



Cenários de Redução de Emissões de Veículos Leves no Brasil

Scenarios for Reducing Emissions from Light Vehicles in Brazil

Escenarios de Reducción de Emisiones de Vehículos Ligeros en Brasil

Isaías Grilo Júnior

Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (isaiasgrilo.jr@usp.br)

José Eduardo Holler Branco

Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo (jehbranco@usp.br)

Resumo

A necessidade de descarbonização do setor de transportes é um desafio central para o cumprimento das metas climáticas brasileiras. Este estudo analisa o impacto da substituição parcial e total da frota nacional de veículos leves por tecnologias de combustão, híbridas e elétricas, considerando o uso de gasolina, etanol hidratado e eletricidade. A metodologia baseou-se nos fatores de consumo energético divulgados pelo Programa Nacional de Etiquetagem Veicular (2025) e nas intensidades de carbono publicadas pela Empresa de Pesquisa Energética, calculando as emissões em gramas de CO₂ equivalente por quilômetro (gCO₂eq/km). Os resultados indicam que veículos a combustão abastecidos com gasolina representam o cenário mais intensivo em carbono (122,48 gCO₂eq/km), enquanto os elétricos apresentam o melhor desempenho (11,33 gCO₂eq/km). O etanol destacou-se como alternativa competitiva, reduzindo as emissões mesmo em motores convencionais (37,37 gCO₂eq/km), e os híbridos *flex-fuel* abastecidos com etanol alcançaram 29,06 gCO₂eq/km. Conclui-se que, embora o etanol e os híbridos desempenhem papel estratégico de transição, a eletrificação da frota representa a solução de maior potencial para a mitigação de gases de efeito estufa no longo prazo, desde que acompanhada por políticas públicas e investimentos em infraestrutura.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Palavras-chave: Veículos Elétricos; Híbridos; Combustão; *Flex-Fuel*; Gases de Efeito Estufa.

Abstract

The decarbonization of the transport sector is a key challenge for achieving Brazil's climate goals. This study evaluates the impact of partially and fully replacing the national light vehicle fleet with combustion, hybrid, and electric technologies, considering gasoline, hydrous ethanol, and electricity as energy sources. The methodology was based on energy consumption factors provided by the Brazilian Vehicle Labeling Program (2025) and carbon intensities published by the Energy Research Office, with emissions calculated in grams of CO₂ equivalent per kilometer (gCO₂eq/km). Results show that gasoline-powered combustion vehicles represent the most carbon-intensive scenario (122.48 gCO₂eq/km), while electric vehicles deliver the best performance (11.33 gCO₂eq/km). Ethanol proved to be a competitive alternative, reducing emissions even in conventional engines (37.37 gCO₂eq/km), and flex-fuel hybrids running on ethanol reached 29.06 gCO₂eq/km. The study concludes that ethanol and hybrids play a strategic transitional role, but fleet electrification represents the most effective long-term solution for greenhouse gas mitigation, provided it is supported by public policies and infrastructure investments.

Keywords: Electric Vehicles; Hybrids; Combustion; Flex-Fuel; Greenhouse Gases.

Resumen

La descarbonización del sector transporte constituye un desafío central para el cumplimiento de los objetivos climáticos de Brasil. Este estudio analiza el impacto de la sustitución parcial y total de la flota nacional de vehículos ligeros por tecnologías de combustión, híbridas y eléctricas, considerando la gasolina, el etanol hidratado y la electricidad como fuentes energéticas. La metodología se basó en los factores de consumo energético del Programa Brasileño de Etiquetado Vehicular (2025) y en las intensidades



de carbono publicadas por la Empresa de Investigación Energética, con emisiones calculadas en gramos de CO₂ equivalente por kilómetro (gCO₂eq/km). Los resultados muestran que los vehículos de combustión a gasolina representan el escenario más intensivo en carbono (122,48 gCO₂eq/km), mientras que los eléctricos presentan el mejor desempeño (11,33 gCO₂eq/km). El etanol demostró ser una alternativa competitiva, reduciendo las emisiones incluso en motores convencionales (37,37 gCO₂eq/km), y los híbridos flex-fuel con etanol alcanzaron 29,06 gCO₂eq/km. Se concluye que el etanol y los híbridos cumplen un papel estratégico de transición, pero la electrificación de la flota constituye la solución más eficaz a largo plazo para la mitigación de gases de efecto invernadero, siempre que esté acompañada de políticas públicas e inversiones en infraestructura.

