



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n22025p230-252

Submetido em: 30 jul. 2025

Aceito em: 12 nov. 2025

.....

Rotas tecnológicas para descarbonização dos veículos pesados: perspectivas e desafios

Technological routes for decarbonization of heavy vehicles: perspectives and challenges

Vías tecnológicas para la descarbonización de vehículos pesados: perspectivas y desafíos

Luciara Queiroz  <https://orcid.org/0009-0004-5113-8795>

Instituto Federal Fluminense

Mestranda em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense.

E-mail: lqueiroz4@slb.com

Vicente de Paulo Santos de Oliveira  <https://orcid.org/0000-0002-5981-0345>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

E-mail: vicentepsoliveira@gmail.com

Luiz de Pinedo Quinto Junior  <https://orcid.org/0000-0002-0608-2524>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo. Professor Titular do Instituto Federal Fluminense.

E-mail: apinto@iff.edu.br

Resumo: O presente artigo examina as principais rotas tecnológicas voltadas à descarbonização do transporte rodoviário de carga pesada no Brasil, setor considerado de difícil mitigação devido à sua elevada dependência de combustíveis fósseis e à complexidade logística. A partir de uma revisão narrativa da literatura, são analisadas alternativas energéticas como biodiesel, biometano, gás natural veicular, diesel verde, hidrogênio e eletrificação, avaliando seus potenciais de mitigação, desafios técnicos e viabilidade econômica. O estudo também discute o papel estratégico do Brasil, que possui políticas públicas consolidadas, como o RenovaBio, o Programa Nacional de Diesel Verde e a Lei do Combustível do Futuro. A análise evidencia que a transição energética no transporte pesado requer uma abordagem multi tecnológica, adaptada às realidades regionais e apoiada por incentivos regulatórios, inovação tecnológica e infraestrutura adequada. Conclui-se que o sucesso dessa transição depende da articulação entre governo, setor produtivo e academia, visando à construção de um sistema de mobilidade mais limpo, resiliente e justo.

Palavras-chave: Descarbonização; Transporte Pesado; Políticas Públicas.

Abstract: This article explores the main technological pathways aimed at decarbonizing heavy-duty road freight transport in Brazil, a sector considered hard to abate due to its high dependence on fossil fuels and complex logistics. Through a narrative literature review, the study analyzes alternative energy sources such as biodiesel, biomethane, compressed natural gas, renewable diesel, hydrogen, and electrification, assessing their mitigation potential, technical challenges, and economic feasibility. It also examines Brazil's strategic position, given its well-established public policies, including RenovaBio, the National Renewable Diesel Program, and the Future Fuel Law. The findings highlight that a successful energy transition in this sector requires a multi-technological

approach, tailored to regional realities and supported by regulatory incentives, technological innovation, and adequate infrastructure. The article concludes that coordinated action among government, industry, and academia is essential to build a cleaner, more resilient, and equitable mobility system.

Keywords: Decarbonization; Heavy-Duty Vehicle; Public Policies.

Resumen: El presente artículo examina las principales rutas tecnológicas dirigidas a la descarbonización del transporte de carga pesada por carretera en Brasil, sector considerado de difícil mitigación debido a su elevada dependencia de combustibles fósiles y a la complejidad logística. A partir de una revisión narrativa de la literatura, se analizan alternativas energéticas como biodiésel, biometano, gas natural vehicular, diésel verde, hidrógeno y electrificación, evaluando sus potenciales de mitigación, desafíos técnicos y viabilidad económica. El estudio también discute el papel estratégico de Brasil, que tiene políticas públicas consolidadas, como RenovaBio, el Programa Nacional de Diésel Verde y la Ley del Futuro Combustible. El análisis evidencia que la transición energética en el transporte pesado requiere un enfoque multi tecnológico, adaptado a las realidades regionales y apoyado por incentivos regulatorios, innovación tecnológica e infraestructura adecuada. Se concluye que el éxito de esta transición depende de la articulación entre gobierno, sector productivo y academia, con miras a la construcción de un sistema de movilidad más limpia, resiliente y justo.

Palabras clave: Descarbonización; Vehículos pesados; Políticas públicas.

1. Introdução

Dados recentes do painel climático do ResourceWatch (2025) indicam como o aumento contínuo das emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), tem impulsionado um aquecimento global sem precedentes em termos de velocidade e escala. Esse fenômeno está alterando padrões climáticos, elevando o nível do mar e intensificando eventos extremos, como secas, enchentes e ondas de calor. Diante da magnitude e da urgência da crise climática, torna-se imperativo adotar soluções imediatas e de amplo alcance. Isso inclui a transição para fontes de energia renovável, a implementação de políticas públicas eficazes de mitigação e adaptação, e a cooperação internacional para reduzir as emissões globais.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são comumente expressas em termos de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{e}}$), uma métrica padronizada que permite comparar o impacto climático de diferentes gases com base no potencial de aquecimento global do CO_2 , o principal responsável pelo aquecimento do planeta. Conforme Quadro 1, além do dióxido de carbono, fazem parte outros gases com elevado potencial de retenção de calor na atmosfera, como o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os hidrofluorcarbonetos (HFCs) e os perfluorcarbonetos (PFCs) segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023b).

Quadro 1. Potencial de Aquecimento Global (100 anos) - IPCC AR6.

Gás	GWP - 100
Dióxido de carbono (CO_2)	1
Metano (CH_4)	27,2
Óxido nitroso (N_2O)	237
Hexafluoreto de enxofre (SF_6)	25.200
Hidrofluorcarbonetos (HFCs)	124 a 14.800 (varia por composto)
Perfluorcarbonetos (PFCs)	6.630 a 11.100 (varia por composto)

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Segundo informações do ResourceWatch (2025), as emissões de GEE estão diretamente associadas a atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e as queimadas. Esses processos liberam para a atmosfera o carbono anteriormente armazenado em fontes naturais como o carvão mineral, o petróleo, o gás natural e a vegetação. Essa liberação intensifica o efeito estufa natural, contribuindo significativamente para o aquecimento global.

Desde o início da Revolução Industrial, as atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, provocaram um aumento substancial nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. Esse acúmulo tem alterado o balanço energético do planeta, intensificando o aquecimento global. Com o crescimento populacional e a crescente demanda por energia e recursos naturais, as projeções indicam que as emissões continuarão a aumentar, a menos que sejam adotadas ações globais ambiciosas e imediatas de mitigação (IPCC, 2023b).

De acordo com IPCC (2023b), a mitigação das emissões de GEE no setor industrial exige ações integradas ao longo de toda a cadeia de valor. Para isso, é necessário implementar uma variedade de estratégias, incluindo a gestão eficiente das aquisições, o aprimoramento da eficiência energética e do uso de materiais, a promoção da circularidade nos fluxos de materiais, a adoção de tecnologias de baixo carbono e a reestruturação dos processos produtivos.

Dados do Our World in Data (2025) comprovam que a ação climática tem se consolidado como uma prioridade crescente na agenda internacional, refletindo a preocupação global com os impactos das mudanças climáticas.

Conforme estabelecido pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (2025), os países signatários do Acordo de Paris comprometeram-se a alcançar emissões líquidas zero até o ano de 2050.

O Protocolo GHG, desenvolvido conjuntamente pelo World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), constitui a principal norma metodológica internacional para a quantificação, categorização e reporte padronizado das emissões de GEE (WRI; WBCSD, 2004).

Segundo o Programa Brasileiro GHG Protocol (2023), as emissões de GEE são classificadas em três escopos operacionais. O Escopo 1 abrange as emissões diretas provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização, como a queima de combustíveis em caldeiras ou veículos próprios. O Escopo 2 refere-se às emissões indiretas associadas à geração de eletricidade, calor ou vapor adquiridos e consumidos pela organização. Já o Escopo 3 compreende outras emissões indiretas que ocorrem na cadeia de valor, incluindo atividades como transporte de insumos, uso de produtos vendidos, viagens a trabalho e disposição de resíduos.

