



ROADMAP

ROADMAP PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE LONGA DISTÂNCIA, MARÍTIMO E AÉREO DE CARGAS NO BRASIL

ABRIL DE 2026

Produto elaborado para:

Instituto Clima e Sociedade - iCS

Projeto

Roadmap para a Descarbonização do Transporte Rodoviário de Longa Distância, Marítimo e Aéreo de Cargas no Brasil.

Coordenação

Suzana Kahn Ribeiro

Supervisão Técnica

Márcio de Almeida D'Agosto
Lino Guimarães Marujo

Equipe Técnica

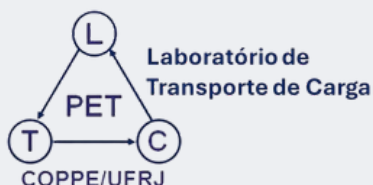
Daniel Neves Schmitz Gonçalves
Lorena Mirela Ricci
Juliana Gomes Martins
Gabriel Bezerra Costa de Lima

Equipe Técnica iCS

Carine Lacerda
Tamar Roitman

Design Gráfico e Diagramação:

Vitor Olavo de Oliveira Castro Moreira
Luis Guilherme Quintanilha Jacintho



SUMÁRIO

Resumo Executivo	01
Finalidade do <i>Roadmap</i>	02
Público-Alvo	03
Estrutura do <i>Roadmap</i>	03
1. Introdução	04
2. Caracterização e Perspectivas do Setor de Transportes no Brasil	05
3. Medidas Propostas	12
3.1 Modo Rodoviário	12
<i>Panorama nacional do biometano</i>	12
Panorama do Biogás no Brasil Referente ao Ano de 2024	12
Do Biogás ao Biometano	13
Perspectivas de Expansão e Pontencial de Crescimento	13
Marcos Regulatórios e Instrumentos de Incentivo	14
Descarbonização e Fatores de Emissão	14
<i>Panorama nacional do biodiesel</i>	15
Oferta e Demanda	15
Desafios	15
3.2 Modo Marítimo	16
<i>Panorama nacional do transporte marítimo</i>	16
Metas e Diretrizes Internacionais	16
Eficiência Energética e Operacional	16
Combustíveis Alternativos e <i>Power-to-X</i>	17
Biocombustíveis	17
Infraestrutura e Viabilização	18
3.3 Modo Aéreo	18
<i>Panorama nacional do SAF</i>	18
Rotas Tecnológicas e Matérias-Primas	18
Oferta, Demanda e Desafios	19
Políticas Públicas e Regulamentação	19
3.4 Estimativa do Cenário de Descarbonização	20
4. Caminhos para Superar os Desafios	24
Mapeando e superando riscos	24
Caminhos para a descarbonização: definindo o <i>Roadmap</i>	30
Referências Bibliográficas	35



RESUMO EXECUTIVO

O presente documento tem por finalidade orientar, por meio de um *Roadmap*, a descarbonização dos modos de transporte de carga rodoviário de longa distância, marítimo e aéreo, classificados como setores de difícil abatimento (*hard-to-abate*).

A análise adota uma perspectiva sistêmica, contemplando variáveis tecnológicas, energéticas, regulatórias e institucionais, bem como a interação entre o setor de transporte e a indústria de óleo e gás. Ao projetar cenários até 2050, o estudo identifica as medidas necessárias em diferentes horizontes temporais para subsidiar políticas públicas e consolidar um sistema de transporte compatível com a ambição climática nacional e as tendências globais.

FINALIDADE DO ROADMAP

Este *Roadmap* foi desenvolvido como parte do projeto “*Roadmap para a Descarbonização do Transporte Rodoviário de Longa Distância, Marítimo e Aéreo de Cargas no Brasil*”, resultado da parceria firmada entre o Instituto Clima e Sociedade (iCS) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por meio da Fundação COPPETEC e do Programa de Engenharia de Transportes (PET) da COPPE/UFRJ.

O projeto tem como objetivo central avaliar o potencial de contribuição do transporte de cargas, especificamente nos modos: rodoviário de longa distância; aquático e aéreo, para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. Dessa forma, é almejado subsidiar a formulação de políticas públicas compatíveis com a ambição climática nacional, além de promover incentivos, instrumentos e recursos voltados à consolidação de uma economia de baixo carbono e ao fortalecimento da sociedade civil frente ao uso de combustíveis fósseis.

A estrutura do projeto engloba atividades de revisão bibliográfica sobre o direcionamento global de transição energética, bem como alinhamento dessas tendências com as estratégias do setor de óleo e gás brasileiro, e a elaboração de cenários prospectivos em horizonte temporal até 2050. Para o estabelecimento dessas projeções e do Roadmap, é adotada a metodologia TEMA (*Transport-Energy-Emissions Multi-Tier Analysis*), desenvolvida pela equipe da COPPE/UFRJ e utilizada para definir o papel dos transportes nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) brasileiras.

Como entrega principal do projeto, este *Roadmap* consolida a análise sistêmica dos setores hard-to-abate, integrando perspectivas tecnológicas, energéticas e regulamentares, com o objetivo de orientar tomadores de decisão, tanto públicos como privados, a respeito das rotas mais viáveis para o país, alinhando a descarbonização logística às especificidades da indústria de óleo e gás nacional e aos compromissos climáticos globais do Brasil. Sendo assim, este documento também visa fomentar a criação de políticas públicas e instrumentos econômicos que auxiliem na ampliação da adoção de tecnologias limpas. Ao equilibrar segurança energética e transição sustentável, ele estabelece uma linha de base sólida e metas claras de descarbonização para os horizontes de curto, médio e longo prazo.

PÚBLICO-ALVO

Este *Roadmap* tem como público-alvo o Governo Federal, órgãos do setor privado e da sociedade civil e as agências reguladoras relacionadas ao setor de óleo e gás e ao transporte rodoviário de longa distância, marítimo e aéreo de cargas.

ESTRUTURA DO ROADMAP

O conteúdo deste *Roadmap* está organizado em quatro capítulos. O capítulo 1 introduz o tema abordando a descarbonização do setor de transportes, trazendo o contexto, a evolução da demanda energética e das emissões de GEE em âmbito global e nacional, bem como os desafios associados à transição energética em setores de difícil abatimento.

O capítulo 2 caracteriza o setor de transportes no Brasil, estabelecendo a base do problema. Ele leva em consideração os dados mais recentes de emissões reportados oficialmente pelo país, e analisa a evolução das emissões por cada modo e a relevância dos segmentos. É evidenciado o aumento da participação desses segmentos no total das emissões do setor, sua resiliência econômica e a insuficiência das políticas atuais para conter o crescimento das emissões, estabelecendo o diagnóstico que fundamenta os cenários prospectivos e as estratégias de mitigação desenvolvidas nos capítulos seguintes.

O capítulo 3 aborda o panorama nacional e o diagnóstico das perspectivas tecnológicas para a transição energética. Para cada modo, é apresentado a situação atual das soluções de baixo carbono: no rodoviário, é analisada a oferta de biometano e biodiesel; no marítimo, é discutido as metas da *International Maritime Organization* (IMO) e os combustíveis alternativos (biodiesel, metanol); e no aéreo, é abordado o potencial de produção do Combustível Sustentável de Aviação (SAF - rotas HEFA e AtJ). O capítulo também identifica os riscos associados, como a disponibilidade de matéria-prima e a falta de marcos regulatórios.

Por fim, o capítulo 4 discute os caminhos para superar as barreiras identificadas, trazendo o produto principal. Este capítulo consolida a Matriz de Riscos e apresenta as recomendações estratégicas, que são divididas em ações regulatórias, de infraestrutura, de pesquisa e desenvolvimento (P&D), medidas necessárias para viabilizar os cenários prospectivos de descarbonização nos horizontes de 2035 e 2050, mitigando gargalos como o custo operacional e a segurança jurídica.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico e o desenvolvimento econômico em escala global impulsionaram a atividade de transportes, resultando em maior demanda energética e consequentemente elevação nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, a descarbonização deste setor é configurada como um dos principais desafios para a mitigação da mudança climática (Gonçalves, 2022), uma vez que o transporte é um dos principais consumidores de combustíveis fósseis, utilizando cerca de 95% dos derivados de petróleo ofertados no mundo (IEA, 2023a).

Em escala global, as emissões diretas oriundas do setor de transportes atingiram aproximadamente 8,9 GtCO₂e em 2019, correspondendo a cerca de 15% das emissões totais de GEE e 23% das emissões de CO₂ associadas ao uso de energia, ganhando destaque como a principal fonte emissora dentro do setor. O transporte rodoviário se destaca como o maior responsável, com cerca de 6,1 GtCO₂e, equivalente a 69% do total. Já o transporte marítimo internacional e a aviação internacional contribuíram com aproximadamente 0,8 GtCO₂e (9%) e 0,6 GtCO₂e (7%), respectivamente (IPCC, 2022).

No horizonte temporal entre 2010 e 2019, as emissões do transporte rodoviário apresentaram crescimento médio anual de 1,7%, enquanto as da aviação internacional aumentaram a uma taxa de 3,4% ao ano. Esse avanço está relacionado com a expansão acelerada da atividade de transportes em nível global, que registrou um crescimento de 73% entre 2000 e 2018. O segmento de transporte de cargas, em particular, cresceu 68% entre 2000 e 2015 e é projetado que triplique até 2050, impulsionado, principalmente, pela intensificação das cadeias globais de suprimentos e do comércio internacional, o que torna sua descarbonização especialmente complexa (IPCC, 2022).

No contexto brasileiro, o setor de transportes representou cerca de um terço do consumo final de energia em 2023, sendo responsável por 44% das emissões de CO₂e do setor energético (SEEG, 2024). A matriz energética do setor ainda é predominantemente fóssil, com apenas 22,5% proveniente de fontes renováveis (EPE, 2024a), o que agrava o impacto ambiental num cenário onde o transporte de carga cresceu 47% entre 2005 e 2015 (Gonçalves e D'Agosto, 2017). A complexidade do cenário nacional é ampliada pela relevância estratégica de modos de transporte específicos: o transporte marítimo, por exemplo, é responsável por movimentar 80% do volume comercializado no mundo (United Nations, 2023) e mais de 95% das cargas de comércio exterior do Brasil. Paralelamente, o setor aéreo busca expandir o uso do SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) e debate as melhores opções tecnológicas e matérias-primas para sua viabilização (EPE, 2024b; Coalizão dos Transportes, 2025).

Diante da necessidade de harmonizar o crescimento econômico com as metas climáticas, a criação de *roadmaps* realistas para a transição energética dos diversos segmentos se torna fundamental. Considerando a infraestrutura existente e a complexidade dos setores de difícil abatimento, o planejamento deve contemplar múltiplas soluções, sem a exclusão obrigatória imediata de combustíveis fósseis, baseadas no princípio de políticas “sem arrependimentos”. Tais estratégias devem ser monitoradas, verificadas e reportadas regularmente, evitando bloqueios tecnológicos (*lock-in*) e promovendo a competição saudável entre as diferentes rotas tecnológicas disponíveis (EPEa, 2024).

2. CARACTERIZAÇÃO E PERSPECTIVAS DO SETOR DE TRANSPORTES NO BRASIL

A análise da trajetória de descarbonização do setor de transportes brasileiro deve partir dos dados mais recentes oficializados pelo país junto à comunidade internacional. O Primeiro Relatório Bienal de Transparência (BTR) do Brasil, submetido à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), oferece o panorama atualizado para calibrar a urgência e o direcionamento das ações propostas neste *Roadmap*.

Em 2022, as emissões líquidas totais brasileiras somaram 2.039.236 kt CO₂e (Figura 1). Embora este volume represente um aumento em relação a 2020 (ano atípico devido à pandemia), observa-se uma redução de 20,4% em comparação ao teto de 2005 (ano-base da Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) brasileira). Esta dinâmica de redução nacional está fortemente atrelada ao desempenho do setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF), que registrou diminuição significativa das emissões graças à retomada e eficácia dos Planos de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento.

No entanto, à medida que o Brasil avança no controle do desmatamento, a parcela das emissões associadas à energia e, especificamente, aos transportes, ganha maior peso relativo e exige estratégias de mitigação mais complexas e tecnológicas.