Palabras clave: Vehículos Eléctricos; Híbridos; Combustión; Combustible Flexible; Gases de Efecto Invernadero.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se consolidado como um dos maiores desafios globais do século XXI, exigindo esforços coordenados para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a transição para uma economia de baixo carbono. O Acordo de Paris, firmado em 2015, reforça o compromisso dos países signatários em limitar o aquecimento global a valores bem abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, intensificando a necessidade de descarbonização em setores-chave (UNFCCC, 2015).

No Brasil, o setor de transportes responde por aproximadamente 44% das emissões nacionais de CO₂, sendo os automóveis responsáveis por uma parcela significativa desse total (IEMA, 2024). A predominância da gasolina como combustível representa uma fonte importante de emissões, devido à sua elevada intensidade de carbono. Nesse contexto, a avaliação de alternativas tecnológicas e energéticas para a frota veicular é fundamental para subsidiar políticas públicas e decisões empresariais alinhadas às metas de mitigação climática.

Diversos estudos internacionais apostam nos veículos elétricos como a principal solução de longo prazo para reduzir emissões do setor de transportes (IEA, 2025; Lutsey & Hall, 2019). Entretanto, o caso brasileiro apresenta particularidades relevantes: a presença consolidada do etanol como biocombustível renovável e o desenvolvimento de veículos *flex-fuel*, que conferem vantagens competitivas e reduzem a dependência de combustíveis fósseis (Melo & Sampaio, 2014).

Diante desse cenário, este artigo busca avaliar o impacto da introdução de diferentes tecnologias veiculares na frota nacional de veículos leves, considerando tanto combustíveis fósseis quanto renováveis. Para isso, são analisados cenários de substituição parcial e total da frota por veículos a combustão, híbridos e elétricos, a fim de compreender o potencial de mitigação das emissões de GEE associado a cada alternativa tecnológica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GASES DE EFEITO ESTUFA E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

Os gases de efeito estufa são substâncias presentes na atmosfera capazes de reter parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, intensificando o efeito estufa natural e contribuindo para o aquecimento global. A concentração crescente desses gases na atmosfera está diretamente associada ao aumento da temperatura média global e a mudanças climáticas, afetando ecossistemas, padrões climáticos e a disponibilidade de recursos naturais. Entre os principais GEE destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), emitidos principalmente pela queima de combustíveis fósseis, desmatamento, atividades agropecuárias, processos industriais e de tratamento de resíduos (WWF, 2021).

Para permitir comparações entre gases com diferentes impactos em termos de aquecimento, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) utiliza o conceito de Potencial de Aquecimento Global (GWP), que expressa o efeito de aquecimento de cada gás em relação ao CO_2 em um horizonte de tempo. De acordo com

esse conceito, considerando um período de 100 anos (GWP100), 1 kg de metano equivale a aproximadamente 28 kg de CO₂ e 1 kg de óxido nitroso equivale a cerca de 265 kg de CO₂. Esse cálculo permite que as emissões sejam reportadas em termos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), fornecendo uma métrica única e comparável que é amplamente utilizada em estudos de inventário de GEE, políticas de mitigação e avaliação do impacto ambiental de atividades humanas, como o transporte, a indústria e a agricultura (IPCC, 2014).

2.2 VEÍCULOS A COMBUSTÃO

Os veículos a combustão interna ou convencionais representam a maior parte da frota brasileira de leves. O funcionamento ocorre a partir da queima de combustível, dentro dos cilindros, liberando energia térmica que é convertida em movimento pelos pistões. Essa tecnologia, amplamente difundida, possui estrutura complexa, envolvendo milhares de componentes móveis no motor e no sistema de arrefecimento. Como consequência, sua eficiência energética é limitada, já que uma parcela significativa da energia é dissipada em forma de calor, reduzindo o aproveitamento final (Heywood, 1988).

Apesar de consolidada e apoiada por uma ampla infraestrutura de manutenção e abastecimento, a predominância da tecnologia de combustão interna ainda impõe sérios desafios ambientais e de saúde pública. Veículos movidos a combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, são responsáveis por emissões diretas de gases e poluentes atmosféricos, entre eles o monóxido de carbono e os óxidos de nitrogênio, que deterioram a qualidade do ar e contribuem para doenças respiratórias e cardiovasculares (Lomnicki *et al.*, 2014). No caso dos modelos *flex-fuel*, amplamente utilizados no Brasil, há a vantagem da flexibilidade de abastecimento tanto com gasolina quanto com etanol (Dias, 2012).