A neutralidade de carbono é atingida quando uma organização ou atividade equilibra suas emissões de GEE com a remoção equivalente desses gases da atmosfera, seja por meio da redução direta das emissões ou pela compensação com créditos de carbono. Esses créditos estão frequentemente associados a projetos ambientais, como reflorestamento ou tecnologias de captura de carbono. O conceito de net zero implica um compromisso corporativo abrangente com a neutralização das emissões de GEE ao longo de toda a cadeia de valor, abrangendo os escopos 1, 2 e 3 (Exame, 2023).

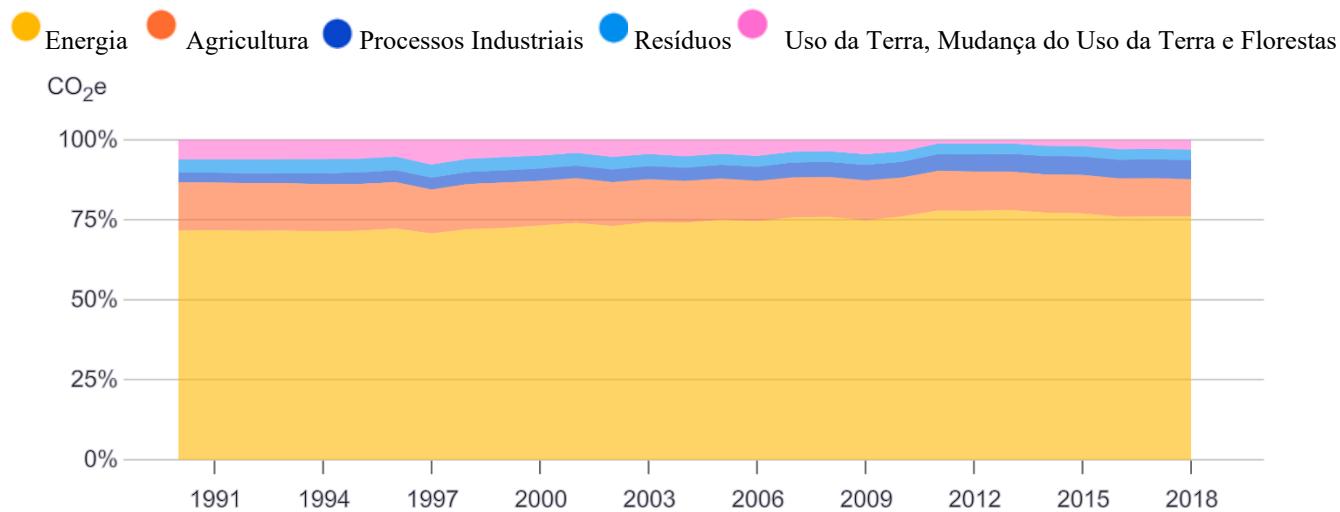
De acordo com as diretrizes metodológicas do GHG *Protocol*, essa abordagem requer a quantificação precisa das emissões diretas e indiretas, bem como o estabelecimento de metas de redução baseadas na ciência, em conformidade com os limites de aquecimento global definidos pelo Acordo de Paris, especialmente a meta de 1,5 °C (WRI; WBCSD, 2004).

Já o conceito de *net zero* representa um compromisso mais amplo e rigoroso, que exige a eliminação de emissões em toda a cadeia de valor (Escopos 1, 2 e 3), com metas baseadas na ciência e alinhadas ao Acordo de Paris, visando limitar o aquecimento global a 1,5° (Exame, 2023).

Em 2024, o planeta registrou temperaturas globais sem precedentes, superando os recordes já elevados de 2023. Pela primeira vez, a temperatura média anual ultrapassou de forma clara o limite de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, um marco estabelecido pelo Acordo de Paris para conter os riscos e impactos das mudanças climáticas (Copernicus, 2025).

De acordo com a Figura 1, o setor energético é o principal responsável pelas emissões globais de GEE. Dentro deste setor, destacam-se como principais fontes emissoras a geração de eletricidade e calor, seguidas pelo transporte e pelas atividades da indústria de transformação.

Figura 1. Participação dos Setores nas Emissões de GEE do Planeta



Fonte: Adaptado pela autora de CLIMATEWATCH (2025)

Segundo o Relatório de Síntese do IPCC (2023b), observou-se uma desaceleração no crescimento médio anual das emissões de GEE entre 2010 e 2019 em setores como o de fornecimento de energia, que

passou de 2,3% para 1,0%, e o industrial, cuja taxa caiu de 3,4% para 1,4%. No entanto, o setor de transportes manteve um crescimento estável em torno de 2% ao ano. Para mitigar as emissões de CO₂ nesse setor, tecnologias como biocombustíveis sustentáveis, hidrogênio de baixa emissão e seus derivados, incluindo amônia e combustíveis sintéticos, apresentam potencial significativo, especialmente no transporte marítimo, aéreo e de carga pesada terrestre. Contudo, sua viabilidade depende de avanços na produção e redução de custos. No curto e médio prazo, os biocombustíveis sustentáveis podem contribuir para a redução de emissões no transporte terrestre, com um nível moderado de confiança. Além disso, veículos elétricos alimentados por eletricidade de baixa emissão de GEE demonstram elevado potencial de mitigação, considerando todo o seu ciclo de vida. O progresso nas tecnologias de baterias também pode viabilizar a eletrificação de caminhões pesados, complementando os sistemas ferroviários elétricos já existentes.

O objetivo deste artigo é analisar as principais alternativas tecnológicas e políticas públicas voltadas à descarbonização do transporte rodoviário de carga pesada no Brasil. A pesquisa busca compreender os desafios e oportunidades da transição energética neste setor, considerado de difícil mitigação, por meio de uma revisão narrativa da literatura.

2. Revisão Teórica

As emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) constituem o principal fator responsável pelas mudanças climáticas globais. Dados do WRI (2025) indicam que essas emissões estão fortemente concentradas em um número reduzido de países: aproximadamente 60% do total global é gerado por apenas dez nações. Em contraste, os 100 países com menores níveis de emissão respondem, em conjunto, por menos de 3% das emissões globais. Essa disparidade evidencia a desigualdade na contribuição para o aquecimento global e ressalta a importância de estratégias diferenciadas de mitigação, considerando as responsabilidades históricas e as capacidades nacionais.

Segundo dados do Observatório do Clima (2024), o Brasil figura como o sexto maior emissor de gases de efeito estufa (GEE) no cenário global, posicionando-se atrás da China, Estados Unidos, Índia, União Europeia e Rússia.

O Brasil apresenta elevada vulnerabilidade frente aos impactos das mudanças climáticas, especialmente entre as populações em situação de maior fragilidade socioeconômica, conforme dados do Climate Watch (2025). Esses grupos enfrentam riscos desproporcionais decorrentes de fenômenos climáticos extremos, como elevação do nível do mar, aumento das temperaturas médias e padrões de precipitação cada vez mais irregulares. Tais alterações têm resultado em eventos mais frequentes e intensos, como enchentes, secas prolongadas e tempestades severas. A exposição acentuada a esses riscos, aliada à limitada capacidade de resposta e à escassez de recursos, compromete a habilidade dessas comunidades de se adaptarem de forma eficaz, tornando-as menos resilientes aos efeitos adversos do clima. Nesse contexto, a promoção da inclusão

dessas populações nos processos de planejamento e implementação de políticas de adaptação climática é fundamental. Além disso, a destinação de uma parcela mais significativa do financiamento climático diretamente às comunidades locais pode fortalecer sua capacidade adaptativa, contribuindo simultaneamente para a construção da resiliência climática e para a redução das desigualdades sociais.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2025b), com base nos dados do Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024, a média de emissões per capita de GEE no Brasil, associadas à produção e ao consumo de energia, foi de aproximadamente 2,0 toneladas de CO₂ equivalente por habitante.