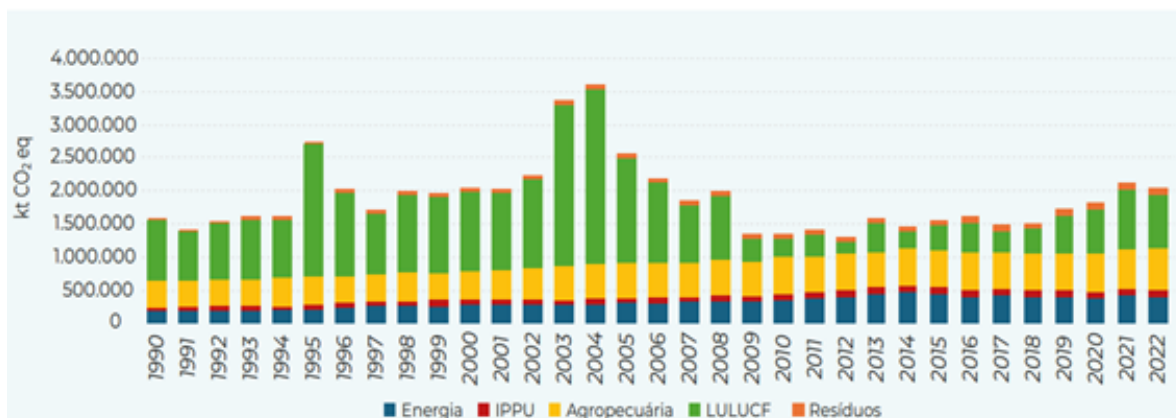


Figura 1. Emissões líquidas por setor com LULUCF, em kt CO₂ e.

Fonte: MCTI, 2024.

Entre 2005 e 2022, as emissões do setor de transportes aumentaram de 139,2 Mt CO₂e para 215,4 Mt CO₂e, conforme ilustrado na Figura 2, representando uma elevação de 56,1%, com o modo rodoviário sendo o principal responsável por esse crescimento. No mesmo período, a aviação apresentou um acréscimo moderado, passando de 5,9 Mt CO₂e em 2005 para 8,5 Mt CO₂e em 2022, o que corresponde a um avanço de 43,5%. Ressalta-se que as restrições decorrentes da pandemia de 2020 provocaram uma redução geral de 5,3% nas emissões entre 2019 e 2020, especialmente no transporte aéreo, que registrou queda de 43%. Esse segmento só retornou aos níveis pré-pandemia em 2023.

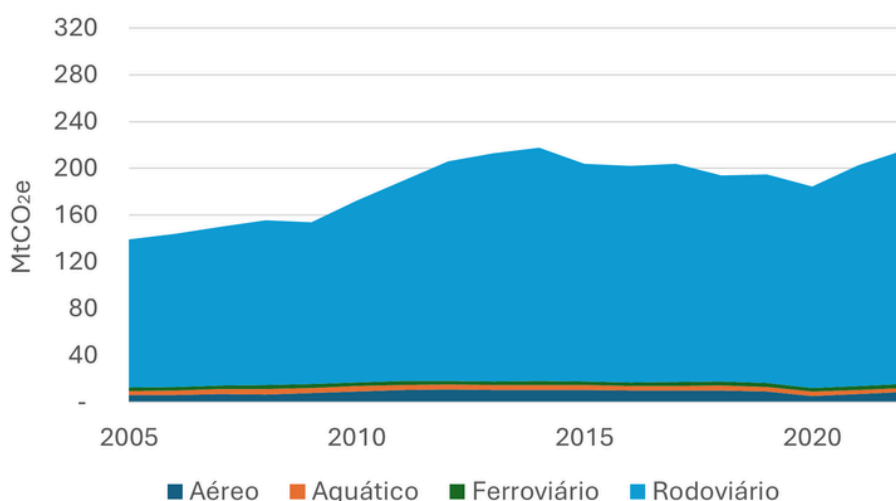


Figura 2. Histórico de emissões do setor de transportes por modo.

Fonte: Elaboração própria.

Ao avaliar apenas os segmentos tratados neste *Roadmap*, entre 2005 e 2022, as emissões agregadas destes segmentos saltaram de 50.618 kt CO₂e para 92.114 kt CO₂e, um crescimento expressivo de aproximadamente 78,9%, conforme ilustrado na Figura 3. O principal vetor desse aumento foi o transporte rodoviário de longa distância impulsionado pela expansão da fronteira agrícola e pela dependência nacional do modo rodoviário para o escoamento de safras e produtos industrializados.

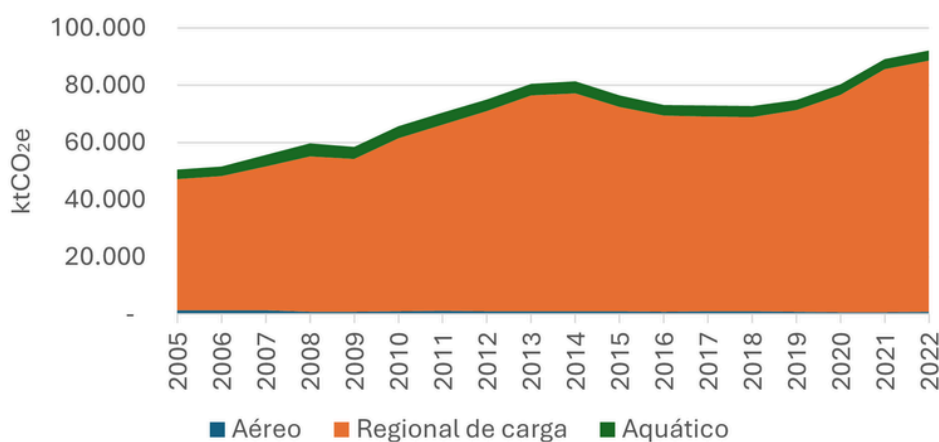


Figura 3. Histórico de emissões do setor de transportes por modo.

Fonte: Elaboração própria.

Dois indicadores reforçam a criticidade destes segmentos para a estratégia climática brasileira:

1. Resiliência à Crise (Efeito Pandemia): Ao contrário do setor de transportes como um todo (que viu uma queda nas emissões devido à redução da mobilidade urbana de passageiros), os segmentos de carga e longa distância demonstraram alta resiliência e essencialidade econômica. Entre 2019 e 2020, as emissões destes modos aumentaram cerca de 7,2%, indicando que a demanda por transporte de carga e logística internacional não apenas se manteve, como se intensificou.

2. Aumento da Representatividade: A participação destes segmentos no total das emissões de transportes subiu de 36% em 2005 para 43% em 2022.

Considerando apenas o recorte de transporte de carga, estes segmentos representaram, nos últimos cinco anos, cerca de 80% das emissões, se consolidando como o desafio de descarbonização da logística do país. Este cenário evidencia que as políticas de eficiência energética vigentes, embora necessárias, não têm sido suficientes para dissociar o crescimento econômico do aumento das emissões nestes modos, justificando a necessidade das rotas tecnológicas e regulatórias propostas nas seções seguintes deste *Roadmap*.

Para a elaboração dos cenários prospectivos de demanda energética e emissões de GEE, este estudo utiliza o modelo TEMA (*Transport-Energy-Emissions Multi-Tier Analysis*). Trata-se de uma abordagem analítica multinível desenvolvida para estruturar, de forma sistêmica e integrada, a complexidade inerente ao setor de transportes em escala nacional.

A aplicação do TEMA transcende a simples extrapolação de tendências. O modelo opera por meio de um fluxo lógico rigoroso que se inicia na consolidação da série histórica (garantindo que o ponto de partida seja factual e verificado), passa pelo levantamento e seleção crítica de premissas e hipóteses (macroeconomias, tecnológicas e regulatórias), e incorpora o debate com *stakeholders* para validação de expectativas de mercado. Por fim, o processo culmina na definição de indicadores de desempenho e na calibração fina das estimativas, assegurando coerência entre a atividade de transporte, o consumo de energia e as emissões resultantes.

Operacionalmente, a metodologia TEMA é estruturada em três fases sequenciais e interdependentes:

1.Fase I - Estruturação do Histórico do Setor: Focada na coleta, tratamento e consistência dos dados passados para estabelecer a "linha de base" do estudo.

2.Fase II - Planejamento do(s) Cenário(s): Etapa onde são definidas as narrativas ("*storylines*") que guiarão o futuro, incluindo as variáveis-chave (ex: crescimento do PIB, penetração de novas tecnologias, mandatos de biocombustíveis).

3.Fase III - Elaboração dos Cenários: O processamento quantitativo propriamente dito, gerando as curvas de demanda e emissões para o horizonte temporal definido (2026-2050).

A Figura 4 a seguir ilustra o encadeamento lógico destas três fases e o detalhamento de seus respectivos passos.

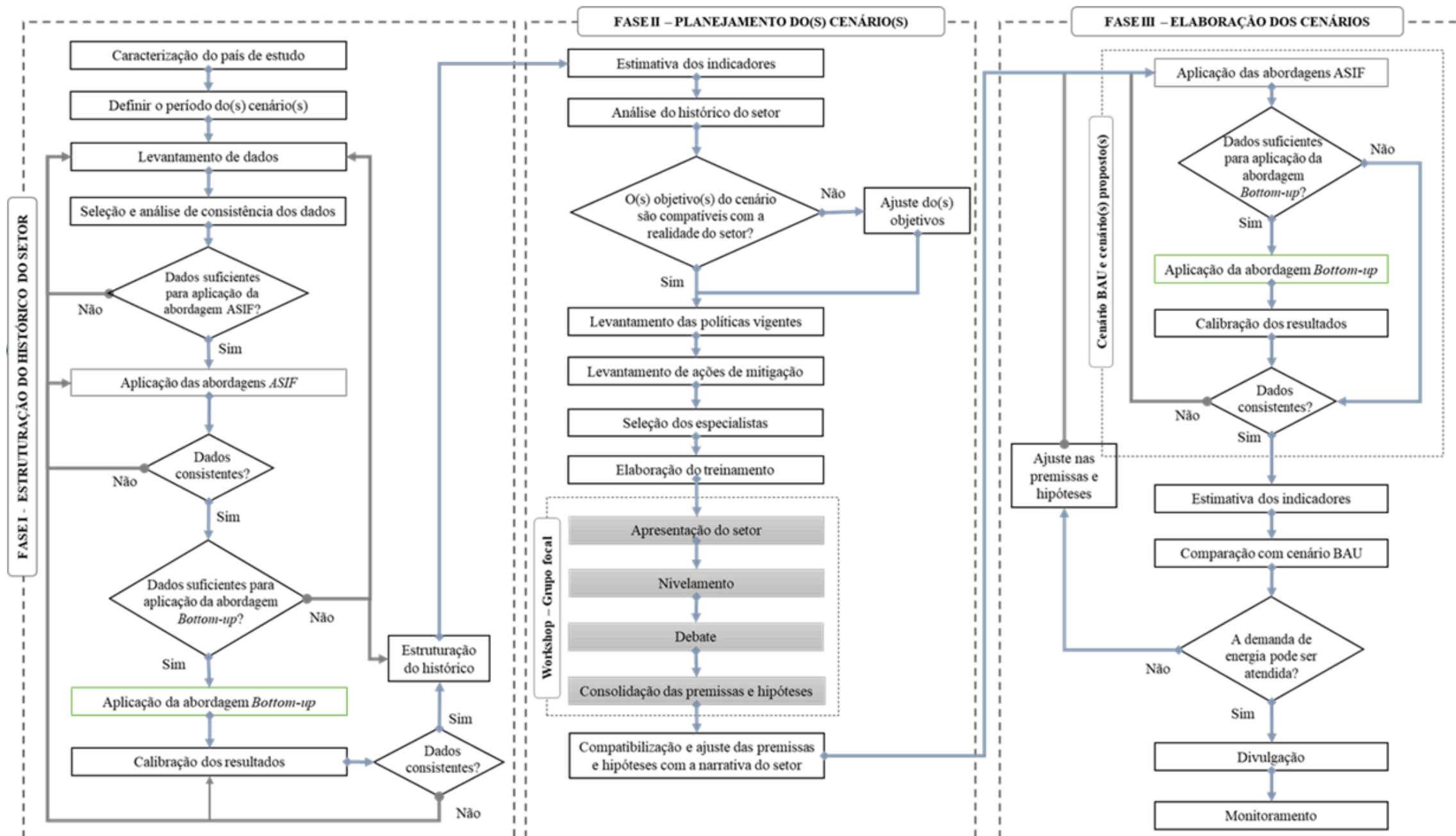


Figura 4. Método TEMA.

Fonte: MCTI, 2024.

Assim, por meio da aplicação do TEMA, a partir das premissas macroeconômicas detalhadas na Tabela 1 e nas premissas apresentadas na Tabela 2, foi possível estimar um Cenário de Referência para o setor de transportes. Destaca-se que as premissas macroeconômicas e setoriais foram discutidas com inúmeros atores-chave por meio de eventos (*Workshop* Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes, organizado pelo LTC/PET/COPPE/UFRJ), aplicações de formulários estruturados, condução de entrevistas semiestruturadas, inclusive, com o governo federal, por meio de representantes do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), Ministério das Cidades (MCID), Ministério de Minas e Energia (MME) e Ministério dos Transportes (MT).

