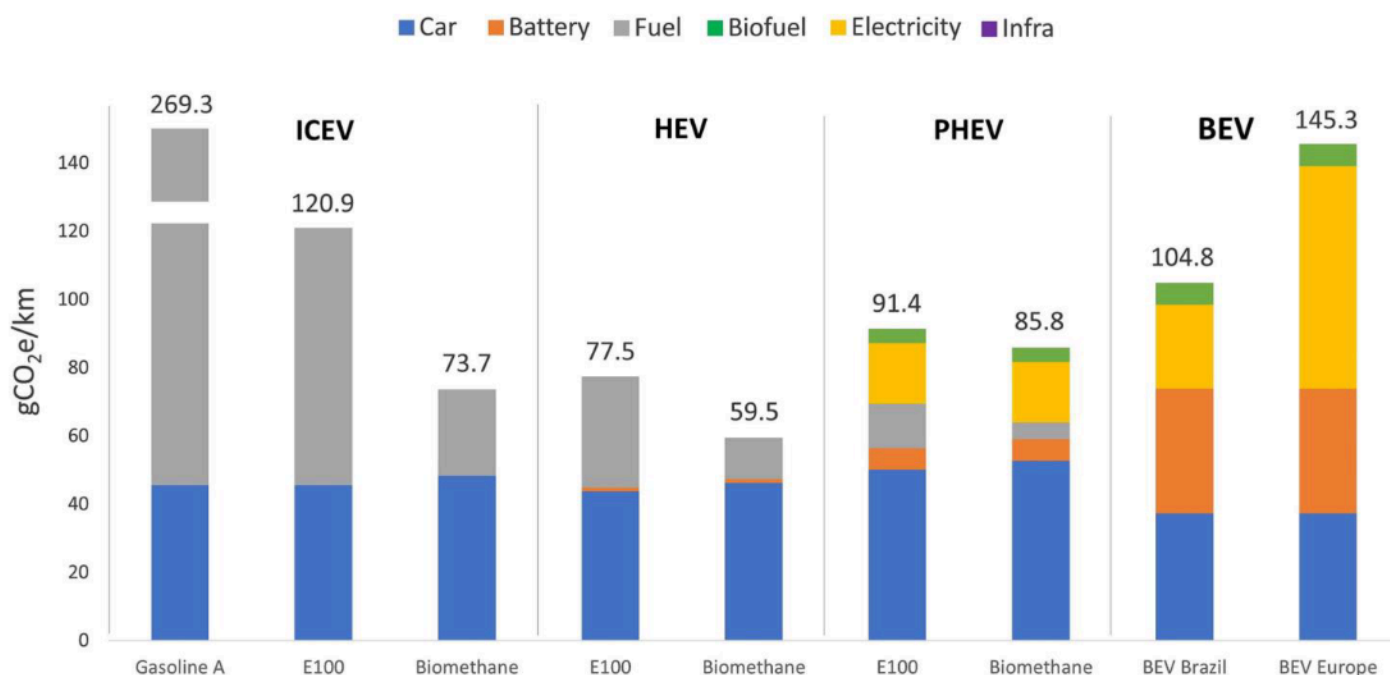


Figura 19 - Emissões médias de GEE no Ciclo de Vida de veículos selecionados (GAUTO et al., 2023)

Conclui-se, portanto, que a menor emissão de GEE ao longo do ciclo de vida – da extração de matérias primas, infraestrutura para recarga, eletricidade consumida, produção e descarte de baterias, emissões da utilização de combustível e a produção e descarte do veículo – é encontrada nos veículos híbridos não plug-in, movidos a Biometano.

Embora o biometano não seja um combustível comum no Brasil, o estudo direciona as comunidades científicas, políticas e industriais a reconsiderarem os padrões que são tomados como soluções absolutas, ou “balas de prata” para a Transição Energética e descarbonização do setor de transporte.

4.1 INFRAESTRUTURA: CARREGAMENTO, DESCARTE E DESAFIOS REGIONAIS

Um dos maiores desafios para a implementação de veículos elétricos no Brasil é a ausência de uma infraestrutura robusta e distribuída de carregamento. Isso não se limita à instalação de pontos de recarga, mas envolve a modernização da rede elétrica nacional para suportar a demanda crescente, principalmente em

regiões mais remotas. Além disso, é fundamental estabelecer regulamentações claras para padronizar e tornar mais seguros os protocolos de carregamento, incentivando parcerias público-privadas para reduzir custos de implementação. Exemplos internacionais, como os modelos de redes inteligentes da Europa, podem servir de inspiração para o Brasil, adaptando-os às peculiaridades geográficas e socioeconômicas nacionais. A criação de um plano integrado para eletromobilidade, incluindo incentivos fiscais e subsídios direcionados à infraestrutura, é essencial para superar esses desafios e viabilizar a transição energética.

Além da expansão de pontos de recarga, a implementação de veículos elétricos no Brasil exige investimentos na modernização da rede elétrica e no estabelecimento de regulamentações claras para padronizar os sistemas e mecanismos de carregamento.