Em comparação internacional, dados da Agência Internacional de Energia (IEA) em 2022 indicam que esse valor corresponde a cerca de 14,5% das emissões per capita de um cidadão dos Estados Unidos, 37,3% das de um cidadão europeu pertencente à OCDE e 26,7% das emissões médias de um cidadão chinês (IEA, 2022).

De acordo com a proposta atualizada de meta climática elaborada pelo Observatório do Clima (2024a), o Brasil deverá reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa em, no mínimo, 92% até o ano de 2035, tomando como referência os níveis de 2005. Essa meta é considerada essencial para que o país contribua de forma compatível com o objetivo do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a 1,5 °C. Para atingir esse patamar, as emissões líquidas brasileiras precisam ser restringidas a cerca de 200 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

2.1 A Matriz Energética e Metas de Descarbonização do Setor de Transportes no Brasil

Conforme o Observatório do Clima (2024b), o setor de transportes no Brasil desempenha um papel significativo nas emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por aproximadamente 50% das emissões associadas à matriz energética. Esse dado evidencia a forte dependência do transporte de cargas no país do modal rodoviário, predominantemente abastecido por combustíveis fósseis derivados do petróleo.

De acordo com a EPE (2025b), as emissões antrópicas totais vinculadas à matriz energética brasileira somaram 431,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂e). Dentre os setores analisados, o de transportes foi o principal responsável, contribuindo com 214,3 Mt CO₂e. Esse setor também se destacou como o maior consumidor de energia no país, respondendo por 69,9% do consumo total de óleo diesel de origem fóssil.

O transporte rodoviário de carga no Brasil consolidou-se historicamente com base no uso predominante do óleo diesel como principal fonte de energia. Essa consolidação resultou em um ecossistema técnico e econômico altamente otimizado, no qual os veículos movidos a diesel apresentam elevado desempenho operacional, baixo custo de operação, manutenção simplificada, alta confiabilidade e valorização no mercado de revenda ao longo de sua vida útil. A ampla difusão dessa tecnologia ao longo do tempo contribuiu para o

estabelecimento de uma cadeia logística e produtiva eficiente em termos de custos, o que representa um obstáculo à adoção de combustíveis alternativos (EPE, 2023).

Apesar dos avanços regulatórios e dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, os impactos ambientais associados ao uso intensivo do diesel ainda são relevantes. Esse cenário reforça a urgência de políticas públicas que incentivem a diversificação da matriz energética no setor de transportes, como previsto em programas como o Programa Nacional de Diesel Verde, que visam promover alternativas sustentáveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2024c).

O Brasil apresenta uma configuração energética singular, caracterizada por uma matriz com elevada participação de fontes renováveis e de baixo carbono, coexistindo com o uso de petróleo. Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), os biocombustíveis desempenham um papel relevante, especialmente no setor de mobilidade, contribuindo de forma significativa para o suprimento energético nacional, com uma participação estimada em 16,7% da matriz total (IBP, 2024).

Conforme o Relatório Síntese da Empresa de Pesquisa Energética referente ao ano-base de 2024, a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira manteve-se elevada, impulsionada pela estabilidade na oferta de energia hidráulica, pela expansão de outras fontes renováveis, com destaque para o licor preto e o biodiesel, e pelo crescimento expressivo da geração eólica e solar fotovoltaica. Esses avanços permitiram que o índice de renovabilidade da matriz energética nacional alcançasse 50%, valor significativamente superior à média global e à observada nos países da OCDE, onde essa participação permanece abaixo de 20% (EPE, 2025b).

De acordo com a IEA (2024), projeta-se que a demanda global por biocombustíveis sustentáveis apresente um crescimento expressivo até 2030, mais do que triplicando em relação aos níveis observados em 2021. Esse aumento será impulsionado por todos os segmentos do setor de transportes, incluindo veículos leves, transporte rodoviário de carga, aviação e navegação marítima, refletindo o papel estratégico dos biocombustíveis na transição energética rumo à neutralidade de emissões até 2050.

No contexto brasileiro, o óleo diesel representa a principal fonte de emissões de dióxido de carbono (CO_2) no setor de transportes, sendo responsável por aproximadamente 49% do total emitido. Em seguida, destacam-se a gasolina, com 33% das emissões, e o etanol, que contribui com cerca de 14%. Já o biodiesel e o gás natural veicular (GNV) apresentam participações significativamente menores, ambos com cerca de 2% das emissões. Esses dados evidenciam a predominância do diesel na matriz energética do transporte nacional e reforçam a necessidade de estratégias voltadas à diversificação de combustíveis e à redução das emissões associadas ao setor (BRASIL, 2024d).

Em 2024, o setor de transportes no Brasil registrou um crescimento de 2,7% no consumo total de energia em comparação ao ano anterior. Esse aumento foi impulsionado, principalmente, pela elevação significativa no uso de combustíveis renováveis, com destaque para o biodiesel, cujo consumo cresceu 19,3%, e para o etanol hidratado, que apresentou um aumento expressivo de 30,1%. Como resultado, a participação

de fontes renováveis na matriz energética do setor atingiu 25,7%, refletindo um avanço relevante na direção da descarbonização do transporte nacional (EPE,2025b).

2.2 Os Tipos De Combustível e Suas Emissões

As emissões provenientes da queima de combustíveis de acordo com Heywood (2018) são: Óxidos de Nitrogênio (NOx), principalmente em função das elevadas temperaturas atingidas durante a combustão nos motores. Tais poluentes são reconhecidos por seus efeitos nocivos à saúde humana e por sua contribuição significativa para a poluição atmosférica e a formação de chuva ácida. Material Particulado (MP), partículas sólidas ou líquidas em suspensão, resultantes da combustão incompleta de combustíveis, especialmente em motores a diesel. Monóxido de Carbono (CO), gás incolor, inodoro e altamente tóxico, formado quando a combustão do combustível ocorre de maneira incompleta, geralmente por falta de oxigênio suficiente. Hidrocarbonetos Não Queimados (HC), poluentes que participam de reações fotoquímicas na atmosfera, contribuindo para a formação de ozônio troposférico e de *smog* fotoquímico, ambos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Os dados da Tabela 1 refletem o perfil energético no Brasil em 2025, com destaque para o óleo diesel, amplamente utilizado no transporte de cargas e na agricultura, seguido pela gasolina C e pelo etanol hidratado, ambos predominantes no setor de transporte leve (ANP, 2025b).

Tabela 1: Combustíveis mais usados no Brasil em 2025

Combustível	Volume (bilhões de litros)
Óleo Diesel	72,0
Gasolina C	44,2
Etanol Hidratado	17,0
GLP (Gás de cozinha)	14,0
QVA (Querosene de aviação)	6,5
Óleo Combustível	3,8
Gás Natural	2,5

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

2.2.1 Óleo diesel

O óleo diesel, derivado do refino do petróleo bruto, é amplamente empregado em motores de combustão interna por ignição por compressão, destacando-se por sua elevada densidade energética e eficiência operacional. Sua composição é majoritariamente formada por hidrocarbonetos com cadeias carbônicas entre 8 e 16 átomos, podendo conter, em menores proporções, elementos como nitrogênio, enxofre e oxigênio. A formulação do diesel resulta da combinação de diferentes frações obtidas nas etapas de processamento do petróleo, incluindo gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado. No contexto da adição de biocombustíveis, o diesel é classificado em duas categorias principais (Kouketsu, 2024): diesel A, composto exclusivamente por derivados do refino de petróleo e do processamento de gás natural, sem adição de

biodiesel; diesel B, que incorpora biodiesel ao diesel A, conforme os percentuais estabelecidos pela legislação vigente.