Tabela 1. *Premissas macroeconômicas.*

Aspecto	Premissas
Demografia	Projeção da população alinhada com IBGE (2024), com 218,4 milhões de habitantes em 2050; População atinge pico em 2041 (220 milhões), mas população em idade ativa atinge pico já em 2035.
Petróleo	O preço do petróleo utilizado no presente estudo está alinhado com o cenário Announced Policies (APS), da Agência Internacional de Energia (WEO, 2024). Este é um cenário de preços intermediário, e viabiliza o pré-sal. Como resultado, o petróleo passa de 82 USD/b em 2023 para 72 USD/b em 2030, 63 USD/b em 2040 e 58 USD/b em 2050.
Macroeconomia	Balança comercial equilibrada; Taxa de câmbio: Utilização de base histórica até 2024 e projeção do governo em que se desvaloriza lentamente até 2050, e passa de uma média de 5,39 R\$/US\$ em 2024 para 5,61 R\$/US\$ em 2030, 6,18 R\$/US\$ em 2040 e 6,82 R\$/US\$ em 2050; Taxas médias anuais de crescimento do PIB com viés otimista: 2021-2030: 3,0%; 2031-2040: 2,9%; 2041-2050: 2,8% O setor agrícola continua ampliando, de forma gradual, sua participação no PIB, enquanto o país vivencia um processo de reindustrialização verde, em consonância com as diretrizes do Plano de Transição Ecológica.

Fonte: Adaptado de Centro Clima (2026).

Tabela 2. *Premissas consideradas no Cenário de Referência.*

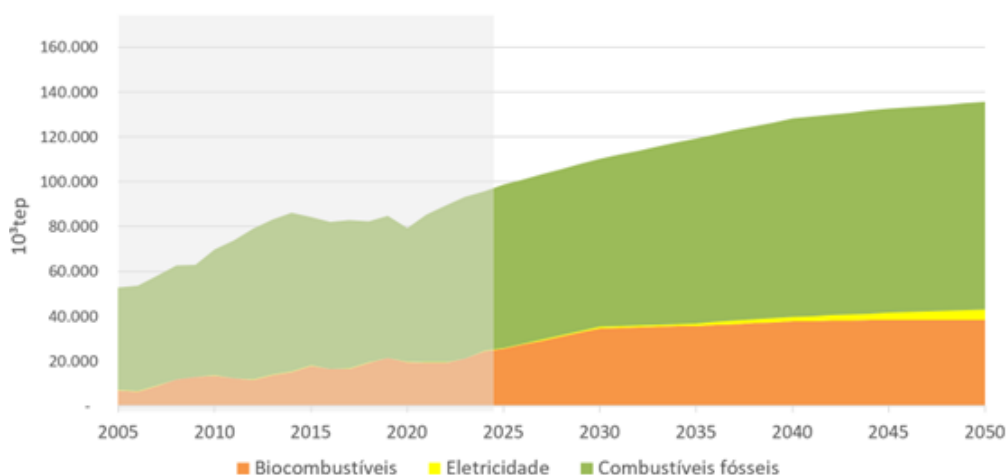
Aspecto	Cenário Referência
Transporte individual	Manutenção da tendência
Etanol hidratado (Média do horizonte projeto-2050)	~ 37% de usuários de veículos flex irão optar por abastecer com etanol hidratado
Mistura regulamentada – biocombustíveis (2030-2050)	Biodiesel (Rodo e Ferro) – 20% - 20% Biodiesel (aquaviário) – 0% - 0% HVO (Rodo e Ferro) – 0% - 0% Etanol anidro – 30% - 30% SAF – 1% - 3%

Tabela 2 Continuação. Premissas consideradas no Cenário de Referência.

Aspecto	Premissas
Mobilidade elétrica	Foco nos veículos híbridos full (HEV) flex para o transporte individual e elétricos a bateria (BEV) para o transporte coletivo urbano e para o transporte urbano de cargas (TUC)
Infraestrutura de transporte de carga e mudança modal	Cenário 4 do PNL Participação do modo rodoviário (2050): 65%
Otimização logística (Carga) (2050)	4% na redução dos deslocamentos
Atividade adicional do transporte ativo (2050)	Tendencial
Eficiência energética e Captação de usuários para modalidades menos intensivas em carbono	Continuidade e avanços no Mover, PBEV, PLVB e Despoluir Conclusão de obras em andamento do PAC/Avançar (BRT, VLT, metrô e trens) Redução progressiva da necessidade de realização de viagens (Home office, IoT etc.) e melhoramento da eficiência do sistema de transportes

Fonte: Elaboração própria.

Isto posto, a Figura 5 apresenta a estimativa de demanda energética do setor de transportes até 2050, dividida em Combustíveis fósseis, Biocombustíveis e Eletricidade. Analisando a Figura 5, é observado que, embora se espere que a atividade de transporte de passageiros e cargas quase dobre (~98%) entre 2024 e 2050, a demanda energética projetada para esse mesmo período é de 41%, impulsionada principalmente pelo transporte de cargas, que deve crescer 56%, enquanto o transporte de passageiros tem previsão de aumento de apenas 30%.

**Figura 5.** Demanda energética estimada para o setor de transportes, Cenário de Referência.

Fonte: Elaboração própria.

Consequentemente, a Figura 6 projeta a evolução das emissões segregadas entre transporte de passageiros e de carga. Nota-se uma mudança estrutural no perfil do setor, as emissões provenientes do transporte de carga, que ultrapassaram as de passageiros durante a pandemia, consolidam essa predominância ao longo de todo o horizonte temporal analisado.

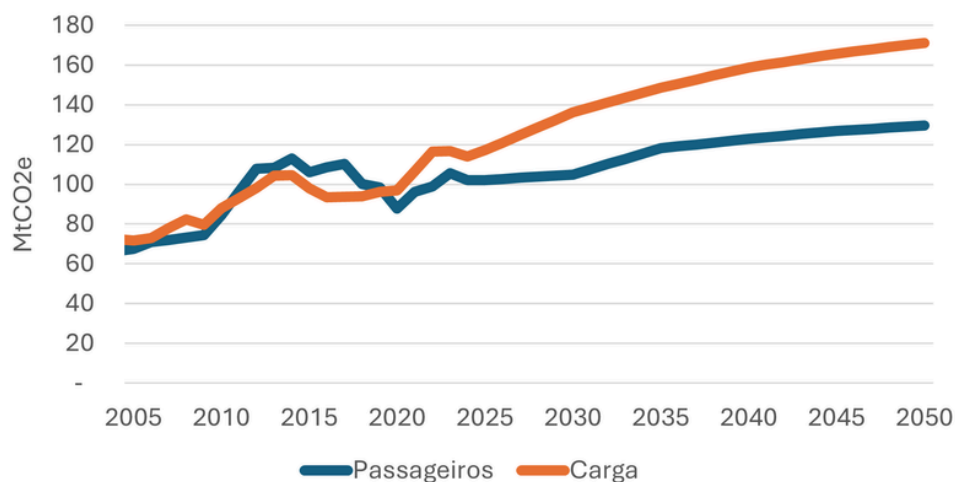


Figura 6. Estimativa de demanda energética de transportes por atividade.

Fonte: Elaboração própria.

Ao restringir a análise aos segmentos contemplados neste estudo, a Figura 7 projeta uma elevação agregada de aproximadamente 45% nas emissões entre 2024 e 2050. Na desagregação modal, observa-se crescimento de 42% no transporte aéreo, 43% no rodoviário e expressivos 85% no marítimo (dado o aumento esperado em sua participação na divisão modal). Contudo, em termos absolutos, o modo rodoviário mantém sua hegemonia, concentrando cerca de 95% desse volume. Sob as premissas do Cenário de Referência, projeta-se que esses segmentos passem a responder por 52% de todas as emissões do setor de transportes nacional em 2050.

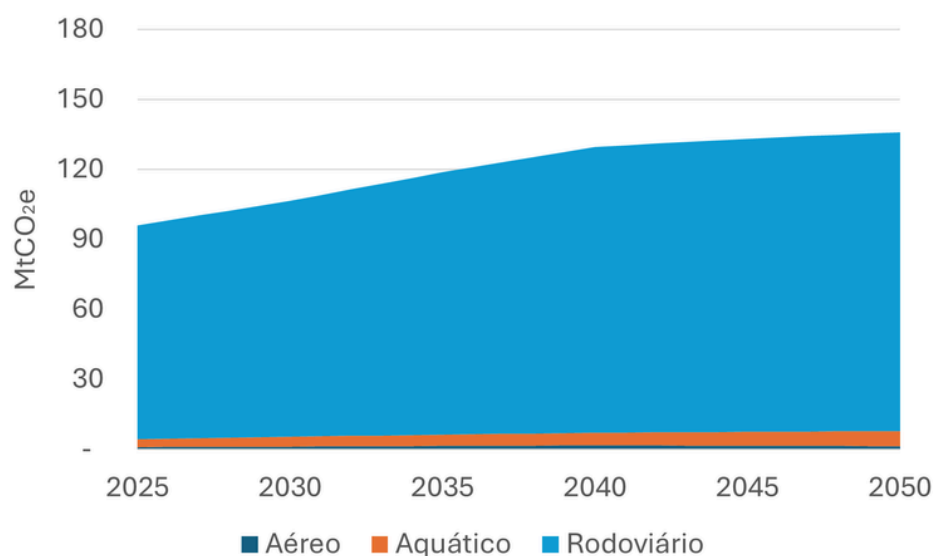


Figura 7. Estimativa de emissões considerando apenas os segmentos de transportes do Roadmap.

Fonte: Elaboração própria.

Diante desse panorama, é evidenciada a necessidade de introduzir novos instrumentos de mitigação para estes segmentos, bem como intensificar a aplicação das políticas já vigentes. A seguir, serão detalhadas e simuladas as propostas que compõem os cenários alternativos de descarbonização deste *Roadmap*, visando reverter a trajetória ascendente projetada no cenário de referência.

3. MEDIDAS PROPOSTAS

Com base na pesquisa feita com os especialistas (LTC, 2025), houve a definição das medidas principais para aprofundamento em cada modo. A seguir, esta seção apresenta o panorama atual das medidas propostas, a matriz de risco associada a medida e cenário prospectivo com a implementação da medida.

3.1 Modo Rodoviário

O modo rodoviário foi responsável por 71% da atividade de transporte de cargas do Brasil em 2023, mas por ser o segundo modo menos eficiente em energia por tonelada-km, isto levou ao modo ser responsável por 93% do consumo energético do transporte de cargas brasileiro (EPE, 2024).

O diesel é responsável por 99% da demanda energética do transporte de cargas do Brasil (EPEa, 2024). O uso de biocombustíveis é a principal alternativa ao uso de combustíveis fósseis para o transporte rodoviário de carga.

Para a descarbonização do transporte rodoviário de longa distância, tanto para o horizonte 2035 quanto para 2050, as medidas que devem ser o foco principal são: adoção de frota movida a gás, impulsionada pelo uso do biometano, seguida pelo uso de biodiesel.

Panorama nacional do biometano

Panorama do Biogás no Brasil Referente ao Ano de 2024

Segundo o panorama da CIBiogás (2025) relativo ao ano de 2024, no Brasil há 1.633 plantas cadastradas, das quais 1.587 estavam em operação, somando 4,7 bilhões Nm³/ano de capacidade instalada, sendo 641 milhões Nm³/ano efetivamente em operação. A origem por fonte de substrato é majoritariamente proveniente de resíduos sólidos urbanos (RSU) e esgoto (60% da capacidade instalada), seguida pela indústria (20%) e agropecuária (17%). No uso energético, a eletricidade é predominante com cerca de 59%, porém o biometano já responde por 37%, sinalizando sua consolidação como um destino estratégico para a cadeia, enquanto o uso para energia térmica representa apenas 4%. O setor apresenta alta concentração da capacidade instalada em plantas de grande porte, com apenas 7,3% do total, sendo responsáveis por 76% da capacidade. A liderança regional é dividida, com São Paulo à frente em capacidade instalada e o Paraná em números de plantas, reforçando a relevância da expansão do biometano no país.

Panorama do Biogás ao Biometano

O setor contava com 79 plantas de purificação de biogás para biometano, totalizando uma capacidade de cerca de 667 milhões de Nm³/ano. O avanço das tecnologias de *upgrading* (purificação do biogás) permitiu atingir purezas superiores a 96% de metano. Esse fator viabiliza o biometano como combustível renovável em veículos, seja na forma de BioGNV (Gás Natural Veicular de origem renovável) ou de BioGNL (Gás Natural Liquefeito de origem renovável) (CIBiogás, 2025).