2.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos (EVs) utilizam exclusivamente motores acionados por eletricidade armazenada em baterias, eliminando a necessidade de sistemas tradicionais de combustão

e escapamento. A configuração técnica de um EV é mais simples do que a de um veículo a combustão interna, uma vez que dispensa sistemas de partida, exaustão e lubrificação e geralmente não requer caixa de câmbio. Outro ponto positivo é a alta eficiência energética dos EVs, que convertem grande parte da energia consumida diretamente em movimento das rodas (Helmerts & Marx, 2012).

No entanto, os EVs também apresentam limitações que dificultam sua ampla adoção no Brasil. O preço inicial elevado e a baixa disponibilidade de infraestrutura de recarga em muitas regiões ainda são barreiras significativas (Oliveira *et al.*, 2022). Além disso, a produção das baterias demanda mineração intensiva de recursos como lítio e cobalto, atividades que geram impactos ambientais e sociais relevantes. Questões ligadas à durabilidade, ao descarte e à reciclagem das baterias também fazem parte dos desafios que acompanham a expansão dessa tecnologia (Shu *et al.*, 2021).

2.4 VEÍCULOS HÍBRIDOS

Os veículos híbridos combinam motor a combustão interna com motor elétrico, formando um sistema motriz integrado capaz de oferecer maior eficiência do que tecnologias convencionais. Essa configuração permite que o motor elétrico atue em situações de maior demanda energética, como acelerações e tráfego urbano, reduzindo o esforço do motor a combustão. Além disso, muitos modelos híbridos utilizam a frenagem regenerativa para recuperar parte da energia cinética e armazená-la nas baterias, otimizando o uso da eletricidade disponível (Asim *et al.*, 2020).

O impacto ambiental dos híbridos depende do tipo de sistema adotado. Os híbridos leves (MHEV) funcionam apenas como apoio ao motor a combustão, enquanto os híbridos completos (HEV) podem operar por curtos períodos exclusivamente com energia elétrica. Os híbridos plug-in (PHEV) permitem recarga externa e oferecem maior autonomia elétrica, representando uma etapa intermediária entre os veículos convencionais e os totalmente elétricos (Kanieski *et al.*, 2023). No Brasil, também existem modelos híbridos *flex-fuel*, que podem contribuir para a redução das emissões (Nogueira, 2024).

2.5 COMBUSTÍVEIS AVALIADOS

A gasolina, derivada do petróleo, é um combustível fóssil de elevada intensidade de carbono e desempenha papel central nas emissões do setor de transportes. No Brasil, a gasolina comercial, denominada gasolina C, resulta da mistura de gasolina pura (gasolina A) com etanol anidro. Anteriormente, essa proporção era de 73% e 27%, respectivamente. Entretanto, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou a elevação obrigatória do teor de etanol anidro para 30%, em vigor a partir de agosto de 2025. Essa medida baseia-se em estudos técnicos que apontam sua viabilidade econômica e energética, além do potencial de reduzir as emissões de GEE (MME, 2025).

O etanol hidratado, produzido no Brasil principalmente a partir da cana-de-açúcar e, em menor escala, do milho, é considerado um biocombustível renovável de baixo carbono (EPE, 2025b). Isso se deve ao fato de que o cultivo da biomassa utilizada em sua produção absorve CO₂ da atmosfera durante a fotossíntese, compensando parte das emissões geradas em sua queima (Mera *et al.*, 2023). A eletricidade, embora não seja um combustível no sentido tradicional, constitui uma alternativa estratégica para a descarbonização do transporte. A matriz elétrica brasileira é composta por mais de 88,2% de fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica e solar, o que resulta em baixa intensidade de carbono (EPE, 2025a).

3. MÉTODO

Este estudo, de caráter quantitativo e exploratório, teve como objetivo avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a diferentes tecnologias de veículos leves no Brasil, considerando os combustíveis gasolina C, etanol hidratado e eletricidade. A metodologia adotada foi estruturada em etapas sequenciais que envolveram o levantamento de dados secundários em fontes oficiais, o cálculo das emissões específicas por tecnologia e combustível e a simulação de cenários de substituição da frota nacional.

O método foi fundamentado no conceito de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP) com horizonte de 100 anos, proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), o qual permite expressar diferentes gases de efeito estufa em uma métrica comum de dióxido de carbono equivalente (gCO_2eq).