No que tange os pontos de recarga, há três principais tipos de carregamento:

- Carregamento lento (AC – Corrente Alternada) - realizado em tomadas convencionais, domésticas ou estações de baixa potência (3-22 kW). Tempo médio de carregamento: 6-12 horas.
- Carregamento rápido (DC – Corrente Contínua) - realizado em estações de alta potência (50-150 kW). Tempo médio de carregamento: 30 min a 2 horas.
- Carregamento Ultrarrápido (DC – Corrente Contínua) – utiliza carregadores de alta potência (150kW ou mais) e é adotado para viagens longas, podendo recarregar 80% da bateria em menos de 30 minutos.

Para aprimorar a estrutura de pontos de carregamento, é fundamental que haja padrões regulatórios estabelecendo critérios de qualidade mínimos e assegurando a disseminação dos postos de recarga ao longo do território brasileiro. A tabela 4 abaixo compara as regulações de alguns países, a título de exemplificação:

País	Infraestrutura Atual	Padrões Regulatórios
Noruega	Mais de 20 mil pontos de recarga para um mercado de ~80% de BEV. Incentivos fiscais e expansão da rede privada.	Regulamentação avançada para obrigatoriedade de recarga em novos empreendimentos.
China	Maior rede mundial (aproximadamente 5 milhões de carregadores). Expansão acelerada por subsídios do governo.	Padrão GB/T para carregamento, obrigatoriedade de infraestrutura pública e privada.
Estados Unidos (EUA)	Crescimento acelerado, com expansão de redes como Tesla Supercharger e Electrify America.	Padrão CCS e CHAdeMO, além de incentivos federais.
Brasil	Infraestrutura emergente, concentrada em grandes cidades (mais de 1000 estações). Pouca padronização.	Ausência de regulação federal obrigatória para carregadores em novas construções, ou de padrões sólidos como dos EUA

Tabela 4 - Comparativo de Infraestrutura e regulações de alguns países. Fonte: Autor, 2024.

Portanto, torna-se possível esboçar uma breve caracterização sobre como seriam as estruturas mínimas, ideal e a atual encontrada no país detentor da maior economia da América Latina:

- Mínima - Cobertura básica em rodovias e cidades grandes, permitindo viagens intermunicipais, de distâncias superiores às autonomias dos veículos.
- Ideal - Rede de carregamento bem distribuída, com carregamento padronizado, acessível e contando com tecnologias de recargas ultrarrápidas.
- Atual - Restrita a grandes centros e rodovias principais, com baixa padronização.

Contudo, o constante ciclo de recargas leva a um ponto que não pode ser ignorado: o desgaste das baterias. A perda da vida útil destes dispositivos armazenadores de energia, implica no descarte e/ou reciclagem das baterias e seus

resíduos. Usualmente, as baterias utilizadas nos BEV são de íons de lítio e possuem vida útil estimada entre 8 e 15 anos.

Após o período citado acima, torna-se necessário o descarte ou reaproveitamento adequado para mitigar impactos ambientais relacionados à presença de metais pesados como lítio, cobalto, níquel e outros no meio ambiente. Abaixo, na tabela 5, é possível observar alguns modelos internacionais de gerenciamento de descarte deste tipo de resíduo.

País / Região	Estratégias de Descarte e Reciclagem	Regulamentação
União Europeia	Implementação de economia circular, reciclagem obrigatória e rastreabilidade.	Regulamento Battery Directive (2023) obriga fabricantes a recolher e reciclar baterias.
China	Exigência de reciclagem por fabricantes e reutilização em armazenamento de energia.	Empresas automotivas são responsáveis pelo descarte correto.
Estados Unidos (EUA)	Programas de reciclagem privados em crescimento, como da Tesla e Redwood Materials.	Regulamentação estadual e federal variando entre estados.
Brasil	Iniciativas isoladas e programas piloto de reciclagem. Ausência de estrutura de larga escala.	Política Nacional de Resíduos Sólidos exige planos de descarte, mas sem fiscalização efetiva.

Tabela 5 - Comparativo de Estratégias de Descarte de alguns países. Fonte: Autor, 2024

Nesta ótica, o primeiro passo rumo à mitigação de resíduos poderia ser a definição de regulamentação e legislação específica, seguida da criação de centros de descarte obrigatórios nas montadoras e alguns pontos de coleta. Idealmente haveria uma rede nacional de reciclagem e reutilização que fosse totalmente integrada. Contudo, a realidade brasileira é que não há uma regulamentação clara, e empresas privadas lideram as iniciativas de acordo com suas capacidades de permear o território nacional.

Portanto, o Brasil precisa de legislações e regulações federais específicas para toda a cadeia de infraestrutura de carregamento, descarte, gerenciamento de resíduos, padrões de fiscalização e controles de emissões de GEE, com diretrizes

claras sobre o papel do Estado, das empresas e dos cidadãos. Os modelos de outros países, mais avançados no assunto, podem servir como base para desenvolver o sistema regulatório e legislações específicas brasileiras.

5 ANÁLISE E PROJEÇÃO DE CUSTOS

O próximo passo da análise é compreender os custos, para o consumidor, relacionados à utilização de cada motorização. Para isto, serão analisados três veículos diferentes – todos sedãs, contudo um BEV, um HEV e um ICEV. Para cada veículo, serão observados:

1. Custo de aquisição;
2. Custos de manutenção preventiva programada;
3. Custos de operação.

Os custos 1 e 2, isto é, de aquisição e manutenção preventiva programada, respectivamente, serão apurados de acordo com as montadoras de cada veículo. A quantidade de manutenções preventivas seguirá o Plano de Manutenção elaborado pelas montadoras para cada um dos respectivos veículos. No que tange o custo 3, de operação, serão utilizados dados de eficiência e consumo, cruzando-os com valores médios de combustíveis e eletricidade em 2024, com base nos dados da ANP e ANEEL.