O Panorama do Biometano (EPE, 2023) destaca que a viabilidade do setor depende de alguns fatores como a proximidade com a demanda e as redes de gás natural, a formação de *hubs* e *clusters* regionais e o maior aproveitamento de resíduos subutilizados, como a vinhaça e a torta de filtro do setor sucroenergético. Além disso, são essenciais condições regulatórias e contratuais que assegurem o escoamento e a valorização de combustível, incluindo contratos de fornecimento e chamadas públicas de distribuidoras de gás. Esses elementos reforçam que a viabilidade do biometano não está restrita ao domínio tecnológico, mas é condicionada por aspectos de mercado, logística e regulação.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2025) destaca que o Brasil possui condições de triplicar sua produção de biogás e biometano até 2035, impulsionado pela necessidade de reduzir emissões em setores de difícil mitigação. Nesse contexto, o transporte rodoviário de cargas se destaca como destino estratégico, dada a elevada dependência nacional do diesel e as barreiras ainda existentes para a eletrificação de longa distância. Assim, o biometano é reconhecido como um vetor chave da transição energética no país, com potencial para substituir combustíveis fósseis no segmento de maior impacto climático.

Perspectivas de Expansão e Potencial de Crescimento

As perspectivas de expansão do biometano no Brasil indicam um crescimento acelerado, levando em consideração os empreendimentos já autorizados, os processos de autorização em curso junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e em um vasto potencial de substratos ainda subutilizados. Segundo o Panorama do Biogás 2024, a oferta poderá triplicar até 2026, com a entrada em operação de 30 novas unidades, representando um aumento de cerca de 107% para o ano de 2025 e de 193% no acumulado entre 2024 e 2026 (CIBiogás, 2025).

O Panorama de Biometano aponta que o setor sucroenergético sozinho tem potencial para alcançar até 6,1 bilhões Nm³/ano até 2033, com a ampliação do uso de resíduos como vinhaça, torta de filtro e palha (EPE, 2023). Esse cenário de longo prazo é corroborado por análises internacionais: a IEA destaca o Brasil como uma das economias emergentes com maior capacidade técnica para expansão do biometano, mas alerta para a subutilização atual da fonte. Em 2022, apenas 0,7 bilhões m³ equivalentes foram produzidos, majoritariamente oriundos de aterros sanitários, enquanto mais de 75% das emissões de metano provenientes de resíduos urbanos permanecem sem aproveitamento energético (IEA, 2025).

As projeções indicam que o maior potencial brasileiro está relacionado aos resíduos da cana-de-açúcar, em especial a vinhaça e o bagaço, que despontam como a principal rota de expansão futura. Em seguida, aparecem as rotas da biomassa lenhosa, dos

Marcos Regulatórios e Instrumentos de Incentivo

A inserção regulatória do biometano no Brasil integra-se às políticas climáticas e energéticas voltadas à redução de emissões atmosféricas e à diversificação da matriz energética nacional. A partir dos anos 2000, leis, decretos e resoluções instituíram um marco regulatório, desde diretrizes gerais até normas técnicas e incentivos fiscais, consolidando-o como vetor estratégico da transição energética e tecnológica nacional.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009) foi um marco regulatório que criou a base climática para políticas de baixo carbono (BRASIL, 2009). No campo técnico, a ANP consolidou em 2022 as Resoluções nº 886 e 906, que padronizaram a qualidade do biometano de diferentes origens para garantir sua intercambialidade com o gás natural, a fim de viabilizar o uso em frotas veiculares e sua injeção na rede (ANP, 2022a; ANP, 2022b). No âmbito de incentivos econômicos, o RenovaBio (Lei nº 13.576/2017) institui um mercado de Créditos de Descarbonização (CBios) que recompensa a baixa intensidade de carbono da produção de biocombustíveis (BRASIL, 2017). A Nova Lei do Gás (Lei nº 14.134/2021) assegurou acesso à infraestrutura, ampliando as condições de escoamento e comercialização (BRASIL, 2021). O Decreto nº 11.003/2022 instituiu a Estratégia Federal para ampliar o uso de biogás e biometano, que reflete diretamente na aplicação do combustível no transporte pesado (BRASIL, 2022). O marco mais recente, é constituído pela Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024) e seu decreto regulamentador (nº 12.614/2025), que institucionaliza instrumentos de fomento e rastreabilidade, consolidando de forma definitiva o biometano como vetor para descarbonização do transporte rodoviário de longa distância (BRASIL, 2024; BRASIL, 2025).

Descarbonização e Fatores de Emissão

O biometano surge como medida prioritária de modo a colaborar para a descarbonização do setor de transporte rodoviário de cargas de longa distância, conforme apontado pelos *stakeholders* no formulário de consulta, no qual foi indicada a adoção de frota a gás (GNV/biometano) como uma das principais medidas para o horizonte 2035 e 2050.

O potencial de descarbonização é comprovado pelos fatores de emissão do combustível, que indicam que o biometano apresenta um desempenho ambiental significativamente superior aos dos combustíveis fósseis. Com poder calorífico inferior (PCI) de 48,25 MJ/kg (36,67 MJ/m³), ligeiramente inferior ao do GNV (49,79 MJ/kg; 36,84 MJ/m³), o biometano (96,5% de metano) é capaz de manter a alta eficiência energética e desempenho técnico, ao mesmo tempo em que reduz drasticamente as emissões no ciclo completo do poço-à-roda (*well-to-wheel* - WTW), 8,35 gCO₂e/MJ, contra 79,06 gCO₂e/MJ do diesel B14 (EPE, 2025a). Essa diferença representa uma redução próxima a 90% nas emissões fósseis, resultado da origem renovável do biometano, originado da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.

A intensidade de carbono do biometano tem como base as certificações vigentes no âmbito do RenovaBio (março de 2025), que registram quatro unidades produtoras certificadas, todas com 100% do volume elegível. As certificações comprovam o potencial de descarbonização do biometano, com intensidade média de 8,35 gCO₂e/MJ, valor assumido a partir de 2024 e mantido constante ao longo do período, evidenciando

a consistência e estabilidade do seu desempenho ambiental (EPE, 2025a). Além disso, ao comparar com a intensidade média de carbono do transporte rodoviário pesado em 2024, estimada em 78,9 gCO₂e/MJ (EPE, 2025a), o biometano segue representando redução aproximada de 90% nas emissões, evidenciando seu elevado potencial de abatimento de GEE frente à média de carbono do transporte rodoviário pesado.

Os fatores de emissão no uso (queima) são calculados fundamentados na metodologia do RenovaCalc, ferramenta oficial do RenovaBio para quantificação das emissões de GEE no ciclo de vida dos combustíveis. Nesse sentido, o biometano apresenta fator de emissão de 3,48 gCO₂eq/MJ, enquanto o GNV emite 57,81gCO₂eq/MJ e o diesel A (B0) 74,43 gCO₂eq/MJ (EPE, 2025a). Dessa forma, o biometano se posiciona como vetor estratégico para transição energética e descarbonização do transporte rodoviário de cargas de longa distância, por representar uma combinação entre alta eficiência energética e reduzidas emissões de GEE.

Panorama nacional do biodiesel

Atualmente o biodiesel convencional é a estratégia principal para a descarbonização do transporte, com a mistura regulamentada por lei, o diesel comercializado nos postos já conta com 15% de biodiesel em sua mistura, formando o Diesel B15 (ANP, 2025a). A Lei do Combustível do Futuro nº 14.993/2024 (BRASIL, 2024) estabelece como meta de percentual de adição obrigatória de 20% de biodiesel na mistura de diesel para 2030, além disso temos outros instrumentos regulatórios que consolidam o uso do biodiesel como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).

Oferta e demanda

A indústria nacional do biodiesel já é bem estabelecida, atualmente conta com 58 usinas produtoras de biodiesel do tipo FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) em 2025 (EPE, 2025a). A capacidade de produção nacional de biodiesel é de 14,7 bilhões de litros para 2025, sendo que 10,1 bilhões de litros é para atendimento do biodiesel mandatário na mistura do diesel fóssil (EPE, 2025b).

A expectativa é que exista um crescimento de cerca de 40% entre 2025-2035 da demanda de biodiesel devido ao aumento mistura obrigatória no biodiesel para o transporte rodoviário e adição ao transporte aquaviário (EPE, 2025b). Um forte impulsionador do contínuo aumento da demanda por biodiesel é a dificuldade para inserir a motorização alternativa (ex.: eletrificação) no transporte rodoviário semipesado e pesado de cargas (EPE, 2025c), sendo estes dois segmentos responsáveis por cerca de 78% dos novos emplacamentos em 2024 (ANFAVEA, 2025), demonstrando seu impacto no consumo de diesel e biodiesel.

Desafios

Um dos desafios para a expansão do biodiesel é a resistência de alguns setores frente a possíveis problemas operacionais decorrentes de misturas mais elevadas ao diesel. Para avaliar essa questão, o MME (2025) elaborou um Plano de Testes focado em validar a viabilidade técnica dos novos teores.

Outro desafio relevante é a vulnerabilidade agrícola, uma vez que a principal matéria-prima é a soja, qualquer quebra na safra ou disparada no preço das *commodities* tem

tem reflexão direto no preço do biocombustível, gerando impactos inflacionários (EPE, 2025b).

3.2 Modo Marítimo

Panorama nacional do transporte marítimo

A descarbonização do transporte aquaviário é uma frente crucial para a agenda climática brasileira. Embora seja significativamente menos poluente que o modo rodoviário (emitindo cerca de cinco vezes menos dióxido de carbono equivalente por tonelada-quilômetro útil - CO₂ e/TKU), o setor ainda é responsável por cerca de 1,8% do volume total de emissões CO₂ e do setor de transportes no Brasil (Coalizão dos Transportes, 2025). As emissões são majoritariamente geradas pela queima de combustível pelas embarcações (Müller-Casseres *et al.*, 2021; Coalizão dos Transportes, 2025).

Em relação as estratégias de descarbonização para o setor (navegação de longo curso, cabotagem e interior), elas podem ser agrupadas em três grandes vetores: melhorias de eficiência operacional e tecnológica, adoção de combustíveis alternativos e soluções *Power-to-X* (PtX), e investimentos em infraestrutura portuária (Müller-Casseres *et al.*, 2021; Coalizão dos Transportes, 2025).

Metas e Diretrizes Internacionais

A Estratégia da IMO estabelece metas ambiciosas para a descarbonização global do transporte marítimo, tendo como objetivo final atingir a neutralidade carbônica (Net Zero) até 2050 (EPE, 2025c). Este plano prevê a redução das emissões totais de gases com efeito de estufa (GEE) em, pelo menos, 20% (com a ambição de chegar aos 30%) até 2030, e de 70% (visando os 80%) até 2040, tendo como referência os níveis registrados em 2008 (Coalizão dos Transportes, 2025).

Para a concretização destas metas, a IMO impõe a comunicação do Índice de Eficiência Energética (EEXI), que avalia a concepção das embarcações, e do Indicador de Intensidade de Carbono Operacional (CII), responsável por monitorizar a intensidade de carbono (Coalizão dos Transportes, 2025). Com efeito, estas métricas formam a base da monitorização e do progresso regulamentar no setor marítimo internacional, gerando repercussões diretas no transporte marítimo brasileiro.

Eficiência Energética e Operacional

O setor marítimo vem se mobilizando para atender aos marcos regulatórios internacionais estabelecidos pela IMO, que visam reduzir as emissões de GEE e promover a transição para uma navegação sustentável. Como parte desse esforço global, foram definidas diversas medidas de eficiência energética voltadas à otimização das embarcações e das operações portuárias (Coalizão dos Transportes, 2025):

- **Otimização das Embarcações:** Envolve ações como a redução da velocidade média das embarcações (*slow steaming*), a otimização do *trim* e do lastro, a limpeza periódica de casco e hélice e a manutenção aprimorada dos motores (EPE, 2024a). Essas práticas contribuem diretamente para a redução do consumo de combustível e, consequentemente, das emissões.
- **Tecnologias de Design e Propulsão:** A descarbonização também pode ser impulsionada pela adoção de tecnologias inovadoras, como os sistemas de propulsão à vela assistida (*Wind Assisted Propulsion Systems – WAPs*), além do aprimoramento do design das embarcações, com o uso de materiais mais leves e melhorias no desempenho hidrodinâmico (Coalizão dos Transportes, 2025).
- **Otimização Logística:** Inclui o uso de roteamento meteorológico (EPE, 2024a) e de ferramentas inteligentes para otimização de rotas e alocação de frota (Coalizão dos Transportes, 2025). Essas estratégias buscam maximizar a eficiência operacional e reduzir o tempo e o consumo energético nas viagens marítimas.