3.1 COLETA E SELEÇÃO DE DADOS

Inicialmente, foram coletados os fatores de consumo de combustíveis publicados pelo Programa Nacional de Etiquetagem Veicular (PNEV) em 2025. Esse programa, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2025), divulga anualmente as taxas de consumo energético dos veículos mais comercializados no país, expressas em megajoules por quilômetro percorrido (MJ/km). A partir desses dados, estimou-se o consumo médio por tipo de veículo e, em seguida, o consumo médio da frota de veículos leves.

Em seguida, foram consultadas as intensidades de carbono da gasolina C, etanol hidratado e eletricidade, bem como a intensidade média de carbono da frota de veículos leves em 2025, conforme nota técnica publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025c). A EPE, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), utiliza em suas estimativas informações provenientes do programa RenovaBio, que reúne resultados de Análises de Ciclo de Vida (ACV) de aproximadamente 280 produtores de etanol. As intensidades de carbono (IC) são expressas em gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$).

O escopo das ACVs consideradas abrange as emissões do poço à roda (*well-to-wheel*), englobando as etapas de extração e produção da matéria-prima, processamento, transporte e distribuição dos combustíveis e da eletricidade até o consumo final. Não foram incluídas as emissões relacionadas à fabricação e ao descarte de veículos e baterias, por estarem fora do escopo deste estudo.

3.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES

3.2.1 Emissões por tecnologia veicular e tipo de combustível

A Equação 1 foi utilizada no cálculo das emissões por quilômetro percorrido, considerando a tecnologia veicular e o tipo de combustível utilizado.

$$E_c^t = C_c^t * IC_c \quad (1)$$

Onde:

E_c^t : Emissões pelo veículo com tecnologia t abastecido pelo combustível c (gCO₂eq/km);

C_c^t : Consumo médio do veículo com tecnologia t abastecido pelo combustível c (MJ/km); e

IC_c : Intensidade de carbono do combustível c (gCO₂eq/MJ).

Essa relação foi aplicada separadamente para veículos a combustão (gasolina e etanol), híbridos (gasolina e etanol) e elétricos (eletricidade). Dessa forma, foi possível identificar as emissões médias de cada categoria tecnológica para cada tipo de combustível.

3.2.2 Emissão média da frota de veículos leves

O cálculo da emissão média da frota de veículos leves por quilômetro percorrido foi realizado conforme a Equação 2.

$$E_{frota} = C_{frota} * IC_{frota} \quad (2)$$

Onde:

E_{frota} : Emissão média da frota de veículos leves (gCO₂eq/km);

C_{frota} : Consumo médio da frota de veículos leves (MJ/km); e

IC_{frota} : Intensidade de carbono da frota de veículos leves (gCO₂eq/MJ).

O valor de consumo médio foi calculado a partir dos dados do INMETRO (2025), enquanto a intensidade de carbono foi obtida da EPE (2025c). A multiplicação entre essas

duas variáveis resultou na emissão média de GEE da frota, utilizada posteriormente como valor de referência na análise dos cenários.

3.4 CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO DA FROTA

Após a obtenção das emissões médias por tecnologia e combustível, foram simulados quatro cenários de substituição da frota nacional de veículos leves, representando diferentes níveis de penetração tecnológica: 25%, 50%, 75% e 100% de substituição da frota atual. Essa variação permitiu analisar a redução progressiva das emissões em função da proporção de cada tecnologia na frota.

As emissões médias da frota de veículo leves em cada cenário foram determinadas pela Equação 3.

$$E_{cenário} = \%V_c^t * E_c^t + (1 - \%V_c^t) * E_{frota} \quad (3)$$

Onde:

$E_{cenário}$: Emissão média da frota de veículos leves em um cenário de substituição de tecnologia veicular (gCO₂eq/km);

$\%V_c^t$: Percentual dos veículos com tecnologia t usando combustível c ;

E_c^t : Emissões pelo veículo com tecnologia t usando combustível c (gCO₂eq/km); e

E_{frota} : Emissão média da frota de veículos leves (gCO₂eq/km);