Alguns custos, como manutenções corretivas e depreciação, serão desconsiderados para fins desta análise. Pois as manutenções corretivas são diretamente dependentes da utilização por cada usuário. Já as depreciações são consideravelmente complexas de se prever, uma vez que o mercado tem tido severas flutuações e sido impactado pela inflação: mesmo com a inflação controlada, após a pandemia de COVID-19, é possível encontrar veículos usados sendo vendidos por valores superiores ao de sua compra, quando eram novos e 0km.

Relativo ao custo de operação, para o valor da eletricidade: de acordo com a Aneel, o valor médio da tarifa de kWh no Brasil é de R\$0,73 para Tarifa doméstica Convencional (ANEEL, 2024).

Para os combustíveis, segundo a ANP, através do relatório de levantamento histórico dos preços, feito pela Agência, o valor médio do etanol foi de R\$3,85 para os estados do país, apurando mais de quatro mil postos de combustíveis ao longo de 2024. O mesmo relatório traz, para a gasolina comum, um valor médio de R\$5,92; e para a gasolina aditivada, um valor médio de R\$6,11.

Seguindo a análise, serão selecionados três veículos, da categoria sedã, para apurar características principais como motorização, autonomia, eficiência, potência, torque, peso e outras. Os veículos serão: Toyota Corolla XEi (Veículo a Combustão - ICEV), Toyota Corolla Altis Hybrid Premium (Veículo Híbrido - HEV) e BYD Seal (Veículo 100% Elétrico - BEV). Os dados desta análise podem ser encontrados na Tabela 6 a seguir.

Categoria	Veículo de Combustão Interna	Veículo Híbrido	Veículo Elétrico
Montadora	Toyota	Toyota	BYD
Veículo	Corolla XEi	Corolla Altis Hybrid Premium	Seal
Motorização	2.0 L, Dual VVT-iE, 16V	1.8L, VVT-I, 16V + Dois Motores Elétricos (MG1 e MG2)	Dois Motores Elétricos, não especificados
Potência (cv)	175	101 + 72	531
Torque (kgf.m)	21,3	14,5 + 16,6	60,16
Peso (kg)	1410	1450	2631
Capacidade Bateria (kWh)	-	Não informado	82,56
Capacidade Tanque de Combustível (l)	50	43	-
Eficiência	13,9 km/l	16,3 km/l	4,5 km/kWh
Autonomia (km)	695	700.9	372
0-100km/h (s)	9,2	12,5	3,8

Tabela 6 - Características dos veículos selecionados - Fonte: Autor, 2024

Uma vez esclarecidas as principais informações e características de cada veículo selecionado para a análise, fora elaborada a Tabela 7 para apurar os custos de aquisição e manutenção programada dos automóveis citados.

Categoria	Veículo de Combustão Interna	Veículo Híbrido	Veículo Elétrico
Montadora	Toyota	Toyota	BYD
Veículo	Corolla XEi	Corolla Altis Hybrid Premium	Seal
Preço aquisição	R\$ 161,290.00	R\$ 188,590.00	R\$ 299,800.00
Revisão 1	R\$ 538.70	R\$ 499.90	R\$ 380.00
Revisão 2	R\$ 999.00	R\$ 984.00	R\$ 1,610.00
Revisão 3	R\$ 789.00	R\$ 858.00	R\$ 380.00
Revisão 4	R\$ 1,446.00	R\$ 1,413.00	R\$ 1,610.00
Revisão 5	R\$ 762.00	R\$ 765.00	R\$ 1,060.00
Revisão 6	R\$ 1,353.00	R\$ 1,170.00	R\$ 1,610.00
Revisão 7	R\$ 675.00	R\$ 744.00	R\$ 380.00
Revisão 8	R\$ 1,308.00	R\$ 1,332.00	R\$ 1,610.00
Revisão 9	R\$ 666.00	R\$ 846.00	R\$ 380.00
Revisão 10	R\$ 1,767.00	R\$ 1,752.00	R\$ 2,290.00
Total	R\$ 171,593.70	R\$ 198,953.90	R\$ 311,110.00

Tabela 7 - Custos de aquisição e manutenção programada - Fonte: Autor

Os valores apurados, como preço de aquisição e custo de revisões preventivas programadas, foram extraídos dos sites das montadoras, acessado em 13 de dezembro de 2024. Custos como substituição dos pneus e demais itens de desgaste natural e não cobertos pelo plano de manutenção programada, foram desconsiderados em função da variação de valores de mercado, sobretudo em função das escolhas dos consumidores e regiões.

Ao analisar o plano de manutenção proposto por cada montadora, é interessante observar que ambas preveem manutenções anuais, ou por quilometragem – atendendo ao fator que for alcançado primeiro. Todavia, a Toyota considera manutenções anuais ou a cada 10 mil quilômetros, enquanto a BYD propõe as revisões com periodicidade anual ou a cada 20 mil quilômetros.