Combustíveis Alternativos e Power-to-X

A penetração de combustíveis de baixo carbono é fundamental para o cumprimento das regulamentações estabelecidas pela IMO (EPE, 2024a). Considerando que a agenda de descarbonização é um movimento global (Petrobras, 2025), as diretrizes da IMO têm desempenhado papel central no estímulo à adoção de combustíveis alternativos no transporte marítimo.

Biocombustíveis

O setor marítimo pode empregar biocombustíveis como alternativa ao diesel fóssil ou ao bunker tradicional (Petrobras, 2025):

- **Biodiesel:** A ampliação do uso de biodiesel como componente de mistura representa uma opção viável para reduzir emissões (Coalizão dos Transportes, 2025), sem necessidade de adaptações estruturais nas embarcações. Trata-se de uma alternativa consolidada no contexto da transição energética, configurando-se como um dos caminhos naturais para a descarbonização do setor de transportes (Petrobras, 2025). A Petrobras já realizou testes e comercializa o VLS B24, um *bunker* com 24% de biodiesel (EPE, 2025b), além de ter conduzido testes comerciais com *biobunker*, combustível marítimo com conteúdo renovável, contendo até 24% de fração renovável entre 2023 e 2024 (Petrobras, 2025).
- **Outras Fontes:** Outros biocombustíveis, como etanol, biometanol e HVO (óleo vegetal hidrotratado), também se apresentam como alternativas promissoras (Coalizão dos Transportes, 2025). O etanol, em particular, pode aproveitar as adaptações e os estudos desenvolvidos para o uso de metanol em navios (EPE, 2025b), e sua reforma representa uma rota tecnológica relevante para a produção de hidrogênio (EPE, 2023). Além disso, o GNL e o Bio-GNL se destacam como combustíveis de transição (EPE, 2024a; Coalizão dos Transportes, 2025). O biometano, por sua vez, é um biocombustível gasoso capaz de interiorizar e descentralizar a oferta de gás (EPE, 2023), sendo reconhecido como uma alternativa consolidada para a transição energética no Brasil (Petrobras, 2025).

Infraestrutura e Viabilização

O aprimoramento da infraestrutura e dos processos portuários constitui uma estratégia essencial para reduzir as emissões e viabilizar a transição energética no setor marítimo.

- **Eficiência Portuária:** A modernização da infraestrutura e a facilitação do acesso aos portos são fundamentais para reduzir o tempo médio de espera e atracação das embarcações, contribuindo diretamente para a diminuição das emissões operacionais.
- **Eletrificação em Terra:** A implementação de sistemas de *On-Shore Power Supply* (OPS) nas operações portuárias é necessária para permitir que as embarcações desliguem seus motores auxiliares durante o período de atracação, reduzindo o consumo de combustível e as emissões associadas (Coalizão dos Transportes, 2025).
- **Abastecimento Limpo:** É imprescindível que os portos disponibilizem opções de abastecimento com combustíveis de baixo carbono, como tanques criogênicos para GNL e estruturas adequadas para biodiesel (Coalizão dos Transportes, 2025). Um exemplo é a *Wilson Sons*, que, alinhada às novas regulamentações, está implantando rebocadores capazes de reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio em até 75% (Coalizão dos Transportes, 2025).
- **Incentivos Globais:** A IMO propôs a criação do *IMO Net-Zero Fund*, destinado a incentivar a adoção de embarcações de baixa emissão e apoiar países em desenvolvimento no processo de transição para combustíveis mais limpos (EPE, 2025b).

3.3 Modo Aéreo

O transporte aéreo de cargas foi responsável de cerca de 1% do consumo energético do transporte no Brasil em 2024, com expectativa de permanecer nesse mesmo patamar para 2034 (EPE, 2024a). Este modo, embora seja o mais intenso em energia, representou apenas 0,04% da movimentação de carga em 2024, com projeção de aumentar para 0,05% em 2034 (EPE, 2024a).

Panorama nacional do SAF

O transporte aéreo (carga e passageiro) foi responsável por aproximadamente 4% das emissões de GEE no Brasil em 2023 (Coalização dos Transportes, 2025). Em um cenário de inação (Business-as-Usual - BAU), as emissões do setor aéreo podem atingir 13,4 milhões de toneladas de CO₂e em 2050 (Coalização dos Transportes, 2025). O uso de SAF é apontado pelos estudos (EPE, 2025b; Coalização dos Transportes, 2025; Petrobras, 2025) como a principal alternativa para a descarbonização do modo.

O Brasil possui grande potencial para se destacar na produção e uso de SAF, dada a sua vasta experiência com biocombustíveis e a disponibilidade de matérias-primas (EPE, 2024b). Atualmente, o debate está focado em como viabilizar a produção e o consumo em larga escala, considerando os desafios de custo, infraestrutura e regulação (Coalização dos Transportes, 2025).

Rotas Tecnológicas e Matérias-Primas

Diversas rotas tecnológicas para a produção de SAF estão sendo consideradas no Brasil (EPE, 2025b). As principais são:

- **HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*):** Utiliza óleos vegetais e gorduras animais.
- **AtJ (*Alcohol-to-Jet*):** Converte álcoois, como o etanol, em querosene de aviação.
- **FT (*Fischer-Tropsch*):** Produz combustíveis a partir de gaseificação de biomassa.

A rota principal para 2035, curto-médio prazo, é a produção a partir de óleo e gorduras (rota HEFA). Devido a sua maturidade, a rota HEFA é considerada a opção mais competitiva e possui implementação mais rápida, ainda mais pela possibilidade de utilizar a capacidade ociosa das refinarias existentes e aproveitar matérias-primas já consolidadas no país, como o óleo de soja e o sebo bovino (Da Costa, Gonçalves e D'Agosto, 2025; EPE, 2025b).

A longo prazo (2050), espera-se que com o avanço da eletrificação dos veículos leves, exista uma redução na demanda por etanol (anidro e hidratado), onde este excedente poderá ser direcionado para a produção de SAF via AtJ, tornando-se uma rota fundamental e complementar a HEFA para expandir a oferta de SAF no Brasil a longo prazo (Da Costa, Gonçalves e D'Agosto, 2025), o que dá uma vantagem competitiva para o Brasil.

Oferta, Demanda e Desafios

A Petrobras, enquanto principal player do setor de energia no Brasil, tem um papel estratégico a desempenhar no avanço da oferta e uso de SAF. Em seu plano estratégico para 2050, a empresa define que espera fornecer cerca de 44 milhões de barris por dia (mbpd) de SAF em suas plantas dedicadas a partir de 2029, através da rota HEFA (19 mbpd – em avaliação; 15 mbpd – em implementação) e AtJ (10 mbpd – em avaliação) (Petrobras, 2025).

Os principais desafios para a consolidação do SAF no Brasil incluem:

- **Custo de produção:** O SAF ainda é mais caro que o querosene de aviação convencional, podendo custar até cinco vezes mais que o querosene tradicional (Observatório do Clima, 2024).
- **Escala de produção:** São necessários grandes investimentos para construir biorrefinarias e garantir o fornecimento de matéria-prima, principalmente pela competição com outros biocombustíveis pela mesma (EPE, 2025b).
- **Logística e infraestrutura:** É preciso adaptar a infraestrutura aeroportuária para o armazenamento e abastecimento com SAF (Coalização dos Transportes, 2025).

Políticas Públicas e Regulamentação

O desenvolvimento do mercado de SAF no Brasil depende de um arcabouço regulatório claro e de incentivos públicos. A Lei do Combustível do Futuro nº 14.993/2024 (BRASIL, 2024) instituiu o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), tornando-se o principal diretor para o fomento ao uso do SAF no Brasil, por meio dela ficou estabelecido o percentual mínimo de emissões de GEE a serem reduzidas anualmente pelos operadores aéreos, sendo o percentual de redução de 1% ao ano de 2028 até 2037.

A regulação precisa incentivar investimentos públicos e privados em combustíveis mais limpos e fomentar a infraestrutura necessária (Coalização dos Transportes, 2025). O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é um dos estudos fundamentais para orientar as políticas e os investimentos para o desenvolvimento do mercado de SAF no Brasil (EPE, 2024a; EPE, 2025c).

3.4 Estimativa do Cenário de Descarbonização

A integração das medidas tecnológicas e operacionais propostas nesta seção, cujos parâmetros de aplicação e cronogramas de implementação estão detalhados na Tabela 3, serviu como base para as novas simulações no modelo TEMA. O objetivo central desta etapa foi quantificar o impacto mitigador dessas intervenções sobre a trajetória quase inercial apresentada anteriormente (Cenário de Referência).

Tabela 3. Premissas consideradas no Cenário de Descarbonização proposto.

Modo	Medida	Cenário 2035	Cenário 2050
Rodoviário	GNV/ Biometano	Foco principal e prioritário, com aumento gradual na oferta de biometano	Amadurecimento da cadeia produtiva de biometano
Rodoviário	Biodiesel	Mistura regulamentada de 25%	Mistura regulamentada de 30%
Rodoviário	Diesel verde (HVO)	Mistura regulamentada de 5%	Mistura regulamentada de 20%
Rodoviário	Veículos a gás	Novos veículos - 7%	Novos veículos - 10%
Marítimo	Biocombustível	Biodiesel, etanol e HVO + etanol	Biodiesel, etanol e HVO + etanol
Marítimo	Biodiesel	Mistura regulamentada de 30%	Mistura regulamentada de 100%
Aéreo	SAF	HEFA	HEFA, AtJ e sintéticos (e-SAF)
Aéreo	SAF	Mistura regulamentada de 15% - Rota principal: HEFA	Mistura regulamentada de 50% - Rota HEFA e AtJ

Fonte: Elaboração Própria.

Como resultado dessa modelagem, a Figura 8 apresenta a evolução da demanda energética projetada para o Cenário de Descarbonização, estratificada por tipologia de fonte: combustíveis fósseis, biocombustíveis e eletricidade.

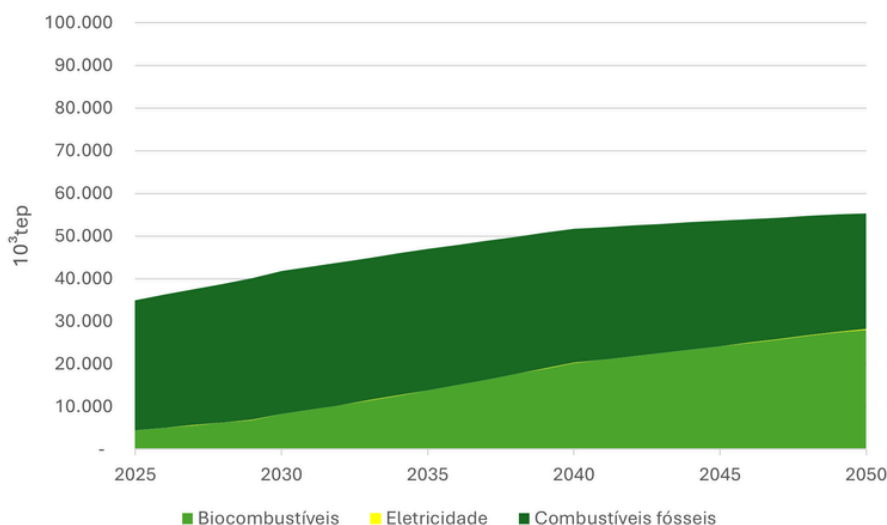


Figura 8. Demanda energética estimada para os segmentos analisados.

Fonte: Elaboração própria.

A análise da Figura 8 revela uma transformação estrutural na matriz energética projetada para o final do horizonte temporal. Em 2050, observa-se que os biocombustíveis assumem a preponderância no mix de consumo, alcançando 50,5% da demanda total e superando, ainda que por estreita margem, os combustíveis fósseis (49%). A participação marginal da eletricidade (0,5%) corrobora a complexidade tecnológica destes segmentos (*hard-to-abate*), onde a eletrificação direta enfrenta barreiras significativas para aplicações de longa distância e alta capacidade de carga.

Ao aprofundar a análise na desagregação por tipo de energético, conforme ilustrado na Figura 9, nota-se que a transição se apoia fortemente em biocombustíveis líquidos. Embora o diesel mineral permaneça como o energético individual de maior demanda, restando cerca de 45% de participação em 2050, sua hegemonia é atenuada pela penetração expressiva de seus substitutos renováveis como o biodiesel, respondendo por 29%, e o diesel verde (HVO), com 18%. Juntos, esses biocombustíveis consolidam a estratégia de descarbonização.