2.2.2 GNV

De acordo com a EPE (2025b), o gás natural desempenha um papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono, sendo considerado uma fonte energética intermediária. Trata-se de um combustível fóssil que, embora não isento de emissões, apresenta menor intensidade de carbono em comparação a outras fontes convencionais, como o carvão mineral e o óleo combustível. Conforme destacado pelo Ministério de Minas e Energia, no Relatório do Grupo de Trabalho do Programa Gás para Empregar (2024d), a utilização do gás natural pode gerar impactos positivos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas, onde a melhoria da qualidade do ar é particularmente relevante.

Segundo Couto (2025), o projeto Corredores Sustentáveis integra uma iniciativa de alcance global, com origem na Europa e adesão em países como China e Estados Unidos, que visa promover o uso do GNV como alternativa de transição energética para o transporte rodoviário de carga pesada. A proposta busca estruturar rotas logísticas sustentáveis, nas quais o GNV desempenha papel estratégico na redução das emissões do setor.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, observa-se um crescimento expressivo no licenciamento de veículos pesados movidos a gás natural no Brasil. No entanto, a expansão dessa alternativa energética ainda enfrenta limitações estruturais, especialmente no que se refere à disponibilidade de infraestrutura de abastecimento. Nesse contexto, a adoção do gás natural tem sido viabilizada, em parte, pela implementação dos chamados “corredores azuis”, rotas específicas com pontos de abastecimento, e pelo potencial de utilização do biometano como combustível complementar e sustentável (EPE, 2024).

Conforme Couto (2025), o estado do Rio de Janeiro já conta com nove postos de abastecimento de GNV adaptados para atender caminhões pesados. Essa infraestrutura encontra-se em processo de expansão, especialmente ao longo das principais rodovias que conectam o estado aos vizinhos São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, com o objetivo de viabilizar a ampliação do uso do GNV no transporte de cargas.

2.2.3 Biocombustíveis

De acordo com a SAE4Mobility (2022), no contexto do cenário de emissões líquidas zero até 2050, os biocombustíveis sustentáveis desempenham um papel estratégico na mitigação das emissões de GEE no setor de transportes. Sua contribuição é considerada essencial para viabilizar a transição energética e alcançar as metas globais de descarbonização da mobilidade. O Brasil ocupa a segunda posição entre os maiores produtores globais de biocombustíveis, sendo responsável por suprir aproximadamente 22% da demanda energética do setor de transportes em 2022. A incorporação dos biocombustíveis à matriz energética nacional

constitui um elemento central da política de longo prazo do país, sustentada por um conjunto de instrumentos regulatórios e econômicos, como mandatos obrigatórios, incentivos financeiros, normas veiculares e critérios de sustentabilidade, que têm impulsionado tanto a oferta quanto o consumo desses combustíveis (EPE, 2023).

2.2.4. Diesel verde, drop-in

Segundo a SAE4Mobility (2022), os biocombustíveis do tipo drop-in apresentam propriedades físico-químicas semelhantes às dos combustíveis fósseis, o que permite sua utilização direta em veículos e na infraestrutura existente, sem necessidade de adaptações. Essa compatibilidade operacional os torna uma alternativa promissora para a descarbonização do setor de transportes. Entre esses combustíveis, destaca-se o diesel verde, especialmente o HVO (óleo vegetal hidrogenado), que pode ser produzido a partir de óleos vegetais como soja e palma ou de gorduras animais. O HVO oferece vantagens como maior estabilidade no armazenamento, bom desempenho em baixas temperaturas e total compatibilidade com motores a diesel convencionais.

2.2.5 Biodiesel

Brunetti (2012) aponta que o uso de biodiesel em motores de combustão interna contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono e material particulado, quando comparado ao diesel convencional. No entanto, devido às particularidades químicas e de combustão do biodiesel, há um leve aumento na emissão de óxidos de nitrogênio, o que representa um desafio técnico para sua adoção em larga escala. O biodiesel tem se consolidado como uma alternativa estratégica ao diesel de origem fóssil, especialmente no contexto da redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) no setor de transportes comerciais. No Brasil, sua utilização ocorre predominantemente como aditivo ao óleo diesel em veículos pesados, utilitários e picapes movidos a motores diesel. Desde 2005, a adição de biodiesel ao diesel convencional tornou-se obrigatória por meio de legislação específica, iniciando com uma proporção de 2% e sendo gradualmente ampliada ao longo dos anos (ANP, 2025a).

O consumo de biocombustíveis no Brasil tem sido impulsionado por políticas públicas que determinam a adição obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil, conforme diretrizes estabelecidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Este órgão, que assessorava diretamente a Presidência da República e é presidido pelo Ministro de Minas e Energia, desempenha papel central na formulação das políticas energéticas nacionais (EPE, 2025).

Em decisão recente do CNPE, datada de 25 de junho de 2025, foi aprovada a elevação da mistura obrigatória de biodiesel no diesel de 14% para 15%, denominada B15. Essa medida, com implementação prevista para 1º de agosto de 2025, representa um avanço significativo na busca pela autossuficiência energética nacional e pela redução dos custos dos combustíveis, além de reforçar o compromisso do país com a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas (BRASIL, 2025).

2.2.6 Biometano

O biometano, obtido a partir da purificação do biogás gerado pela decomposição de resíduos orgânicos, configura-se como um vetor energético estratégico para a mobilidade sustentável. Sua produção contribui para a economia circular ao transformar rejeitos urbanos e agroindustriais em combustível renovável, mitigando impactos ambientais e promovendo o uso eficiente de recursos. A aplicação do biometano em motores de ciclo Diesel, especialmente no transporte de carga e passageiros, é viabilizada por sua elevada taxa de compressão e desempenho energético, favorecendo a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essa solução já é consolidada em países europeus e, no Brasil, vem sendo impulsionada por políticas públicas como a Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024), que estimula a substituição de combustíveis fósseis e fortalece a infraestrutura para biocombustíveis avançado (BRASIL, 2024a).

2.2.7 Hidrogênio (H₂)

Com base no relatório *The Future of Hydrogen da International Energy Agency* da IEA, a trajetória do hidrogênio como vetor energético remonta há mais de dois séculos, evidenciando sua longa associação com o desenvolvimento tecnológico no setor energético. Os primeiros experimentos com eletrólise da água ocorreram ainda no século XVIII, e os motores de combustão interna pioneiros já utilizavam hidrogênio como combustível. Ao longo da história, esse elemento teve papel central em marcos importantes, como o uso em dirigíveis e nas missões espaciais, incluindo a chegada do homem à Lua. Sua abundância na natureza, aliada às propriedades como leveza, densidade energética e ausência de emissões diretas de poluentes, reforça seu potencial estratégico para a transição energética global (IEA, 2019).

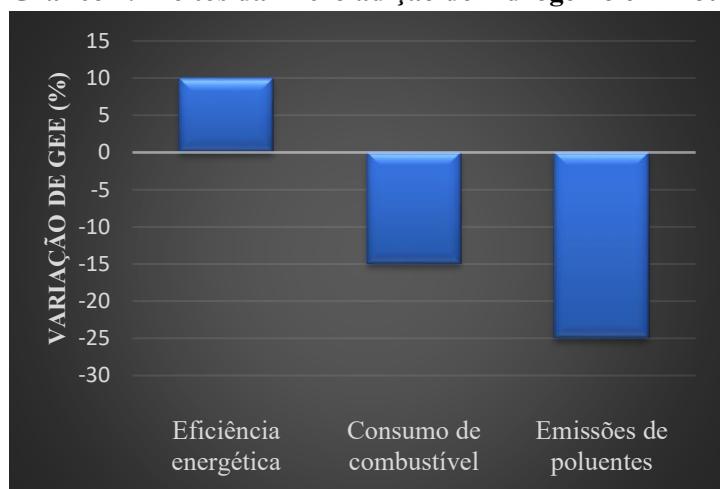
De acordo com Mendes (2024), o hidrogênio desempenha um papel estratégico na transição energética rumo à neutralidade de carbono, destacando-se por sua elevada flexibilidade e pela compatibilidade com processos industriais já consolidados.