Através de informações como preço de aquisição, manutenção, eficiência, consumo médio de combustível ou eletricidade e a expectativa, tornou-se possível apurar o custo total de aquisição e operação dos três veículos em 10 anos – desconsiderando apenas custos como manutenções corretivas e itens de desgaste natural, pois envolvem especificidades acerca da utilização do equipamento, tal qual

a depreciação, uma vez que esta é impactada por diversos fatores externos, incluindo mas não se limitando à especulação de mercado.

A partir dos dados apurados, a análise foi dividida em quatro etapas distintas:

5.1 CUSTOS DE AQUISIÇÃO E OPERAÇÃO

Obtendo o preço de mercado, dos veículos selecionados, diretamente com a montadora, assim como os consumos e eficiências médias de cada um deles, foi possível calcular o custo anual de operação (combustível para o ICEV e HEV, e eletricidade para o BEV).

Para calcular o custo de operação, foram definidas as seguintes variáveis:

D = Distância percorrida anualmente (km/ano)

C_f = Consumo médio de combustível fóssil (km/l) – aplicável para o ICEV e HEV

C_e = Consumo médio de eletricidade (km/kWh) – aplicável para o BEV

P_g = Preço médio do litro da gasolina (R\$5,92 de acordo com a ANP)

P_e = Preço médio do kWh de eletricidade (R\$0,73 de acordo com a ANEEL)

Para os ICEV e HEV, a metodologia de cálculo foi:

O volume de combustível consumido anualmente (V_f) foi calculado por:

$$V_f = D / C_f (\text{Litros/ano})$$

O custo de operação anual do veículo movido a combustível fóssil é:

$$C_{opf} = V_f \times P_g$$

Substituindo V_f , temos:

$$C_{opf} = (D / C_f) \times P_g$$

Já para o BEV, a metodologia de cálculo foi:

A energia elétrica consumida anualmente (E_e) foi calculada por:

$$E_e = D / C_e (\text{kWh/ano})$$

O custo de operação anual do veículo elétrico é:

$$C_{ope} = E_e \times P_e$$

Substituindo E_e , temos:

$$C_{ope} = (D / C_e) \times P_e$$

Os resultados encontrados estão disponíveis na Tabela 8 abaixo:

Custos de Combustível e Eletricidade por ano			
Categoria	ICEV	HEV	BEV
Montadora	Toyota	Toyota	BYD
Veículo	Corolla XEi	Corolla Altis Hybrid Premium	Seal
Consumo médio de combustível fóssil (C_f)	13,9 km/l	16,3 km/l	-
Consumo médio de eletricidade (C_e)	-	-	4,5 km/kWh
Utilização anual estimada pela montadora (km)	10000	10000	20000
Volume de Combustível consumido anualmente (V_f) - em litros	719.42	613.49	-
Energia elétrica consumida anualmente (E_e) - em kWh	-	-	4444.44
Custo de operação anual	R\$ 4.258,97	R\$ 3.631,86	R\$ 3.244,44

Tabela 8 - Custos de Combustível e Eletricidade por ano

A partir dos valores calculados na Tabela 8, foi possível traçar este gráfico da Figura 20 para analisar os custos relacionados ao ciclo de utilização dos veículos

selecionados, utilizando os valores kWh, combustíveis e aquisição explicitados no capítulo 5.