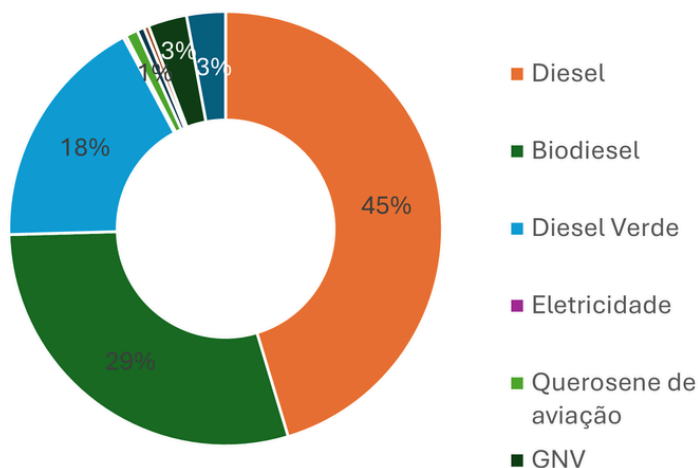


Figura 9. Participação por tipo de fonte energética em 2050, segmentos considerados do Roadmap.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 10 detalha a trajetória projetada das emissões por modo de transporte sob as premissas do Cenário de Descarbonização. Ao confrontar o horizonte de 2050 com o ano-base (2024), observa-se uma reversão da tendência histórica de crescimento, resultando em uma redução absoluta agregada de aproximadamente 10%.

A análise desagregada, contudo, revela disparidades significativas na capacidade de abatimento entre os modos. O transporte marítimo apresenta o desempenho mais notável, com uma redução projetada de 98%, indicando uma transição energética praticamente completa. O transporte aéreo também demonstra avanços expressivos, com corte de 40% em suas emissões.

Em contrapartida, o transporte rodoviário de carga apresenta uma redução mais modesta, de apenas 9%, sugerindo que o crescimento da demanda logística tende a consumir grande parte dos ganhos de eficiência e troca de combustível. Como consequência dessa dinâmica desigual, projeta-se uma extrema concentração das emissões remanescentes: em 2050, o modo rodoviário será responsável por cerca de 98% das emissões totais dos segmentos analisados neste estudo.

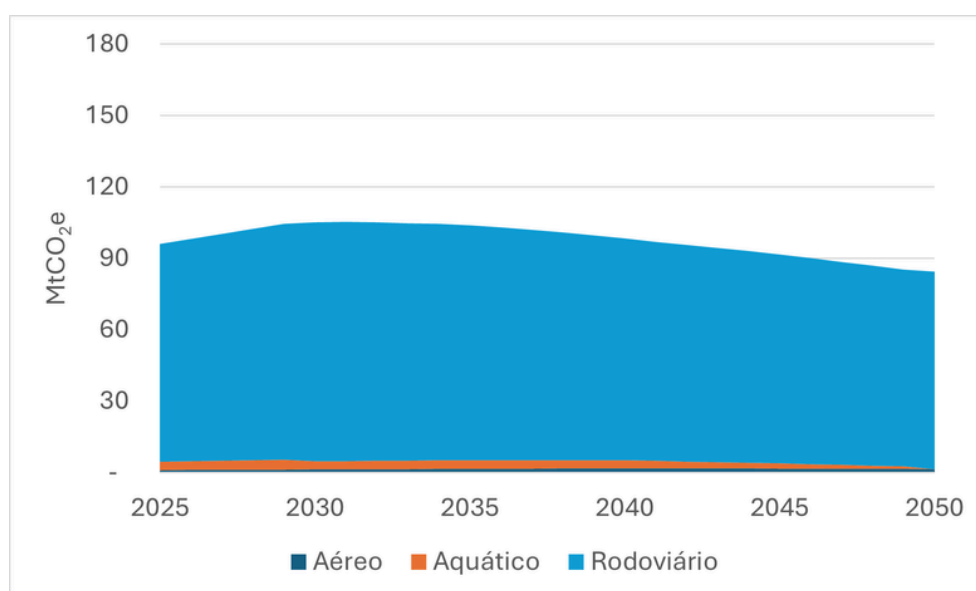


Figura 10. Estimativa de emissões por modo de transportes, Cenário de Descarbonização.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, realiza-se o confronto direto entre as estimativas do Cenário de Descarbonização e as projeções do Cenário de Referência, abrangendo tanto a demanda energética quanto as emissões associadas. Conforme ilustrado na Figura 11, a implementação das medidas propostas resulta em uma redução expressiva de 38% na demanda por combustíveis fósseis, evidenciando o deslocamento efetivo destas fontes pela entrada de renováveis.

Todavia, é fundamental qualificar que o Cenário de Descarbonização apresenta uma demanda energética total cerca de 4% superior à do Cenário de Referência. Este incremento não reflete aumento de atividade de transporte, mas sim características físico-químicas e operacionais da nova matriz: (i) a menor densidade energética (Poder Calorífico Inferior) do biodiesel em comparação ao diesel mineral e aos óleos combustíveis navais, exigindo maior volume para o mesmo trabalho; e (ii) a diferença de

rendimento térmico dos propulsores, notadamente o aumento da intensidade energética dos veículos a gás (GNV/Biometano) em relação aos seus equivalentes do Ciclo Diesel.

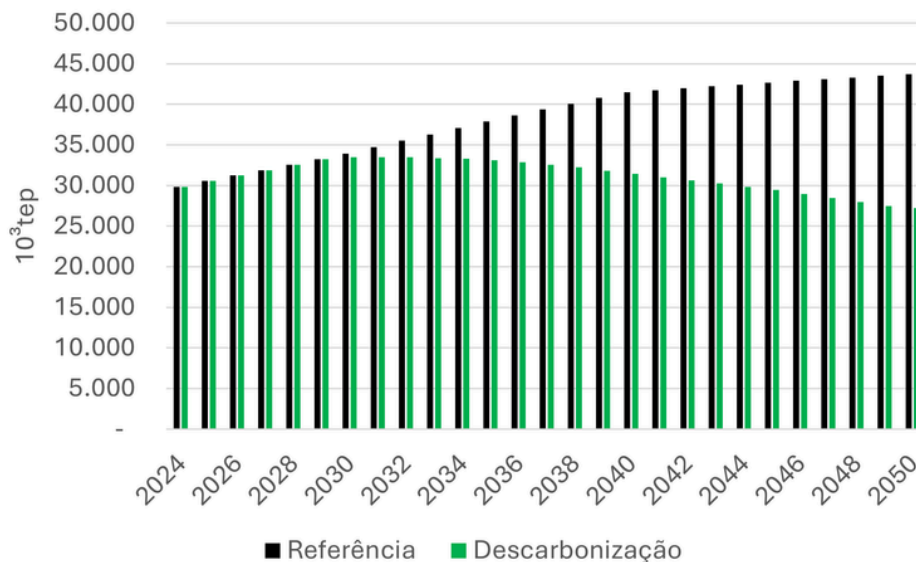


Figura 11. Comparação da demanda energética entre os cenários estimados.

Fonte: Elaboração própria.

Ademais, em relação às emissões (Figura 12), projeta-se uma redução de 38% em comparação ao Cenário de Referência. Este resultado evidencia um potencial de mitigação expressivo, particularmente significativo para setores de difícil abatimento, corroborando que as rotas traçadas neste estudo oferecem uma estratégia de descarbonização efetiva, fundamentada em medidas e taxas de penetração tecnicamente factíveis.

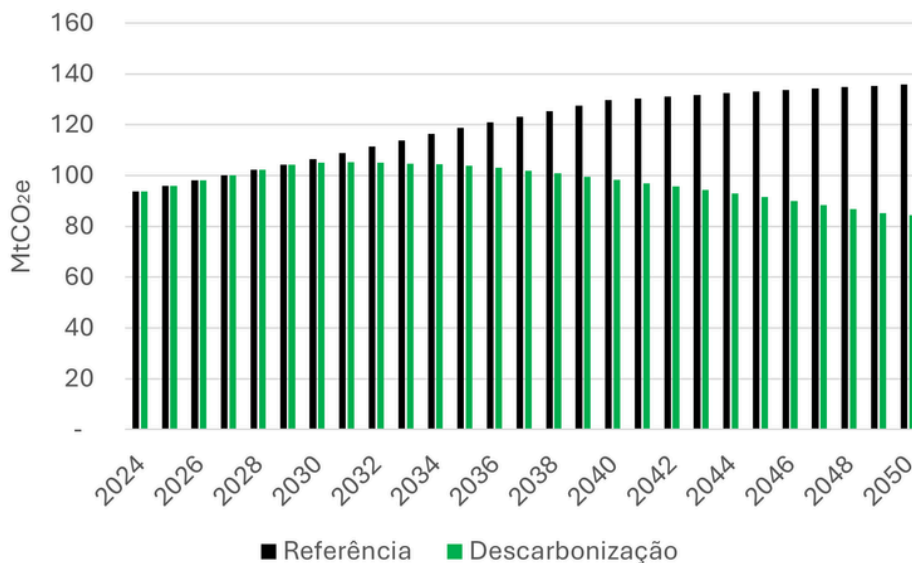


Figura 12. Comparação das emissões estimada entre os cenários analisados.

Fonte: Elaboração própria.

Adicionalmente, destaca-se que a viabilidade física dos cenários foi assegurada pela análise de segurança do suprimento. As demandas energéticas estimadas foram confrontadas com as expectativas de disponibilidade futura, integrando projeções de expansão do setor de energia (para fósseis e eletricidade), potencial de aproveitamento de resíduos (para a cadeia de biometano) e capacidade produtiva do setor AFOLU (para o fornecimento de biomassa aos biocombustíveis líquidos).

4. CAMINHOS PARA SUPERAR OS DESAFIOS

Mapeando e Superando Riscos

Durante a etapa de entrevista com especialistas, foram apresentados possíveis riscos que podem impactar o avanço da descarbonização do transporte pesado de cargas (LTC, 2025), com base nos resultados apontados pelos especialistas foram feitas recomendações para cada um dos modos com intuito de mitigar os riscos e barreiras enfrentadas (Tabela 4).

Tabela 4. Recomendações para avanço da agenda de descarbonização do transporte pesado de cargas.

Recomendação	Rodoviário	Marítimo	Aéreo
RC1 - Fortalecer a política de biocombustíveis	X	X	X
RC2 - Estabelecer um marco regulatório	X	X	X
RC3 - Promover e fortalecer a eficiência operacional	X	X	X
RC4 - Investir em infraestrutura de abastecimento	X		
RC5 - Apoiar a pesquisa e desenvolvimento	X	X	X
RC6 - Fornecer subsídios no curto prazo	X	X	X
RC7 - Monitorar e avaliar o progresso	X	X	X
RC8 - Investir em infraestrutura portuária		X	
RC9 - Promover a colaboração setorial		X	X
RC10 - Investir em infraestrutura aeroportuária			X
RC11- Fortalecer a capacidade produtiva de matéria prima	X	X	X
RC12 - Qualificação da mão de obra	X	X	

Fonte: Elaboração própria.

É notável dentre as recomendações que a definição de um marco regulatório (RC2) será peça chave para superar os desafios da descarbonização, é através dele que devem ser definidos os caminhos para atender a demanda energética gerada pelas soluções alternativas para a descarbonização do segmento, trazendo diretrizes claras sobre como se dará a alocação dos produtos por modo, isso é fundamental em um cenário onde há competitividade por biocombustíveis entre os modos e de matéria-prima (RC11) com outros setores. Além disso, a definição de um marco regulatório agrega segurança jurídica e previsibilidade ao processo, ao mesmo tempo que ajuda no fortalecimento da política de biocombustíveis (RC1) nacional, que é apontada como a solução imediata para curto e médio prazo, direcionando para onde alocar esforços e fornecer subsídios (RC6) no curto prazo.

A inovação será fundamental em um cenário de descarbonização, pois é através dela que é viabilizada a atualização/modernização das frotas (RC3) e instalações/infraestrutura (RC4; RC8; RC10) para receber os novos combustíveis, quando somada ao monitoramento e avaliação do progresso das ações (RC5), temos o fortalecimento da eficiência operacional e energética, contribuindo para a redução da demanda energética. Como resultado do avanço tecnológico, existe também a necessidade de qualificação da mão-de-obra (RC12) uma vez que lidar com as novas tecnologias exige novas competências técnicas que a força de trabalho atual pode não possuir.

De forma geral, o sucesso da mitigação de riscos depende de um equilíbrio entre políticas públicas (regulação e subsídios), tecnologia (P&D e biocombustíveis) e base material (matéria-prima, infraestrutura e corpo técnico).