A utilização conjunta de hidrogênio com combustíveis fósseis convencionais, como o diesel, configura-se como uma estratégia de transição viável para a mitigação das emissões de carbono nos setores industriais de difícil mitigação. Essa abordagem permite avanços na descarbonização sem exigir modificações estruturais significativas, ao mesmo tempo em que aproveita a infraestrutura energética já instalada. Dessa forma, a coqueima representa uma solução intermediária eficaz, conciliando ganhos ambientais com viabilidade técnica e econômica no curto e médio prazo (Franco, 2023). O hidrogênio apresenta-se como uma alternativa promissora para aplicação em motores de combustão interna e em células a combustível, devido à sua capacidade de contribuir significativamente para a mitigação das emissões de gases poluentes. Sua utilização como combustível pode viabilizar avanços importantes na redução do impacto ambiental associado ao setor de transportes, especialmente quando empregado em substituição parcial ou total ao diesel fóssil em motores de ignição por compressão (Kouketsu, 2024).

Resultados de simulações envolvendo diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar- combustível indicam que sua introdução modifica de forma significativa o comportamento operacional de motores de combustão interna do ciclo Diesel. Embora a adição de hidrogênio traga benefícios notáveis em termos de eficiência energética e redução de determinados poluentes, ela também impõe novos desafios técnicos que precisam ser cuidadosamente avaliados e gerenciados para garantir a estabilidade e a segurança do sistema de propulsão (Franco, 2023).

A introdução controlada de pequenas quantidades de hidrogênio diretamente no motor a diesel, conforme demonstrado por Ayad et al. (2024), representa uma abordagem tecnicamente viável para melhorar a eficiência da combustão. Essa estratégia, conhecida como micro adição de hidrogênio, mostrou-se eficaz na redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes, sem comprometer o desempenho do motor. Os resultados obtidos demonstram aumento de eficiência energética que reforçam o potencial dessa tecnologia como solução sustentável para o setor de transportes, especialmente em aplicações que visam à transição energética e à descarbonização.

Gráfico 1. Efeitos da micro adição de hidrogênio em motores a diesel



Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Segundo Franco (2023), a introdução gradual de hidrogênio como aditivo em motores a diesel representa uma estratégia tecnicamente viável para aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de poluentes. Essa abordagem favorece uma transição energética mais fluida, permitindo que setores industriais de difícil descarbonização aproveitem suas infraestruturas e equipamentos já existentes, ao mesmo tempo em que incorporam progressivamente maiores proporções de hidrogênio às suas matrizes de combustíveis.

2.3 Rotas de descarbonização dos Veículos Pesados no Transporte, setor Hard-to-abate

Os setores classificados como de difícil mitigação apresentam desafios estruturais significativos para a redução de emissões de gases de efeito estufa, principalmente devido à sua forte dependência de combustíveis fósseis e à intensidade de carbono de seus processos produtivos. Segundo Mäkitie e Steen (2023),

essas indústrias exigem abordagens específicas e soluções tecnológicas avançadas, uma vez que estratégias convencionais de descarbonização não são facilmente aplicáveis.

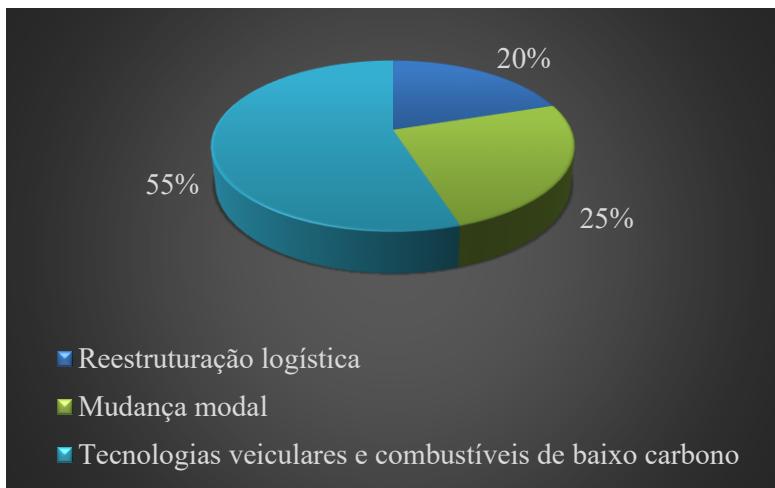
Modalidades como o transporte rodoviário de cargas, a aviação e a navegação são reconhecidas como setores de difícil descarbonização devido à sua elevada demanda por combustíveis com alta densidade energética, essenciais para atender aos requisitos operacionais de longo alcance e carga pesada. Conforme destaca o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2025), a longevidade das frotas nesses segmentos representa um desafio adicional, dificultando a substituição rápida por tecnologias de baixa emissão. Isso torna a transição energética nesses setores um processo mais complexo, que exige soluções específicas e de longo prazo.

Um dos principais questionamentos no contexto da transição energética, tanto sob a ótica das políticas públicas quanto da indústria, refere-se à extensão em que será necessário desenvolver soluções completamente novas, ou se é possível promover a descarbonização por meio da adaptação e reaproveitamento de infraestruturas, conhecimentos técnicos, capacidades produtivas e demais recursos já existentes. A magnitude dessa transformação varia conforme o tipo de tecnologia energética adotada e as especificidades industriais dos setores envolvidos ao longo da cadeia de valor. Por exemplo, a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis tende a demandar mudanças mais significativas nas etapas de produção e distribuição, enquanto os ajustes necessários nos segmentos de uso final, como o transporte, podem ser relativamente limitados (Mäkitie e Steen, 2023).

De acordo com a *Energy Transition Commission* (2018), os custos associados à redução de emissões nos modais transporte de cargas pesadas, a aviação e transporte marítimo são significativamente mais altos quando comparados a setores onde já existem alternativas tecnológicas maduras e economicamente viáveis, o que torna a transição para práticas de baixo carbono mais lenta e tecnicamente exigente.

A redução das emissões de GEE no transporte rodoviário de cargas pesadas depende de ações estratégicas em três áreas principais, conforme apontado por *Inkinen e Hamalainen* (2020). A primeira envolve a reorganização da logística, priorizando a eficiência no planejamento de rotas e na gestão do fluxo de veículos. A segunda propõe a diversificação dos modais de transporte, com destaque para a substituição parcial do modal rodoviário por alternativas como o ferroviário. Por fim, a terceira frente está relacionada à modernização tecnológica da frota, seja por meio da adoção de veículos com tecnologias mais limpas ou pelo uso de combustíveis com menor impacto ambiental.