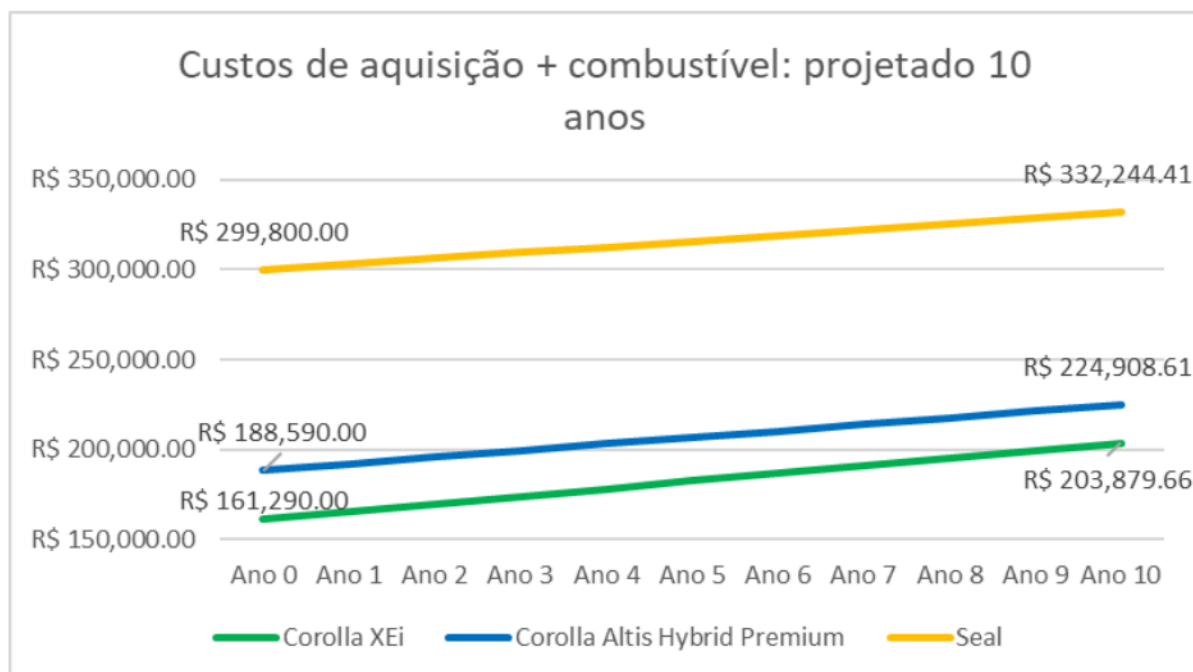


Figura 20 - Custo de aquisição e operação, projetado por 10 anos. Fonte: Autor

Para os fins da análise acima, assumiu-se que os motores a combustão serão abastecidos com gasolina durante os 10 anos da janela de análise, e desprezou-se possíveis projeções de reajustes anuais de preço do combustível.

Ainda que os veículos híbridos sejam mais econômicos e eficientes, após 10 anos ainda não é possível observar um retorno sobre o investimento necessário para comprar o Corolla Altis Hybrid Premium, que é mais caro do que o Corolla XEi.

5.2 CUSTOS DE AQUISIÇÃO E MANUTENÇÃO PROGRAMADA

Outro fator extremamente relevante é o custo de manutenção de cada um dos veículos. É conhecido que cada veículo tem um desgaste específico, portanto os valores adotados para plotar o gráfico, da Figura 21 abaixo, seguiram estritamente os planos de manutenções preventivas programadas pelas montadoras de cada veículo selecionado para a análise. Desta maneira, no gráfico abaixo é explicitado o valor total considerando o custo de aquisição e as manutenções preventivas planejadas para os próximos 10 anos após a compra dos equipamentos.

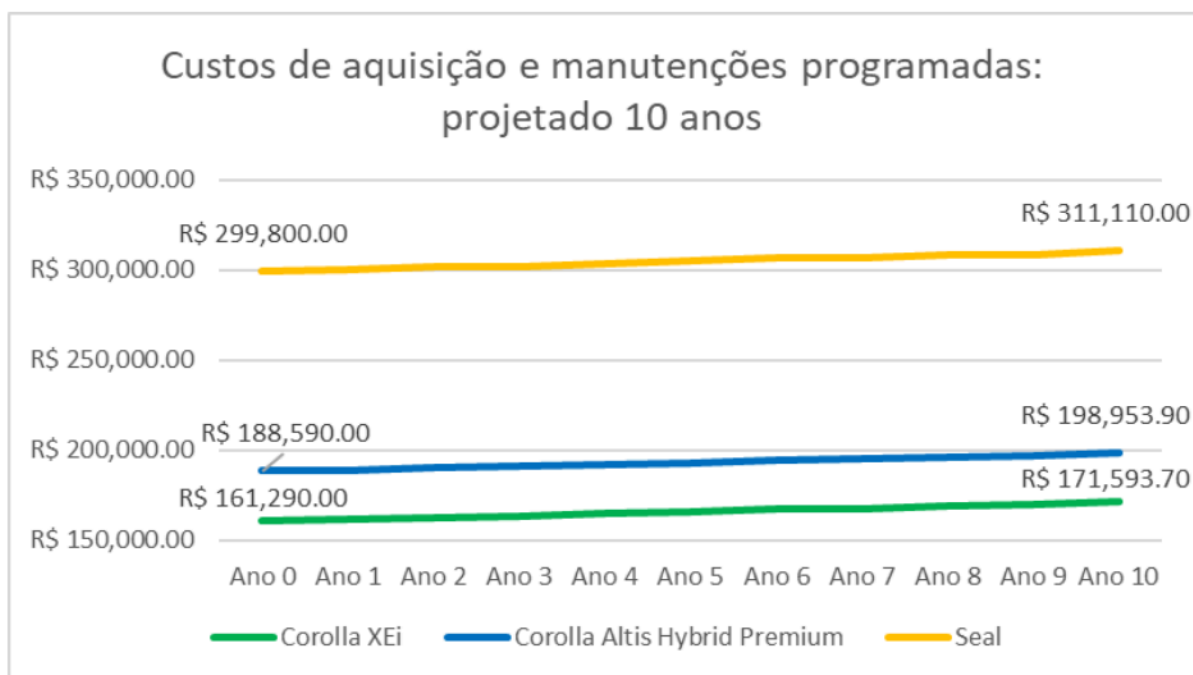


Figura 21 - Custo de Aquisição e Manutenção Preventiva Programada, projetado por 10 anos.
Fonte: Autor

No gráfico acima, da Figura 21, é possível observar o mesmo comportamento do gráfico da Figura 20: a diferença de custo de operação dos 3 veículos conserva praticamente a mesma diferença dos valores necessários para adquirir cada um dos exemplares de veículos analisados. Mesmo considerando os distintos planos de manutenção, o Corolla XEi (com motor a combustão interna) se mantém como a opção mais econômica ao longo de 10 anos.

5.3 CUSTO TOTAL

Ao abordar o custo total, estão sendo considerados: custos de aquisição, custos de operação (considerando eficiência, consumo e valores médios dos combustíveis) e os custos de manutenção.