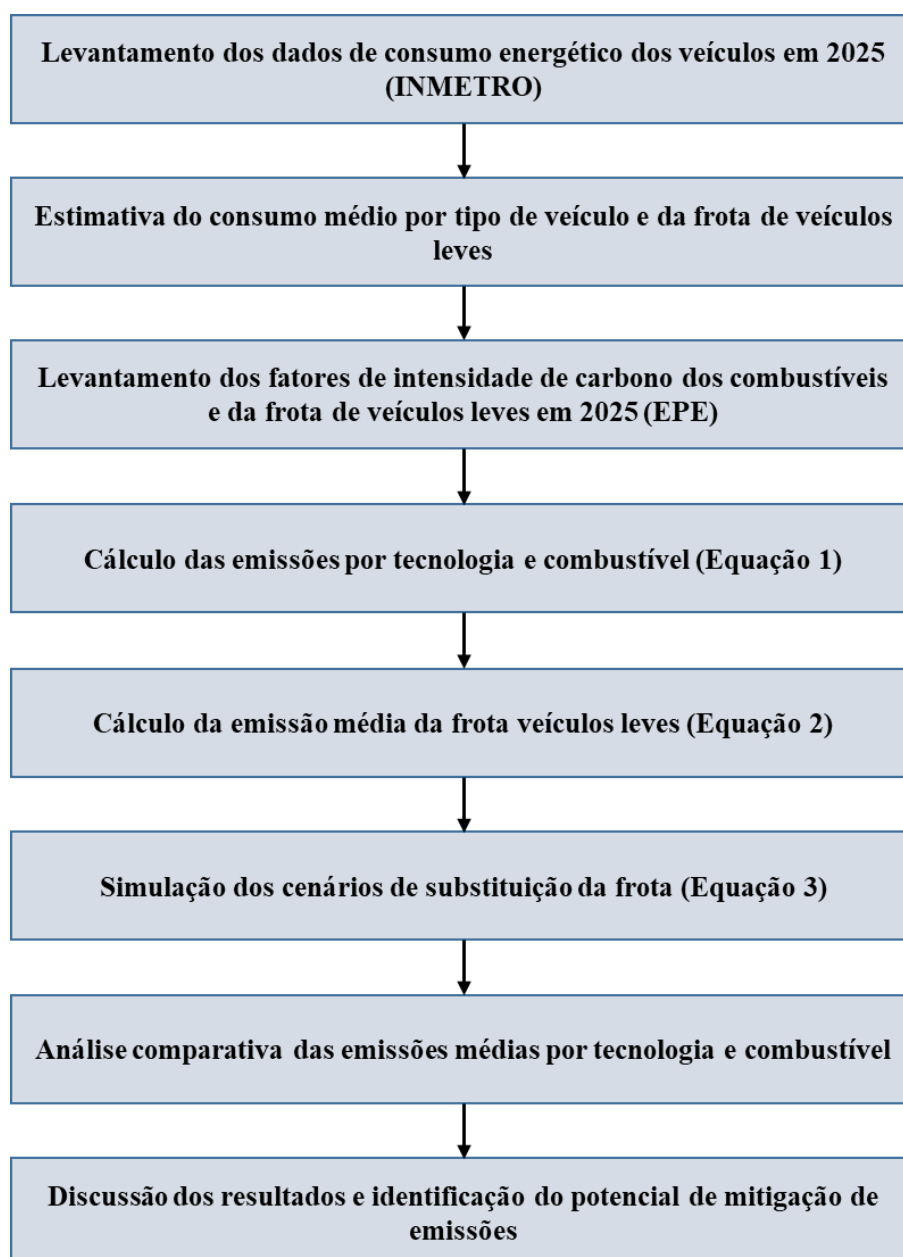
Essa abordagem possibilitou comparar a redução potencial de emissões em relação ao cenário base (frota atual) e identificar o impacto incremental da adoção de tecnologias mais limpas no transporte leve brasileiro.

3.5 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO E ANÁLISE

Os cálculos foram realizados em planilha eletrônica, aplicando-se as fórmulas e parâmetros descritos, baseando-se em um método reprodutível, que pode ser atualizado com novos fatores de eficiência e emissões conforme publicações do INMETRO e da

EPE. A Figura 1 apresenta o fluxograma que resume as principais etapas metodológicas adotadas neste estudo.

Figura 1 - Esquema do procedimento metodológico adotado:



Fonte: Autoria própria (2025).

4. RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa iniciam pela emissão média da frota nacional de veículos leves, que foi estimada em 84,99 gCO₂eq/km, e serviu como referência para comparação com os cenários de novas tecnologias. A partir desse valor, foram analisados diferentes cenários de substituição parcial ou total da frota por veículos elétricos, híbridos ou a combustão. Os resultados obtidos para cada tecnologia e tipo de combustível encontram-se sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Emissões de GEE por quilômetro rodado (gCO₂eq/km) da frota nacional decorrente da inserção de novas tecnologias de veículos usando diferentes combustíveis.