Gráfico 2: Estimativas de redução de emissões de GEE por estratégia de descarbonização de veículos pesados

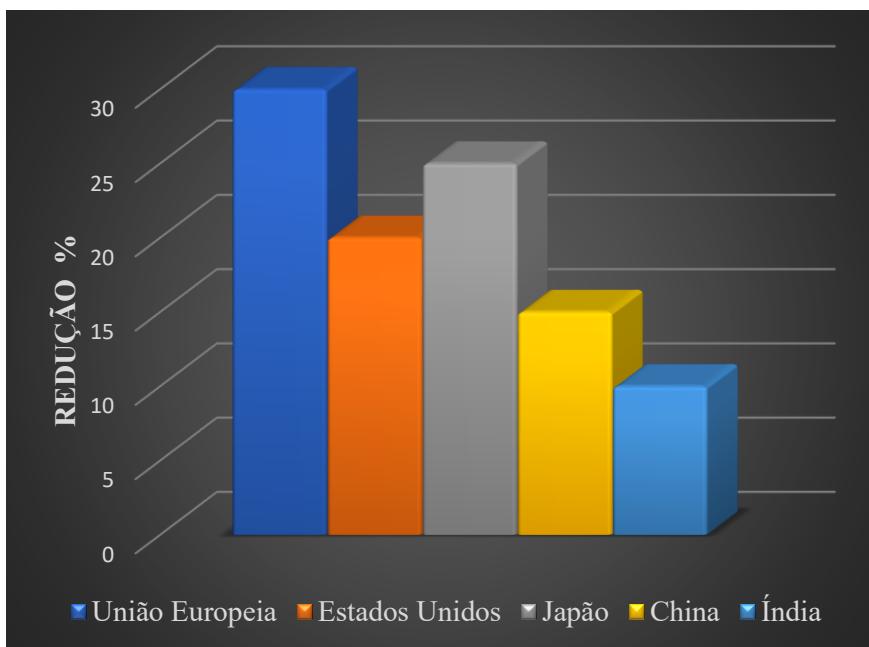


Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Em 2018, os veículos pesados utilizados no transporte rodoviário foram responsáveis por cerca de 4% das emissões globais de GEE. Caso o crescimento das atividades logísticas continue no ritmo atual, estima-se que essas emissões possam dobrar até 2050. Diante desse cenário preocupante, diversos países têm intensificado suas políticas regulatórias, buscando conter o avanço das emissões no setor de transporte terrestre por meio da promoção da eficiência energética e da incorporação de tecnologias de baixo carbono (*SMART FREIGHT CENTRE*, 2019).

Segundo o *International Council on Clean Transportation* (2018), várias nações estabeleceram metas cada vez mais exigentes para reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de caminhões pesados até 2025, tomando como referência os níveis registrados em 2010. Essas metas refletem o compromisso internacional em alinhar o transporte de carga pesada às políticas de mitigação climática e à transição para fontes energéticas mais limpas.

Gráfico 3 : Metas de Redução de Emissões de CO₂ - Caminhões Pesados até 2025 – base de 2010



Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Segundo *Abnett* (2024), a União Europeia aprovou uma legislação que estabelece novas metas obrigatórias para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) por caminhões. A medida vai exigir que novos veículos pesados sejam livres de emissões a partir de 2040.

Segundo a EPE (2024), a aceleração da eletrificação e da utilização de biocombustíveis configura-se como uma medida estratégica fundamental para a descarbonização do transporte rodoviário até o ano de 2030. A partir desse horizonte temporal, a eletrificação tende a assumir papel central na matriz energética do setor, indicando que a eletricidade poderá representar aproximadamente 75% do consumo energético do transporte rodoviário até 2050. Nesse contexto, a eletrificação consolida-se, em longo prazo, como a principal via tecnológica para a redução das emissões, com estimativas atualizadas da IEA (2025), reforçando sua predominância na matriz energética do setor.

O mercado brasileiro de veículos eletrificados enfrenta desafios estruturais, como os elevados preços dos modelos disponíveis, a necessidade de ampliação da infraestrutura de recarga e a configuração atual do parque industrial nacional, que prioriza a produção de veículos híbridos (EPE, 2024).

3 Resultados

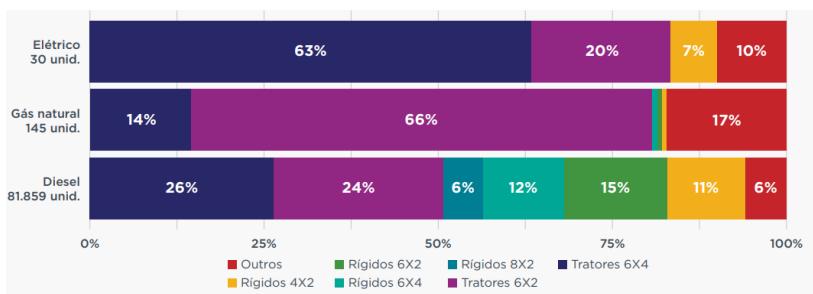
3.1 Panorama Global da Descarbonização no Transporte Pesado

O ano de 2024 representou um marco significativo para os países comprometidos com as metas estabelecidas no Memorando de Entendimento Global (*MoU*) voltado à promoção de veículos médios e pesados com zero emissões. O número de nações signatárias do acordo aumentou em 40%, com destaque para a adesão de diversos países de economias emergentes e em desenvolvimento, incluindo Colômbia, Cabo Verde, Costa Rica, Etiópia, Gana, Islândia, Israel, Papua-Nova Guiné, Moçambique, Seicheles e Tonga.

3.2 Crescimento da Demanda por Caminhões Elétricos

De acordo com o relatório da IEA (2024), as vendas globais de caminhões elétricos de médio e grande porte apresentaram crescimento pelo terceiro ano consecutivo em 2024, ultrapassando 90 mil unidades comercializadas. Esse volume representa um aumento de aproximadamente 80% em relação ao ano anterior, revertendo de forma significativa a tendência de queda observada entre 2018 e 2021. Esse avanço foi impulsionado, sobretudo, pelo mercado chinês, responsável por mais de 80% das vendas globais em 2024, com um volume que mais que dobrou em comparação a 2023. No contexto latino-americano, destaca-se o Brasil, onde cerca de 500 caminhões elétricos foram comercializados no mesmo período, sinalizando um movimento inicial de adoção dessa tecnologia no país. Apesar de ainda pouco expressivos, conforme a Figura 2, os caminhões pesados elétricos, concentrados nos modelos rígidos 6x4, e os movidos a gás natural, majoritariamente tratores 6x2, começam a marcar presença, embora enfrentem limitações como infraestrutura restrita e aplicações específicas (ICCT, 2025).

Figura 2. Vendas de Caminhão Pesado por configuração e tipo de combustível em 2023



Fonte : ICCT, 2025.

De acordo com o IBP (2025), a descarbonização do transporte de carga pesada no Brasil ainda depende do avanço tecnológico no desenvolvimento de baterias mais eficientes. Essas tecnologias precisam ser capazes de suportar o elevado peso e consumo energético característicos dos caminhões, além de oferecer autonomia compatível com longas distâncias, o que atualmente representa um desafio técnico e econômico, devido aos altos custos envolvidos.

3.3 Evolução do Total Cost Ownership (TCO) e Desafios para a Transição

Embora os veículos pesados de emissão zero ainda apresentam custos iniciais elevados, a equivalência no custo total de propriedade (TCO) em relação aos modelos a diesel já foi atingida em alguns mercados e deve se tornar uma realidade global até 2030. Esse alinhamento será favorecido por fatores como o avanço tecnológico e o aumento da escala de produção, que reduzem os custos operacionais; políticas ambientais mais rigorosas, que incentivam tecnologias limpas; e mecanismos de apoio financeiro, como subsídios e incentivos fiscais, que diminuem os riscos para investidores e operadores (CALSTART, 2024).

3.4. O Brasil no Contexto da Transição Energética e os Avanços em Políticas Públicas e Incentivos

Segundo o WRI (2025), a Contribuição Nacionalmente Determinada (*NDC*) apresentada pelo Brasil em 2024 estabelece metas ambiciosas de redução das emissões de gases de efeito estufa, com foco na implementação de políticas públicas setoriais como instrumento para seu cumprimento. A meta prevê limitar as emissões a 0,85 GtCO₂e até 2035. Apresentada durante a COP29, a NDC brasileira propõe uma redução entre 59% e 67% nas emissões até 2035, em relação aos níveis de 2005, o que corresponde a um orçamento de carbono estimado entre 0,85 e 1,05 GtCO₂e.