As premissas adotadas foram as mesmas abordadas anteriormente, nas seções 5.1 e 5.2, contudo agora foram compiladas em um único gráfico para trazer uma análise mais objetiva, presente na Figura 22.

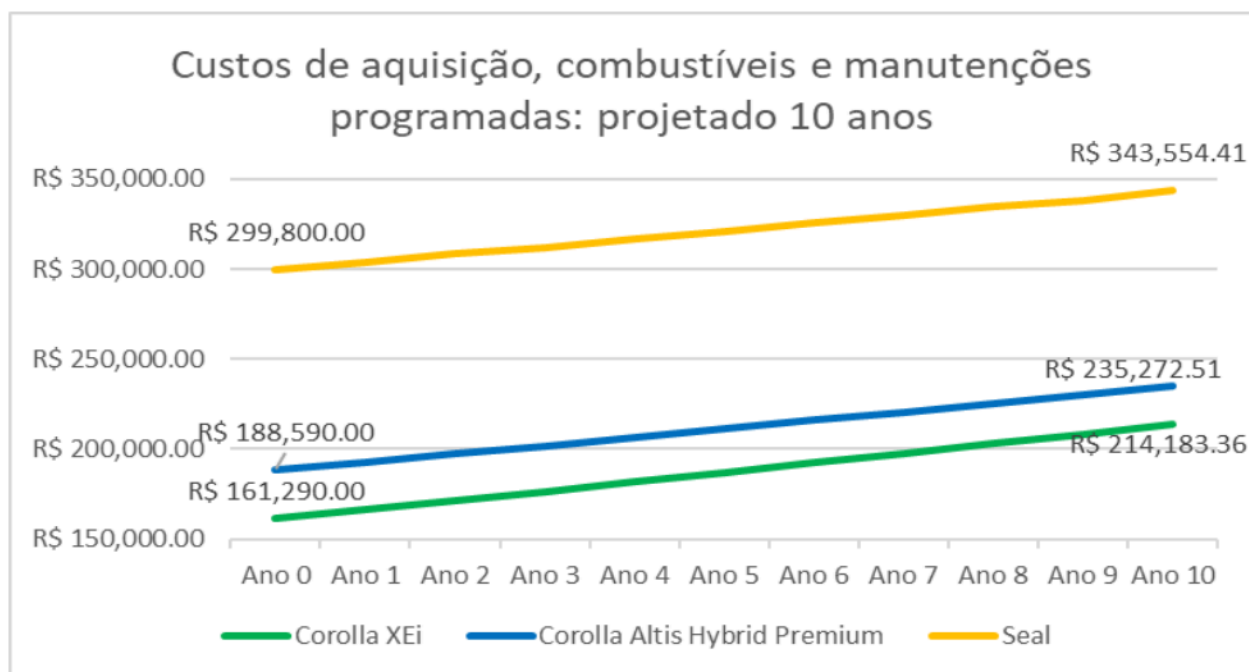


Figura 22 - Custo total projetado por 10 anos. Fonte: Autor.

Torna-se possível observar que o padrão de comportamento fora o mesmo: embora com ligeiras ondulações nas linhas, o Corolla XEi (ICEV) permaneceu sendo, economicamente, o mais vantajoso para o usuário.

Todavia, é intrigante observar que existe uma aproximação entre os valores encontrados para o Corolla XEi e o Corolla Alris Hybrid Premium, os ICEV e HEV, respectivamente. Desta maneira, buscou-se alternativas para extrapolar a análise, na tentativa de descobrir se em algum momento o HEV torna-se, economicamente, mais interessante ao usuário.

5.4 CUSTO TOTAL EXTRAPOLADO

Para extrapolar os dados e encontrar uma linha de tendência, fora utilizado o conceito de regressão linear. A Regressão Linear é um método estatístico amplamente utilizado para modelar a relação entre uma variável dependente (Y) e uma ou mais variáveis independentes (X). Seu principal objetivo é estimar uma função linear que melhor represente os dados observados, permitindo a identificação de tendências e a realização de previsões.

Matematicamente, a regressão linear simples pode ser expressa pela equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Onde:

Y é a variável dependente;

X é a variável independente;

β_0 representa o intercepto (valor de Y quando $X=0$);

β_1 é o coeficiente angular, indicando a taxa de variação de Y em relação a X ;

ε é o termo de erro, representando variações não explicadas pelo modelo.

Em conjunto à Regressão Linear, foi adotada também a métrica estatística de Coeficiente de Determinação (R^2) para medir a proporção da variabilidade da variável dependente (Y) que é explicada pelas variáveis independentes (X). O R^2 varia entre 0 e 1, sendo:

- $R^2 = 1$ indica que o modelo explica perfeitamente 100% da variação dos dados, ou seja, os valores previstos coincidem exatamente com os valores observados.
- $R^2 = 0$ significa que o modelo não consegue explicar nenhuma variação dos dados, sendo essencialmente inútil para previsões.

Ambos, conceito e métrica, foram adotados através do software Microsoft Excel, gerando linhas de tendência para cada um dos casos, determinando a regressão linear e o R^2 das três alternativas estudadas. Os resultados podem ser encontrados na Figura 23 abaixo.