Dessa forma, os riscos levantados foram consolidados e classificados de acordo com sua probabilidade de ocorrência e impacto potencial na agenda de descarbonização, permitindo compreender também de forma lúdica os fatores críticos e priorizar ações mitigadoras. A Figura 13, abaixo, apresenta a matriz de risco resultante da avaliação.

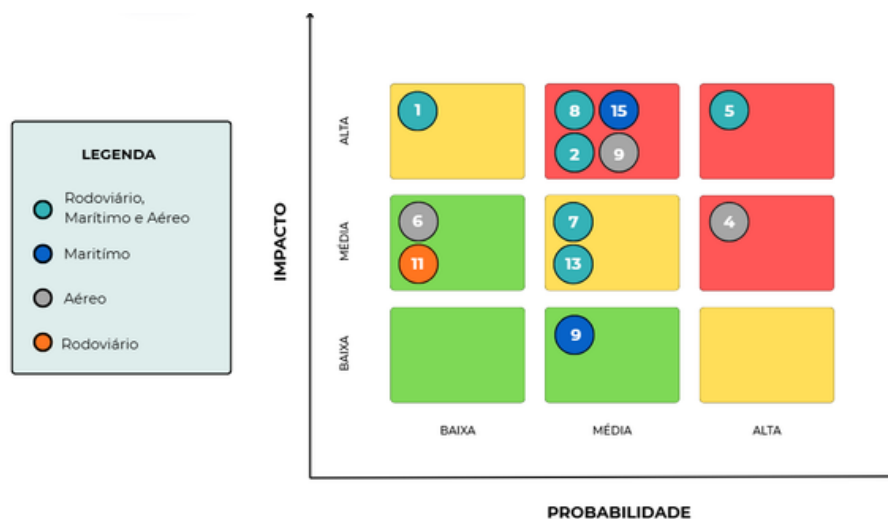


Figura 13. Matriz de risco.

Fonte: Elaboração própria.

Com base no resultado obtido a partir da pesquisa com especialistas (LTC, 2025) e do panorama dos modos de transporte analisados neste estudo, houve a elaboração de uma única matriz de risco (Figura 13) compreendendo os riscos mais relevantes, sendo a maior parte transversal, ou seja, impactando todos os modos e o restante impactando apenas um modo.

Os riscos que foram considerados de pouca ou nenhuma relevância para o *Roadmap* são os riscos 3, 10, 12, 14. Com relação a falta de consistência ambiental no médio e longo prazo (Risco 3), houve um entendimento que esse risco não se aplica de forma significativa ao contexto atual das estratégias de descarbonização dos modos analisados. As políticas setoriais e compromissos climáticos nacionais e internacionais tendem a mitigar cada vez mais esse tipo de inconsistência, no Brasil sendo reforçado pelo estabelecimento do Plano Clima (MMA, 2026). Além disso, as diretrizes do Combustível do Futuro (BRASIL, 2024) oferecem um horizonte de estabilidade ambiental, reduzindo a relevância dessa incerteza. Dessa forma, o risco foi considerado não aplicável à matriz consolidada.

Impacto negativo na balança comercial devido à necessidade de importação (Risco 10) no curto e médio foi avaliado como tendo pouca relevância no contexto atual, uma vez que os estudos (EPE, 2024a; Petrobras 2025) apontam que a dependência de importação não é significativa para os biocombustíveis analisados, já que o Brasil possui produção interna consolidada e capacidade de atender à própria demanda neste período. O impacto na balança comercial é desprezível, justificando a exclusão do risco da matriz consolidada.

No que tange o potencial *lobby* da cadeia automotiva nacional (Risco 12), embora reconhecido como um obstáculo estrutural, os pesquisadores avaliaram que a influência desse *lobby* tende a diminuir à medida que políticas globais e pressões de mercado incentivam a inovação tecnológica, como é o caso do Programa Rota 2030 (MDIC, 2020) e Programa MOVER (MDIC, 2024). Por essa razão, o risco foi classificado como não aplicável no curto prazo, mantendo-se sob observação para eventuais revisões futuras.

Perda de protagonismo da indústria nacional (Risco 14) é avaliado como um risco pouco provável de ocorrer no curto e médio prazo, pois a indústria brasileira de biocombustíveis e tecnologias associadas ainda mantém posição de destaque no cenário global, o Brasil é o segundo maior produtor de biocombustíveis do mundo (IEA, 2024). O país possui experiência consolidada em rotas como etanol e biodiesel, além de vantagem competitiva em recursos naturais. Apesar disso, o risco deve continuar sendo monitorado no longo prazo, já que a ausência de políticas industriais e tecnológicas consistentes pode levar à perda de competitividade frente a mercados emergentes e a novos biocombustíveis.

Os demais riscos mapeados neste estudo, foram considerados com relevância moderada a alta, compondo então a matriz de risco apresentada na Figura 13. A falta de qualidade do biocombustível (Risco 1) afeta diretamente todos os modos de transporte. A percepção dos especialistas indica que a qualidade do biocombustível é uma preocupação recorrente, principalmente pela necessidade de garantir a confiabilidade e o desempenho operacional dos veículos, embarcações e aeronaves. No entanto, a atuação da ANP na fiscalização das atividades integrantes das indústrias de produção dos combustíveis (ANP, 2020), mitiga parcialmente esse risco, o que justifica uma posição intermediária na matriz (caso ocorra causa um impacto alto, porém com probabilidade baixa de ocorrência).

O não atendimento das misturas regulamentadas (Risco 2) é transversal aos modos avaliados, com maior relevância para o modo rodoviário, devido à obrigatoriedade da mistura de biodiesel ao diesel fóssil (ANP, 2025a). A falha de fiscalização e inconsistências no cumprimento das metas de mistura podem comprometer o avanço

da descarbonização no modo rodoviário, sendo parcialmente mitigado pelo Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis (ANP, 2025b). Além disso, pode ocorrer a falta de oferta de biocombustíveis para atender os modos marítimos e aéreo (EPE, 2025). Embora seja um ponto de atenção, os especialistas consideram que a estrutura regulatória já está consolidada, reduzindo a probabilidade de ocorrência. Assim, o risco permanece em um nível moderado, refletindo a necessidade de vigilância constante, mas sem representar ameaça crítica no curto prazo.

O foco no mercado externo (Risco 4) é possui maior relevância para o modo aéreo, dado o potencial de o SAF ser direcionado prioritariamente para o mercado externo, onde há maior valor agregado e demanda. Essa tendência pode limitar a oferta e encarecer o produto no mercado doméstico. Apesar disso, no curto e médio prazo, espera-se que as políticas de incentivo à produção nacional e o fortalecimento da cadeia de suprimentos ajudem a mitigar o risco (BRASIL, 2024), o que justifica sua posição de impacto médio e a probabilidade alta de ocorrência na matriz. Esse risco foi classificado como exclusivo para o modo aéreo, desconsiderando os modos rodoviário e marítimo, pois as soluções domésticas para esses modos são consideradas mais baratas.

O impacto nos custos operacionais (Risco 5) é considerado transversal, pois o aumento dos custos operacionais impacta todos os modos de transporte, especialmente em momentos de transição energética e tecnológica. O modo marítimo foi destacado por apresentar custos iniciais mais elevados para adequação de infraestrutura e modernização da frota (UNCTAD, 2023). O risco foi posicionado como de alto impacto e alta probabilidade, uma vez que a incorporação de novos combustíveis e tecnologias tende a elevar despesas de operação, manutenção e investimento. A ausência de incentivos financeiros e subsídios adequados reforça a criticidade desse risco no curto e médio prazo.

A baixa escala de produção (Risco 6) é considerado como maior relevância no modo aéreo. Visto que, para o modo rodoviário e marítimo, foi considerado baixo ou não prioritário, já que a produção nacional de biodiesel (EPE, 2025b) e biometano (CIBiogás, 2025) vem se expandindo e possui diversidade de matéria-prima para produção de forma consolidada. Entretanto, no modo aéreo, o risco persiste no médio prazo, principalmente em função da necessidade de ampliar a escala de produção do SAF, que ainda se encontra em estágio inicial no Brasil (EPE, 2024b). Assim, o risco foi mantido em impacto médio e probabilidade baixa, refletindo uma preocupação futura e setorial, e não um entrave imediato.

A disponibilidade de matéria-prima para todos os produtos é considerada transversal, pois afeta todos os modos, embora com intensidade variável. A principal preocupação dos especialistas é o conflito entre a expansão dos biocombustíveis e a limitação de oferta de insumos, especialmente óleos vegetais, resíduos e biomassa de origem agrícola (IEAb, 2023). No médio prazo, esse risco tende a crescer, pois a demanda simultânea dos modos rodoviário, marítimo e aéreo pode gerar competição por matéria-prima e pressão sobre os custos. A ausência de um marco regulatório unificado e metas por modo amplia a incerteza. Por isso, o risco foi posicionado em impacto e probabilidade média, com tendência de aumento até 2035, por causa de fatores como o crescimento populacional e os impactos negativos causados pela mudança do clima.

O Risco 8 (Políticas de governo e não de Estado) é considerado transversal e se destaca entre os mais críticos do projeto, pois reflete a instabilidade e a falta de continuidade das

políticas públicas de descarbonização. A ausência de políticas de Estado, substituídas por políticas de governo de curto prazo, reduz a previsibilidade e afasta investidores, dificultando o planejamento de longo prazo. A existência de um marco regulatório estável e de instrumentos que garantam segurança jurídica é essencial para mitigar esse risco no médio prazo, uma vez que proporcionaria condições para investimentos consistentes e redução da exposição a incertezas. Por isso, o risco foi posicionado com impacto alto e probabilidade média, considerando que o avanço da Lei do Combustível do Futuro e o fortalecimento institucional podem contribuir para reduzir gradualmente sua criticidade.

A volatilidade na regulamentação internacional é considerada como maior relevância nos modos aéreo e marítimo. Visto que está vinculado à instabilidade das normas e exigências internacionais relacionadas às emissões e à certificação do SAF (EPE, 2024b). A forte influência de organismos internacionais, como a IMO e CORSIA, e o risco de assimetria regulatória entre países podem afetar a competitividade da produção nacional e direcionar o combustível para mercados externos (EPE, 2024a). Apesar disso, os especialistas consideram que o impacto será mais relevante no médio e longo prazo, e não aplicável ao modo rodoviário. Assim, o risco foi mantido com impacto alto e probabilidade média.

Por sua vez, o Risco 11 (Sobrecarga no sistema de distribuição) é considerado como de maior relevância no modo rodoviário. Visto que reflete a possibilidade de sobrecarga na infraestrutura de distribuição de combustíveis durante a transição energética, principalmente ao considerar o crescimento da utilização de biometano. Apesar disso, os especialistas apontam que o sistema de distribuição nacional é consolidado e possui capacidade de adaptação gradual, o que reduz a probabilidade de ocorrência. Assim, o risco foi posicionado com impacto médio e probabilidade baixa, refletindo um desafio localizado e dependente da evolução das matrizes energéticas regionais.

A falta de mão de obra qualificada (Risco 13) é considerada transversal, pois a carência de profissionais especializados afeta o avanço da descarbonização em todos os modos de transporte. A implantação de novas rotas tecnológicas, como biocombustíveis avançados e SAF, exige qualificação técnica e formação de pessoal em diferentes elos da cadeia. (IRENA, 2023) A falta de recursos humanos capacitados pode gerar atrasos e aumentar custos operacionais no médio prazo, especialmente nas etapas de produção e operação. Por isso, o risco foi posicionado com impacto e probabilidade médias, refletindo um desafio estrutural que demanda políticas de capacitação e integração com instituições de ensino e pesquisa.

O desbalanceamento da participação de mercado entre os modos (Risco 15), foi adicionado à análise e é considerado como de maior relevância no modo marítimo. Visto que está relacionado à possibilidade de o modo marítimo perder competitividade ou participação de mercado para o transporte rodoviário em cenários de descarbonização, principalmente devido às diferenças de custo e infraestrutura em um cenário que ambos poderiam competir pelo biodiesel (EPE, 2025c). Assim, o risco foi posicionado com impacto médio e probabilidade média, refletindo uma preocupação de médio prazo, mas com potencial de mitigação por meio de políticas integradas de transporte e logística sustentável.

Na Tabela 5 a seguir, foi então relacionada quais recomendações (apresentadas previamente na Tabela 4) podem ajudar na mitigação dos riscos identificados na pesquisa com os especialistas.

Tabela 5. Relação entre as recomendações e os riscos levantados.