Emissões de GEE por quilômetro rodado (gCO ₂ eq/km)				
Tecnologia	Percentual da tecnologia t usando combustível c na Frota			
	25%	50%	75%	100%
Combustão G ¹	94,37	103,74	113,11	122,48
Híbrido G ²	87,55	90,11	92,66	95,22
Combustão E ³	73,09	61,18	49,28	37,37
Híbrido E ⁴	71,01	57,02	43,04	29,06
Elétrico	66,58	48,16	29,74	11,33

¹ Combustão G: refere-se a carros a combustão *flex-fuel* abastecidos com gasolina C.

² Híbrido G: refere-se a carros híbridos *flex-fuel* abastecidos com gasolina C.

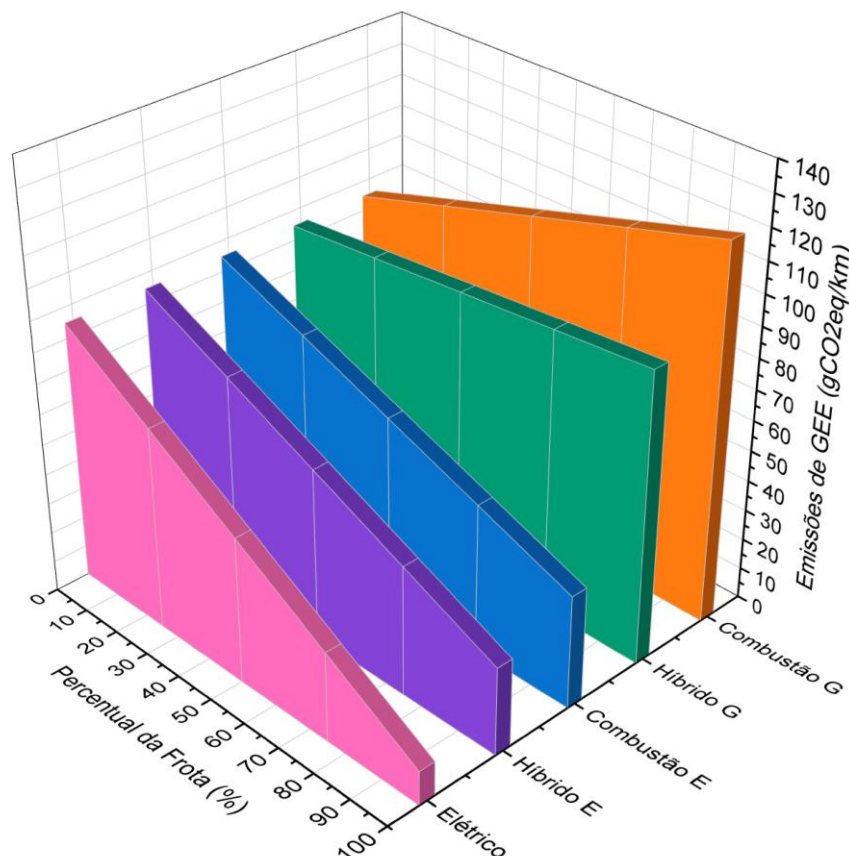
³ Combustão E: refere-se a carros a combustão *flex-fuel* abastecidos com etanol hidratado.

⁴ Híbrido E: refere-se a carros híbridos *flex-fuel* abastecidos com etanol hidratado.

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 2 apresenta de forma gráfica a redução nas emissões da frota nacional em função da inserção de novas tecnologias veiculares e utilizando diferentes combustíveis.

Figura 2 - Emissões de GEE por quilômetro rodado (gCO₂eq/km) para cada tecnologia de veículos leves usando diferentes combustíveis.



Fonte: Autoria própria (2025).

5. DISCUSSÕES

Na Tabela 1 observa-se que, caso a frota nacional fosse composta integralmente por veículos a combustão abastecidos com gasolina C, as emissões atingiriam 122,48 gCO₂eq/km. Esse valor representa o pior cenário entre as tecnologias analisadas, reforçando o papel da gasolina como combustível mais intensivo em carbono no setor de transporte.

Por outro lado, a substituição total da frota por veículos a combustão abastecidos com etanol hidratado resultaria em uma redução expressiva das emissões, alcançando 37,37 gCO₂eq/km. Isso corresponde a uma queda de aproximadamente 69% em relação à frota movida exclusivamente a gasolina e de cerca de 56% em relação ao nível médio de

emissões atual, evidenciando o potencial do etanol como alternativa de baixo carbono mesmo sem mudanças tecnológicas significativas.