O transporte de veículos pesados no Brasil é altamente dependente do diesel, que embora eficiente, possui elevado impacto ambiental, já que é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂, tornando urgente a busca por alternativas mais limpas. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034) projeta um aumento de emissões no setor de transportes, de aproximadamente 85 MtCO₂e, passando de 458 MtCO₂e em 2024, para 543 MtCO₂e em 2034 , o que reforça a urgência de políticas de mitigação (EPE, 2024).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024b), a reversão da tendência de crescimento das emissões no setor de transportes no Brasil requer uma estratégia ambiciosa de ampliação do uso de biocombustíveis. Além disso, é fundamental intensificar os esforços voltados à adoção de veículos equipados com tecnologias de propulsão mais limpas, com destaque para os modelos elétricos a bateria e híbridos flex, como parte de uma transição energética mais sustentável.

Conforme estabelecido pelo Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, o CNPE define anualmente metas nacionais de descarbonização com horizonte de dez anos, no âmbito da política pública RenovaBio (BRASIL, 2024e). Essas metas são posteriormente desdobradas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que as distribui entre os agentes obrigados, os distribuidores de combustíveis fósseis, proporcionalmente à sua participação no mercado, assegurando a implementação da política de redução de emissões no setor de transportes.

Quadro 2: Principais leis e políticas públicas voltadas à descarbonização do setor de transportes no Brasil

Instrumento Legal / Política	Descrição
Lei 11.097/2005	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel -PNPB.
Lei nº 13.576/2017- RenovaBio	Institui a Política Nacional de Biocombustíveis, promovendo a expansão dos biocombustíveis com foco na redução de emissões.
Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica - PNME	Iniciativa interinstitucional que promove a eletrificação da frota, incluindo veículos pesados, com foco em políticas públicas e infraestrutura.

Resolução nº 4, de 20 de março de 2023.	Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2.
Lei nº 14.993/2024. Lei do Combustível do Futuro.	Inclui o Programa Nacional do Diesel Verde e o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano.
Decreto nº 12.435, de 15 de abril de 2025.	Substitui o Rota 2030. Regulamenta o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover), instituído pela Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024.

Fonte: Elaboração da autora, 2025.

Conforme o IBP (2025), a promulgação da Lei Combustível do Futuro, em 2024, representa um marco inicial no compromisso do Brasil com a modernização e diversificação da matriz energética voltada ao setor de transportes.

Em dezembro de 2024, o CNPE aprovou a criação do Comitê Técnico Permanente do Combustível do Futuro, com a finalidade de coordenar a regulamentação e a implementação da Lei nº 14.993/2024. Esse comitê interministerial tem como atribuições propor medidas regulatórias e conduzir estudos técnicos que subsidiem as decisões do CNPE, com foco na promoção da descarbonização do setor de transportes no Brasil (BRASIL, 2024b).

Segundo o IBP (2025), o Brasil ocupa uma posição estratégica no processo de descarbonização da mobilidade, em razão de um conjunto de vantagens estruturais. O país dispõe de uma das políticas públicas mais consolidadas de incentivo aos biocombustíveis, além de apresentar uma matriz energética e elétrica fortemente baseada em fontes renováveis, com participações de aproximadamente 50% e 90%, respectivamente. Soma-se a isso a ampla disponibilidade de biomassa, a infraestrutura industrial já instalada e uma frota veicular compatível com o uso de biocombustíveis. Diante desse cenário, alternativas com maior viabilidade econômica, como os próprios biocombustíveis e o gás natural veicular, tendem a desempenhar papel relevante na aceleração da transição no curto prazo.

De acordo com Couto (2025), o gás natural apresenta-se como um vetor estratégico para a descarbonização do transporte rodoviário no Brasil, em razão de suas vantagens econômicas e ambientais, especialmente quando comparado ao diesel e associado ao uso do biometano. Nesse contexto, fatores como a redução dos custos de aquisição, a ampliação da variedade de modelos disponíveis, o fortalecimento da infraestrutura de abastecimento e de serviços de manutenção, bem como a consolidação de um mercado secundário, são considerados determinantes para a expansão do uso do gás natural no setor de transporte.

4 Considerações Finais

A transição energética no setor de transporte pesado é um dos pilares fundamentais para a mitigação das mudanças climáticas e para o alcance das metas globais de descarbonização. À luz do trilema da energia, que equilibra segurança, equidade e sustentabilidade, torna-se evidente que o desafio não reside apenas na substituição tecnológica, mas na construção de um sistema energético resiliente, acessível e ambientalmente responsável.

No contexto brasileiro, os principais entraves à adoção de tecnologias limpas incluem o alto custo de aquisição dos veículos de emissão zero, a infraestrutura limitada de abastecimento e recarga, e a ausência de um mercado secundário consolidado. Esses fatores dificultam a penetração de soluções como veículos elétricos e movidos a hidrogênio, especialmente em segmentos de transporte de longa distância e em regiões com menor densidade econômica.

Por outro lado, o Brasil apresenta oportunidades estratégicas que podem ser decisivas para acelerar essa transição. A matriz energética nacional é predominantemente renovável, com forte presença de fontes hidráulicas, eólicas e solares. A disponibilidade de biomassa e a experiência consolidada com biocombustíveis, como etanol, biodiesel e biometano, posicionam o país como um potencial líder na descarbonização da mobilidade pesada.

A experiência internacional, como evidenciado na COP 28, reforça a necessidade de uma transição energética justa, com políticas que promovam o “*transitioning away*” dos combustíveis fósseis de forma ordenada e equitativa. A eletrificação dos transportes, embora promissora, requer investimentos significativos em inovação, especialmente em tecnologias de baterias e infraestrutura de recarga. O hidrogênio verde, por sua vez, demanda avanços em toda a cadeia de valor para se tornar uma alternativa viável e escalável.

Dante da complexidade do cenário, é imperativo que o Brasil adote uma abordagem multi tecnológica, combinando eletrificação, biocombustíveis, gás natural e hidrogênio, de forma adaptada às realidades regionais. A cooperação entre indústria, academia e governo, aliada a políticas públicas integradas e incentivos estratégicos, será essencial para viabilizar essa transformação. O sucesso dependerá da capacidade de alinhar visão de longo prazo, ação coordenada e compromisso com a sustentabilidade, garantindo que as escolhas feitas hoje moldem um futuro energético mais justo, limpo e eficiente.

Diversas novas soluções despontam como promissoras, mas apresentam incertezas quanto ao ritmo da mudança. Ressalta-se, contudo, que não há uma solução tecnológica única para o transporte pesado, sendo mais provável a coexistência de diferentes rotas tecnológicas ao longo do processo de descarbonização.

Referências

ABNETT, Kate. União Europeia aprova lei para cortar emissões de CO₂ de caminhões. **CNN Brasil**, [S.l.], 13 maio 2024. Atualizado em: 13 maio 2024, 12h41. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/uniao-europeia-aprova-lei-para-cortar-emissoes-de-co2-de-caminhoes>. Acesso em: 20 jul. 2025

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Biodiesel**. Brasília: ANP, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em : 19 Jul.2025.

ANP. Dados estatísticos de comercialização de combustíveis. Brasília: ANP, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 19 jul. 2025.

AYAD, Sami M. M. E. et al. Study on the effects of micro-addition of hydrogen in diesel combustion in an optically accessible engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 75, p. 363–387, 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.130>.Acesso em : 20 Jun.2025.