Conclui-se, portanto, que mesmo com o veículo híbrido sendo mais eficiente, a diferença não oferece um retorno sobre o investimento dentro da janela de análise de 10 anos. Tal conclusão também é alcançada com o veículo elétrico, que possui maior custo de aquisição, não compensando tamanho investimento quando comparado com os veículos de combustão interna e híbrido analisados.

6 CONCLUSÃO

Desta forma, o presente estudo aponta que muito embora não exista a “bala de prata” para a Transição Energética e descarbonização do setor de transportes, as tecnologias carecem de desenvolvimento – quer seja para se aprimorarem as alternativas existentes ou para desenvolverem alguma outra opção disruptiva – porém os veículos elétricos também não são a solução do desafio enfrentado pelo setor.

Conforme explicitado por Gauto et. al. (2023) os veículos elétricos possuem uma considerável emissão de GEE, sobretudo nas etapas de produção da bateria e matriz energética para operação destes equipamentos ao longo do ciclo de vida. Ainda de acordo com este autor, as melhores alternativas seriam o Veículo Híbrido Não *Plug-in* (HEV) e abastecido com Biometano, seguido por Veículo de Combustão Interna (ICEV) abastecido com Biometano, e o Veículo Híbrido Não *Plug-in* abastecido com Etanol 100% (E100), nesta ordem.

O mais curioso é observar que, mesmo na matriz energética brasileira, o Veículo 100% Elétrico (BEV) não é uma opção ecológica ou menos agressiva ao meio ambiente quando comparado com o Veículo de Combustão Interna (ICEV) movido a Biometano. O BEV é uma opção menos ofensiva ao meio ambiente apenas quando comparado com o ICEV movido a Etanol ou Gasolina A (gasolina pura) – como observado na Figura 19.

Todavia, atualmente, no Brasil, ainda não há uma produção de Biometano suficiente para abastecer o mercado interno na sua integralidade, ou se tornar competitivo frente ao E100. Desta forma, é notório observar que o país ainda carece severamente de investimentos e desenvolvimento em infraestruturas para produção e distribuição de Biometano, para carregamento dos veículos elétricos e híbridos.

Sob a perspectiva econômica para o usuário, como observado nas análises de projeção do capítulo 5, especificamente na Figura 22, ao comparar os três modelos de veículo, conclui-se que não vale a pena o investimento em um Veículo 100% Elétrico. O investimento inicial, para aquisição, é assustadoramente alto, enquanto o custo de operação, embora inferior, não é suficiente para trazer um Retorno sobre o Investimento (ROI).

Assim sendo, a opção mais econômica ainda é o Veículo de Combustão Interna. Porém, caso o usuário queira reduzir suas emissões de GEE, quer seja por iniciativa própria, quer seja por eventuais sistemas de taxação, a alternativa mais interessante é o Veículo Híbrido Não *Plug-in*, abastecido com biocombustíveis – etanol ou biometano, sendo este último o que apresenta menor impacto ao meio ambiente.

Adicionalmente, embora o retorno sobre o investimento para o consumidor em 10 anos seja limitado, é importante considerar os benefícios sociais e ambientais mais amplos. A adoção de veículos elétricos e híbridos, por exemplo, contribui significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa, melhora a qualidade do ar em áreas urbanas e diminui custos relacionados à saúde pública. Nesse contexto, políticas públicas que incentivem a adoção desses veículos, como subsídios e isenções fiscais, podem equilibrar os custos iniciais mais elevados, acelerando a transição energética e garantindo benefícios econômicos e sociais no longo prazo.

A potencial implementação de um mercado de créditos de carbono, onde as montadoras pagariam pelo dióxido de Carbono emitido no processo de produção e os usuários pagariam pelo CO₂ emitido na operação, também é um fator que poderia alterar a realidade enfrentada atualmente e modificar o cenário de análise econômica apresentado neste trabalho.

De maneira geral, o Brasil necessita de regulações claras e que apontem o futuro do Setor de Transportes, bem como de infraestruturas na cadeia de produção de biocombustíveis, de desenvolvimento das cadeias produtivas, bem como de tecnologias inovadoras que possam aprimorar as soluções existentes, tornando-as mais competitivas, ou trazer novas alternativas ao cenário industrial.

Como próximos passos de estudo, pode-se estudar de forma técnica e econômica a implementação de veículos movidos a H₂, com células de combustíveis e outras tecnologias, contemplando a pegada de GEE ao longo de todo o ciclo de vida dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10520:2023 - Informação e documentação - Citações em documentos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Boletim Mensal de Combustíveis. Brasília: ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp>. Acesso em: 12 dez. 2024.

ANEEL. Ranking da Tarifa Residencial. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas#!>. Acesso em: 12 dez. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). Relatório Anual de Mobilidade Elétrica no Brasil. São Paulo: ABVE, 2024. Disponível em: <https://www.abve.org.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Instituto Nacional de Tecnologia (INT): Histórico e Pesquisa em Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.int.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Brasília: Presidência da República, 2017. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Combustível do futuro. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro>. Acesso em: 29 out.2024

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Rota 2030 - Mobilidade e Logística. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 11 dez. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Frota de Veículos 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024>. Acesso em: 11 dez.2024.