Os resultados mostram ainda que os veículos híbridos apresentam desempenho intermediário. No caso dos híbridos *flex-fuel* abastecidos com gasolina C, as emissões seriam de 95,22 gCO₂eq/km, o que representa uma redução de cerca de 22% em relação aos veículos convencionais a gasolina, embora ligeiramente superior às emissões médias da frota vigente. Esse valor foi o mais discrepante em comparação à pesquisa anterior, na qual a estimativa foi de 74,40 gCO₂eq/km (Grilo Junior *et al.*, no prelo), possivelmente devido ao uso de uma base de dados distinta e à realização de menos conversões metodológicas nesta pesquisa, o que aprimorou a consistência da análise.

Em contraste, quando abastecidos com etanol hidratado, os híbridos apresentam desempenho significativamente mais favorável. Nesse caso, as emissões atingiriam 29,06 gCO₂eq/km, alcançando uma mitigação da ordem de 76% quando comparados ao cenário da frota 100% a gasolina e de 66% frente à referência da frota atual.

Por fim, os veículos elétricos apresentaram o melhor desempenho ambiental, com emissões médias de apenas 11,33 gCO₂eq/km. Isso representa uma redução de aproximadamente 91% em relação à frota movida a gasolina, de 70% em relação à frota abastecida com etanol hidratado e de cerca de 87% em comparação ao nível médio de emissões da frota vigente. Esse resultado confirma o papel estratégico da eletrificação da frota nacional como medida de longo prazo para a descarbonização do setor de transportes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo verificou que os veículos elétricos apresentam o maior potencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa da frota de veículos leves no Brasil. Contudo, apesar de seus benefícios ambientais, eles ainda figuram entre as opções mais caras do mercado nacional e demandam investimentos significativos em infraestrutura de recarga, além de melhorias na produção e distribuição de eletricidade.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Os resultados mostram que a escolha de tecnologias veiculares e combustíveis influencia diretamente as emissões do transporte leve no país. Por quilômetro rodado, os veículos elétricos exibem as menores emissões, seguidos pelos híbridos e pelos veículos a combustão movidos a etanol, enquanto os que utilizam gasolina C apresentam os maiores níveis de GEE.

Dessa forma, embora o etanol se mostre uma alternativa de menor impacto ambiental em comparação à gasolina, a eletrificação da frota representa a estratégia mais eficaz para a descarbonização do transporte leve em longo prazo. Essa transição requer políticas públicas e incentivos econômicos que estimulem a adoção de tecnologias limpas.

Em suma, a combinação de medidas de curto prazo, como a ampliação do uso de etanol e veículos híbridos, com políticas de longo prazo voltadas à eletrificação, pode acelerar significativamente a redução das emissões de CO₂ da frota nacional, contribuindo para o cumprimento de metas ambientais e para o enfrentamento dos desafios das mudanças climáticas.

Este estudo não avaliou os custos das diferentes tecnologias, o que impede uma análise do equilíbrio entre custo e redução de emissões. Assim, recomenda-se que trabalhos futuros incorporem o custo total das opções tecnológicas e considerem os investimentos necessários na modernização do sistema elétrico. Além disso, embora o estudo tenha contemplado o ciclo de vida dos combustíveis, não incluiu as emissões associadas à fabricação dos veículos, especialmente das baterias, aspecto que deve ser abordado em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

ASIM, N.; AL BIMANI, A. A.; AL SAQRI, A. S. M.; MATRIANO, M. T. **The social and environmental impact of hybrid cars.** International Journal of Research in Entrepreneurship & Business Studies, v. 1, n. 1, p. 36-47, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47259/ijrebs.114>. Disponível em: <https://gspjournals.com/ijrebs/index.php/ijrebs/article/view/2>. Acesso em: 22 set. 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

DIAS, J. M. C. de S. **O uso do etanol como combustível no brasil vai completar um século!** EMBRAPA [s.l: s.n.]. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/955037/1/Agroenergiaemrevistan.5Cabral.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2025**. 2025a.

Disponível em: [https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025)

[abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025). Acesso em: 20 set. 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Energia do Brasil: participação do etanol de milho cresce e ganha protagonismo no setor**. 2025b. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/energia-do-brasil-participacao-do-etanol-de-milho-cresce-e-ganha-protagonismo-no-setor>. Acesso em: 22 set. 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota “Técnica Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário” - Intensidade de carbono das fontes de energia**. 2025c.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-descarbonizacao-do-setor-de-transporte-rodoviario-intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia->. Acesso em: 17 ago. 2025.