BRASIL. Decreto nº 12.435, de 15 de abril de 2025. Regulamenta o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover), instituído pela Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 16 abr. 2025b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2025/Decreto/D12435.htm. Acesso em: 20 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 9 out. 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm. Acesso em: 20 jul. 2025

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis-RenovaBio. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm. Acesso em: 20 jun. 2025

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Combustível do Futuro: Brasil avança na autossuficiência de combustíveis com aprovação do E30 e B15**. Brasília, DF: MME, 2025a. 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: 10 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **CNPE: CNPE cria comitê interministerial para coordenar a regulamentação do Combustível do Futuro**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia (MME), 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-cria-comite-interministerial-para-coordenar-a-regulamentacao-do-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Diesel Verde**. Brasília: MME, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Hidrogênio – PNH2**. Brasília, DF: MME, [s.d]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel - PNBP**. Brasília, DF: MME, [s.d]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnbp>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório do Grupo de Trabalho do Programa Gás para Empregar**. Brasília: MME, 2024d. Disponível em: https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/gas-para-empregar/relatorio-dos-comites-tematicos/relatorio_comite_5_vf.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Renovabio**. Brasília, DF: MME, 2024e. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 1. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

CALSTART. **Global progress toward decarbonizing transportation: multi-country action plan 2024 update**. Pasadena: Global Commercial Vehicle Drive to Zero, 2024. Disponível em: https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2024/11/MCAP-2024-Update_Final_112024.pdf. Acesso em: 16 jul. 2025.

CLIMATE WATCH. **Brazil: country profile and climate data**. [S. l.]: Climate Watch, [2025]. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/countries/BRA>. Acesso em: 9 jul. 2025.

CLIMATEWATCH. **Historical GHG Emissions**. Washington, DC: World Resources Institute (WRI), 2025. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org>. Acesso em: 21 jun. 2025.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Global Climate Highlights 2024**. [S.l.]: Copernicus, 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024> Acesso em: 16 jul. 2025.

COUTO, M. As oportunidades do gás na descarbonização do transporte rodoviário. In: SEMINÁRIO DE MATRIZ E SEGURANÇA ENERGÉTICA, 12., 2025, Rio de Janeiro. **Anais[...]** Rio de Janeiro: FGV, 2025.

ENERGY TRANSITION COMMISSION. **Mission possible: reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century**. London, United Kingdom; 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**: Ano Base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2022>. Acesso em: 16 jul. 2025.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 11 jul. 2025.

EPE. **Relatório Síntese: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 10 jul. 2025.

EPE. **Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil**: Benchmarking Internacional. Brasília: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/transporte-rodoviario-de-cargas-no-brasil-benchmarking-internacional>. Acesso em: 16 jul. 2025

EXAME. Entenda a diferença entre net zero e neutralidade de carbono. **Exame**, São Paulo, 2023. Disponível em: [https://exame.com/ciencia/diferenca-entre-netzero-neutralidade-de-carbono](https://exame.com/ciencia/diferenca-entre-net-zero-neutralidade-de-carbono). Acesso em: 16 jul. 2025.

FRANCO, Alessandro; GIOVANNINI, Caterina. Routes for hydrogen introduction in the industrial hard-to-abate sectors for promoting energy transition. **Energies**, Basel, v. 16, n. 16, p. 6098, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/6098>. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16166098>. Acesso em: 20 Jun. 2025.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Programa Brasileiro GHG Protocol**. São Paulo: FGV EAESP, 2023. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 19 jul. 2025.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

INKINEN, T.; HAMALAINEN, E. **Reviewing truck logistics: solutions for achieving low emission road freight transport.** Sustainability (Switzerland), [S.I.], v. 12, n. 17, p. 1–11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/SU12176714>. Acesso em: 20 Jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). **Biocombustíveis ou eletrificação: perspectivas para a descarbonização dos transportes no Brasil.** Rio de Janeiro: IBP, 2025.

IBP. **Cenários: maio 2024 - A liderança do IBP nas estratégias ESG da indústria de óleo e gás no Brasil: atraindo investimentos e gerando benefícios amplamente reconhecidos pela sociedade.** Rio de Janeiro: IBP, 2024. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2024/07/cenarios-esg-ebook-110724-compactado.pdf>. Acesso em: 20 Jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Annex III: Tables of Historical and Projected Well-mixed Greenhouse Gas Mixing Ratios and Effective Radiative Forcing of All Climate Forcers.* In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (org.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2023a. p. 2139–2152. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>. Acesso em: 16 jul. 2025

IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório de Síntese. **Contribuição do Grupo de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.** Genebra: IPCC, 2023b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf. Acesso em: 17 Jul. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **The European Commission proposed CO₂ standards for heavy-duty vehicles.** Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation, 2018. Disponível em: <https://theicct.org/publication/the-european-commissions-proposed-co2-standards-for-heavy-duty-vehicles/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ICCT. **Evolução do mercado de veículos pesados no Brasil.** Abril de 2025. Disponível em: <https://theicct.org/publication/evolucao-do-mercado-de-veiculos-pesados-no-brasil-apr25>. Acesso em: 27 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Electricity 2025:** Analysis and forecast to 2027. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>. Acesso em: 16 jul. 2025

IEA. **The Future of Hydrogen:** Seizing today's opportunities. Paris: IEA, 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Acesso em: 11 Jul. 2025.

IEA. **Net Zero by 2050:** A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IEA. **World Energy Outlook 2022.** Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 16 jul. 2025

KOUKETSU, Milton Keisy. **Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2024. Disponível em : <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262678>. Acesso em: 10 Jul. 2025.

MÄKITIE, Tuukka; STEEN, Markus. The energy sector: an industrial perspective on energy transitions. In: BIANCHI, Patrizio; LABORY, Sandrine; TOMLINSON, Philip R. (org.). **Handbook of industrial development**. Glos, UK: Edward Elgar Publishing, 2023. Cap. 12.

MENDES, Everton Enzo Moura. **Hidrogênio verde: o seu potencial na transição energética brasileira**. Revista Foco Técnico, v. 29, ed. 141, dez. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/hidrogenio-verde-o-seu-potencial-na-transicao-energetica-brasileira>. Acesso em: 20 jul. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Brasil precisa cortar emissões em 92% até 2035**. [S. l.]: Observatório do Clima, 2024a. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/brasil-precisa-cortar-emissoes-em-92-ate-2035/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2023**. São Paulo: Observatório do Clima, 2024b. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. [S. l.]: Our World in Data, [2025]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA. **Sobre a PNME**. [S.l.]: PNME, [2025]. Disponível em: <https://pnme.org.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

RESOURCEWATCH. **Climate dashboard**. Washington, D.C.: World Resources Institute, [2025]. Disponível em: <https://resourcewatch.org/dashboards/climate>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SAE4MOBILITY. **Mapeamento de cadeias de mobilidade: Plano Nordeste Potência**. [S.l.]: SAE4Mobility, 2022. Disponível em: https://nordestepotencia.org.br/wp-content/uploads/2022/09/3_H2V-e-mobilidade-eletrica-SAE.pdf. Acesso em: 10 Jul.2025.

SMART FREIGHT CENTRE. **Global logistics emissions council framework for logistics emissions accounting and reporting: version 2.0**. Amsterdam: Smart Freight Centre, 2019. ISBN 978-90-82-68790-3. Disponível em: <https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/emissions-accounting/global-logistics-emissions-council/calculate-report-glec-framework/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **NDC information: The Paris Agreement**. [S. l.]: UNFCCC, [2025]. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>. Acesso em: 10 jul. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE - WRI. **Nova NDC do Brasil: o que a meta revela sobre a transição da economia**. São Paulo: WRI Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/nova-ndc-do-brasil-o-que-meta-revela-sobre-transicao-da-economia>. Acesso em : 11 Jul.2025

WRI; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GHG Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard**. Revised edition. [S. l.]: WRI; WBCSD, 2004. Disponível em:<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.