BRASIL. Plano Nacional de Eletromobilidade: Diretrizes para Expansão de Infraestrutura de Carregamento. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BYD. Manual de Atualizações do SEAL. Disponível em: [https://www.byd.com/content/dam/byd-site/br/manuais-auto-byd/updates-02-12-2024/SEAL \(Todos\).pdf](https://www.byd.com/content/dam/byd-site/br/manuais-auto-byd/updates-02-12-2024/SEAL%20(Todos).pdf). Acesso em: 13 dez. 2024.

BYD. SEAL. Disponível em: <https://www.byd.com/br/car/seal>. Acesso em: 13 dez. 2024.

BYD. SPEC SEAL EV PBEV AG23. Disponível em: https://www.byd.com/content/dam/byd-site/br/flyer/SPEC_SEAL_EV_PBEV_AG23_ago23-2.pdf. Acesso em: 13 dez. 2024.

CARVALHO, M. R.; SOUZA, L. P. Histórico do Desenvolvimento de Biocombustíveis no Brasil. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 45-67, 2021.

COSTA, L.; MOURA, R.; SILVA, J. História e impactos da indústria automobilística no Brasil. Estudos de História, v. 24, n. 1, p. 83-100, 2012

DAVIS, K. P. Simplified electric vehicle powertrain modelling. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). University College Cork, Cork, Irlanda, 2020. Disponível em: <https://cora.ucc.ie/items/008da608-8cd2-42d3-8136-5df85d665787>. Acesso em: 30 jan. 2025.

DRAPER, Norman R.; SMITH, Harry. Applied Regression Analysis. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2024: Relatório Síntese – Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 13 set. 2024.

ENERGY INSTITUTE. 2024 Statistical Review of World Energy. Disponível em: https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/684_EI_Stat_Review_V16_DIGITAL.pdf. Acesso em: 12 dez. 2024.

ENERGY INSTITUTE. Energy charting tool. Energy Institute, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review/energy-charting-tool/energy-charting-tool>. Acesso em: 17 out. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese ano base 2023*. Rio de Janeiro, 2024

FARINA, M. A. O automóvel: um século de história. São Paulo: Editora do Autor, 2006.

FERREIRA, J. P. A Evolução das Políticas Públicas de Biocombustíveis no Brasil. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020.

GAUTO, Marcelo Antunes et al. *Hybrid vigor: why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles*. Energy for Sustainable Development, v. 76, p. 101261, 2023

GOLDEMBERG, J. O setor de transportes e sua evolução internacional e nacional. In: Bioenergia e Sustentabilidade. São Paulo: Editora Biotec, 2008

GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. Biotechnology for Biofuels, v. 1, p. 6-12, 2008

HACKNEY, Jeremy; DE NEUFVILLE, Richard. *Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 35, n. 3, p. 243-266, 1999

HAWKINS, Troy R.; GAUSEN, Ola Moa; STRØMMAN, Anders Hammer. *Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review*. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 17, n. 8, p. 997-1014, 2012

HBM. Mapeamento de rendimento em motores elétricos. Artigo 6207. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6207/artigo-tecnico-mapeamento-de-rendimento-em-motores-eletricos/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Relatório sobre Energia e Sustentabilidade no Brasil. Brasília: IPEA, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2024: Electric Mobility Progress and Policy Insights. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 12 dez. 2024.

JAZAR, R. N. Vehicle Dynamics Theory and Application. Riverdale: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-74243-4.

LUZ, D. M.; CAMPOS, A. C. O surgimento dos motores a combustão e sua influência no transporte. Engenharia e Tecnologia, v. 15, p. 115-130, 2019

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass and Bioenergy, v. 32, p. 582-595, 2008.

MERA, Zamir et al. *Comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars in Brazil*. International Council on Clean Transportation, 2023.

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. Introduction to Linear Regression Analysis. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Paris Agreement. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>. Acesso em: 11 dez. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Relatório sobre a COP-26 e Metas Climáticas. Disponível em: <https://www.un.org>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 6 fev. 2025.

PETROBRAS. Relatório Anual de Produção e Sustentabilidade 2023. Rio de Janeiro: Petrobras, 2023.

PETROBRAS. Relatório Histórico sobre Biocombustíveis e Energias Renováveis. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

PORSCHE. Gamechanger: When was the first electric Porsche car made?. Disponível em: <https://www.porsche.com/stories/innovation/gamechanger-how-ferdinand-porsche-designed-first-hybrid-car/>. Acesso em: 11 dez. 2024

ROITMAN, Tamar. *Biocombustíveis e veículos elétricos no Brasil: a coexistência é possível*. Fundação Getúlio Vargas, 2017

SOEIRA, N. C. R. (2023). Avaliação da implementação dos veículos elétricos na matriz energética brasileira. Publicação T.DM-001/2023. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p 77.

SOUZA, Reynaldo Barros de. *Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2010

Toyota. ALTIS HYBRID ALTIS H. Disponível em: <https://media.toyota.com.br/f942854f-e28a-4858-81b9-f7605865ad8f.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2024.

Toyota. Modelos - Corolla. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/modelos/corolla>. Acesso em: 13 dez. 2024.

Toyota. Revisões Periódicas. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/meu-toyota/servicos/revisoes-periodicas>. Acesso em: 13 dez. 2024.

VONBUN, Christian. *Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura*. Texto para Discussão, n. 2123. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2015

WILLIAMSON, S. S. L. S. M. E. A. Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Model. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 21, 2006.