GRILO JUNIOR, I.; BRANCO, J. E. H. **Avaliação das Emissões de CO₂ de Carros Elétricos, Híbridos e Combustão *Flex-Fuel* no Brasil**. Revista Gaia Scientia, no prelo.

HELMERS, E.; MARX, P. **Electric cars: technical characteristics and environmental impacts**. Environmental Sciences Europe, v. 24, p. 14, 2012. DOI:

<https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>. Disponível em:

<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14>. Acesso em: 22 set. 2025.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York:

McGraw-Hill, 1988. Disponível em:

https://www.iust.ac.ir/files/mech/ayatgh_c5664/files/internal_combustion_engines_heywood.pdf. Acesso em: 20 set. 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

IEA - International Energy Agency. **Global EV Outlook 2025 - Expanding sales in diverse markets.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 20 set. 2025.

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Entenda as emissões de gases de efeito estufa nos setores de energia e de processos industriais no Brasil em 2023.** 2024. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/entenda-as-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-no-brasil-em-2023-20241113>. Acesso em: 20 set. 2025.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia. **Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular - PBEV.** 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/mascara-pbev-2025-mar-11.pdf/view>. Acesso em: 24 jun. 2025.

IPCC - International Panel on Climate Change. **Climate change 2014: synthesis report.** In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA, editors. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: IPCC; 2014.

KANIESKI, J. M.; SANTOS, C.; NETO, M. K.; ZANIN, H. **A multidimensional assessment of electrification in automotive powertrains: technical, operational, and strategic perspectives.** SSRN, 2023. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=5288098>. Acesso em: 22 set. 2025

LOMNICKI, S.; GULLETT, B.; STÖGER, T.; KENNEDY, I.; DIAZ, J.; DUGAS, T. R.; VARNER, K.; CARLIN, D. J.; DELLINGER, B.; CORMIER, S. A. **Combustion by-products and their health effects—combustion engineering and global health in the 21st century: issues and challenges.** International Journal of Toxicology, v. 33, n. 1, p. 3-13, Jan.-Feb. 2014. DOI: 10.1177/1091581813519686. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3944372/>. Acesso em: 22 set. 2025.



LUTSEY, N.; HALL, D. **Update on electric vehicle costs in the United States through 2030**. International Council on Clean Transportation. 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publication/update-on-electric-vehicle-costs-in-the-united-states-through-2030/>. Acesso em: 20 set. 2025.

MELO, A. de S.; SAMPAIO, Y. de S. B. **Impactos dos preços da gasolina e do etanol sobre a demanda de etanol no Brasil**. Revista de Economia Contemporânea, v. 18, n. 1, p. 56–83, abr. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rec/a/GpRWHVbwJYjnjchVSdygWfb/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2025.

MERA, Z.; BIEKER, G.; REBOUÇAS, A.; CIEPLINSKI, A. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://theicct.org/publication/comparacao-das-emissoes-de-gee-ao-longo-do-ciclo-de-vida-de-motores-de-combustao-flex-e-eletricos-veiculos-de-passageiros-brasil-oct23/>. Acesso em: 22 set. 2025.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Brasil avança na autossuficiência de combustíveis com aprovação do E30 e B15**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-avanca-na-autossuficiencia-de-combustiveis-com-aprovacao-do-e30-e-b15>. Acesso em: 22 set. 2025.

NOGUEIRA, L. A. H. **Em vez de elétricos puros, veículos híbridos com biocombustíveis são o futuro, diz especialista**. Agência FAPESP, São Paulo, 22 dez. 2024. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/em-vez-de-eletricos-puros-veiculos-hibridos-com-biocombustiveis-sao-o-futuro-diz-especialista/53423>. Acesso em: 22 set. 2025.

OLIVEIRA, M. B. de; SILVA, H. M. R. da; JUGEND, D.; FIORINI, P. de C.; PARO, C. E. **Factors influencing the intention to use electric cars in Brazil**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 155, p. 418-433, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.018>. Disponível em:



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856421003037>. Acesso em: 22 set. 2025.

SHU, X.; GUO, Y.; YANG, W.; WEI, K.; ZHU, G. **Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars.** Energy Reports, v. 7, p. 2302-2315, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.038>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002547>. Acesso em: 22 set. 2025.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Paris Agreement.** [s.l.] United Nations, 12 dez. 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 20 set. 2025.

WWF - World Wildlife Fund. **Efeito Estufa e Mudanças Climáticas.** 2021. Disponível em: https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/conceitos_/efeitoestufa_e_mudancasclimaticas/. Acesso em: 20 set. 2025.