Risco	RC 1	RC 2	RC 3	RC 4	RC 5	RC 6	RC 7	RC 8	RC 9	RC 10	RC 11	RC 12
1. Falta de qualidade do biocombustível	X	X			X		X		X		X	X
2. Não atendimento das misturas regulamentadas	X	X					X				X	
3. Falta de consistência ambiental no médio e longo prazo		X			X		X				X	
4. Foco no mercado externo	X	X				X		X				
5. Impacto nos custos operacionais		X	X		X	X					X	
6. Baixa escala de produção	X	X			X	X			X		X	
7. Disponibilidade de matéria-prima para todos os produtos		X			X				X		X	
8. Políticas de governo e não de estado	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
9. Volatilidade na regulamentação internacional	X	X					X					
10. Impacto negativo na balança comercial devido a necessidade de importação	X	X			X	X					X	
11. Sobrecarga no sistema de distribuição	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
12. Lobby da cadeia automotiva nacional	X	X			X				X			
13. Falta de mão de obra qualificada					X				X			X
14. Perda de protagonismo da indústria nacional	X	X			X	X	X		X			
15. Desbalanceamento da participação de mercado entre os modos	X	X	X		X	X	X	X	X	X		

Fonte: Elaboração própria.

Como apontado anteriormente, o desenvolvimento de um marco regulatório (RC2) deve ser um pilar de sustentação na mitigação dos riscos enfrentados para o avanço da descarbonização, uma vez que ele consegue compreender 14 riscos apresentados. É através do marco que podemos garantir a qualidade do combustível (Risco 1), regular as misturas obrigatórias (Risco 2), proteger o mercado interno contra a exportação excessiva de matéria-prima e produtos (Risco 4).

As políticas de governo e não de estado (Risco 8), é destacado por ter mais recomendações para mitigar seu avanço (10), uma vez que políticas descentralizadas podem se tornar um grande gargalo, dado que as estratégias de descarbonização são desenvolvidas e implementadas a médio e longo prazo, o que nos leva a necessidade de uma política nacional robusta para compreender todo o horizonte da transição energética e tecnológica. Isso se dá com o estabelecimento de leis (RC1; RC2), construção de infraestrutura física (RC4; RC8; RC10), estabelecimento de subsídios (RC6), fortalecimento da cadeia produtiva (RC11), desenvolvimento e avaliação das ações aplicadas (RC5; RC7).

Caminhos para a descarbonização: definindo o Roadmap

Diante da relação estabelecida entre recomendações e riscos, foi possível estruturar um conjunto de estratégias embasadas, voltadas à mitigação das principais barreiras que podem comprometer o avanço da descarbonização nos modos rodoviário, marítimo e aéreo. Para orientar a implementação dessas estratégias de forma progressiva, considerando restrições técnicas, regulatórias, institucionais e financeiras, foram realizadas alocações de ações específicas para o horizonte temporal determinado. A Tabela 6 elucida a alocação das estratégias definidas.

Tabela 6. Alocação das estratégias no horizonte temporal por modalidade de transporte.

Barreiras	Estratégias	Aplicação	Responsável	Horizonte Temporal		
				2026 - 2030	2031 - 2035	2036 - 2050
Ausência de N&Rs	Estabelecimento de metas; Criação de uma política nacional de uso de energia em transportes; Criação de normas e regulamentações; Investimento em P&D	Padronizar requisitos técnicos e operacionais	ANP; MME; MMA; MT e ABNT	X	X	
		Criar diretrizes claras para o setor	MME; MMA; MT; ANP; ANTT; ANTAQ; ANA e Casa Civil	X		
		Reduzir incertezas sobre implementação	MME; MMA; MT; ANP e Ministério da Fazenda	X	X	
Falta de políticas públicas		Definir objetivos e direcionamentos oficiais	MME; MMA; MT e Casa civil	X	X	
		Estruturar programas de incentivo financeiro	Ministério da Fazenda; BNDES/Finep; MME e ANP	X	X	
		Criar bases legais que suportem a implementação	Congresso Nacional; MME; MMA; MT; Casa Civil; ANP; ANTT; ANAC e ANTAQ	X	X	
Falta de direcionamentos claros		Estabelecer visão estratégica de longo prazo	MME; MMA; MT; Casa Civil e IPEA		X	X
		Alinhar órgãos e setores privados e investimentos	Casa Civil; MMA; MT; MME; Ministério da Fazenda; CNI/Setor Privado; BNDES e Finep	X	X	
Investimento e incertezas relacionadas à operacionalização	Estabelecimento de metas; Subsídios financeiros; Isenções fiscais e tributárias; Criação de Normas e regulamentações; Estabelecimento de Parcerias Público- Privadas; Aplicação de Sanções e/ou Impostos e Taxas Ambientais	Incentivar apoios financeiros	Ministério da Fazenda; BNDES; Finep e MME	X	X	
		Reduzir custos por meio de incentivos fiscais	Ministério da Fazenda; Receita Federal e MME	X	X	
		Padronizar requisitos técnicos e operacionais	ANP; MME; MT; MMA; ABNT; ANTT/ANTAQ/ANAC	X	X	
		Viabilizar investimentos por meio de parcerias	Casa Civil; MME; MT; MMA; BNDES; Governos estaduais/municipais e Setor privado		X	
		Criar instrumentos econômicos de indução	MMA; Ministério da Fazenda; IBAMA; Agências reguladoras setoriais	X	X	

Tabela 6 Continuação. Alocação das estratégias no horizonte temporal por modalidade de transporte.

Barreiras	Estratégias	Aplicação	Responsável	Horizonte Temporal		
				2026 - 2030	2031 - 2035	2036 - 2050
Investimento e incertezas relacionadas à infraestrutura de distribuição	Estabelecimento de metas; Criação de Normas e regulamentações; Modernização/planejamento da infraestrutura de distribuição; Subsídios financeiros; Isenções fiscais e tributárias; Investimento em P&D; Estabelecimento de Parcerias Público-Privadas; Aplicação de Sanções e/ou Impostos e Taxas Ambientais	Criar previsibilidade para orientar investimentos	MMA; MT; Casa Civil		X	X
		Padronizar procedimentos e requisitos operacionais	ANP; MME; ABNT; ANTT/ANTAQ/ANAC	X		
		Ampliar e adaptar a infraestrutura para novos combustíveis	MT; MMA; ANP; Governos estaduais/municipais; Setor privado	X	X	X
		Reduzir custo de implantação da infraestrutura	Ministério da Fazenda; BNDES; Finep; MME		X	X
		Reduzir custos de equipamentos e tecnologias	Ministério da Fazenda; BNDES; Finep	X	X	X
		Desenvolver soluções para reduzir riscos técnicos e operacionais	MT; Finep; Embrapii; Universidade; MME	X	X	
		Viabilizar grandes projetos compartilhando riscos	Casa Civil; MME; BNDES; Governos estaduais/municipais; Setor privado		X	X
		Criar instrumentos de indução para acelerar a modernização da infraestrutura	MMA; MT; MME; Ministério da Fazenda; IBAMA; Agências reguladoras setoriais		X	X
Investimento elevado	Subsídios financeiros; Isenções fiscais e tributárias; Estabelecimento de PPPs; Negociação de créditos de carbono e/ou mercados de compensação	Reduções de impostos sobre os produtos	Governo Federal e Estaduais; Ministério da Fazenda	X	X	
Falta de linha de crédito		Criação de linhas de financiamento específicas	BNDES; Banco Central; Bancos privados	X	X	
Falta de subsídios		Subsídio para aquisição dos produtos	Governo Federal e Estaduais; BNDES	X	X	

Tabela 6 Continuação. Alocação das estratégias no horizonte temporal por modalidade de transporte.

Barreiras	Estratégias	Aplicação	Responsável	Horizonte Temporal		
				2026 - 2030	2031 - 2035	2036 - 2050
Falta de desenvolvimento tecnológico	Investimento em P&D; Estratégias para fortalecimento da indústria nacional; Estabelecimento de parcerias Público-Privadas; Subsídios financeiros	Financiamento para centros de pesquisa e startups	Casa Civil; MME; BNDES	X	X	X
Falta de conhecimento	Criação de uma política nacional de uso de energia em transportes; Investimento em P&D	Desenvolvimento de <i>Roadmaps</i>	MCTI; Universidades; Centros de Pesquisa; MME; MT	X	X	
Baixa aceitação de mercado	Estratégias de comunicação; Subsídios financeiros; Aplicação de sanções e/ou impostos e taxas ambientais; Negociação de créditos de carbono e/ou mercados de compensação; Estratégias para fortalecimento da indústria nacional	Educação das partes interessadas	Governo Federal; MCTI; Universidades; MMA; MT	X	X	x
		Incentivos financeiros e linhas de crédito	Ministério da Fazenda; BNDES; MME; MT	X	X	
		Campanhas de marketing	Governo Federal; MME; MMA; MT; Setor Privado.	X	X	

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 evidencia a alocação das estratégias propostas no horizonte temporal. Ela foi organizada por barreiras, estratégias, aplicação e atores responsáveis, sendo que o horizonte temporal foi dividido em três principais janelas de implementação para que seja possível visualizar a prioridade e a melhor sequência lógica: 2006-2030, 2031-2035 e 2036-2050. No curto prazo, foram concentradas ações estruturantes e habilitadoras, como forma os casos da padronização de requisitos, definição de diretrizes e fortalecimento do arcabouço regulatório. Para médio prazo, as ações de consolidação e escalonamento foram priorizadas, incluindo os instrumentos de incentivo e expansão da capacidade produtiva e logística. Por fim, no cenário de longo prazo, foram contempladas estratégias de maior maturação e investimento, que estão associadas à modernização de infraestrutura e consolidação de mercado. Sendo assim, as marcações na tabela indicam os períodos em que cada estratégia deve ser priorizada.

REFERÊNCIAS

ANFAVEA. Anuário Anfavea 2025. São Paulo: Anfavea, 2025. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios-2/>. Acesso em: 4 fev. 2026.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022a. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-886-2022>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022b. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Biodiesel. Brasília, DF: ANP, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis. Brasília, DF: ANP, 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/programas-monitoramento/programa-de-monitoramento-da-qualidade-dos-combustiveis>. Acesso em: 13 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural [...]. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14134.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11003.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Lei do Combustível do Futuro. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Decreto nº 12.614, de 5 de setembro de 2025. Regulamenta a Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, para dispor sobre o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/d12614.htm. Acesso em: 9 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Relatório do Inventário Nacional das Emissões Antrópicas por Fontes e das Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa do Brasil. Brasília, DF: MCTI, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/Relatorio_delnventario_NacionalNIR_2024_PORT.pdf. Acesso em: 16 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Presidente sanciona lei do Programa Mover. Brasília, DF: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/presidente-sanciona-lei-do-programa-mover>. Acesso em: 24 nov. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Rota 2030: Mobilidade e logística. Brasília, DF: MDIC, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 24 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Plano de testes: avaliação da viabilidade técnica do B15 a B25. Brasília, DF: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-bicombustiveis/biodiesel/subcomite-de-avaliacao-da-viabilidade-tecnica-de-misturas-biodiesel/documentos-do-subcomite/minuta-plano-de-testes-b15-a-b25-19-11-2025.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). Plano Clima. Brasília, DF: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima>. Acesso em: 24 nov. 2025.

CENTRO CLIMA. Avaliação das implicações econômicas e sociais da descarbonização da economia brasileira. Rio de Janeiro: Centro Clima, 2026. Disponível em: <https://centroclima.coppe.ufrj.br/estudos-e-projetos/andamento/637-avaliacao-das-implicacoes-economicas-e-sociais-da-descarbonizacao-da-economia-brasileira>. Acesso em: 30 mar. 2026.

CIBIOGÁS. Panorama do biogás no Brasil em 2024. Foz do Iguaçu: CIBiogás - Energias Renováveis, 2025. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/panorama-do-biogas-2024>. Acesso em: 7 nov. 2025.

COALIZÃO DOS TRANSPORTES. Coalizão dos transportes: Como tornar o setor de transportes um contribuidor ativo para a redução das emissões brasileiras. Rio de Janeiro: CEBDS, 2025. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/coalizacao-dos-transportes-como-tornar-o-setor-de-transportes-um-contribuidor-ativo-para-a-reducao-das-emissoes-brasileiras/>. Acesso em: 6 nov. 2025.

COSTA, Mariane Gonzalez da; GONÇALVES, Daniel Neves Schmitz; D'AGOSTO, Marcio de Almeida. From commodities to high-value exports: biofuels as a catalyst for Brazil's energy transition and economic transformation. Sustainable Energy Technologies and Assessments, [S. l.], v. 81, p. 104416, set. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104416>. Acesso em: 10 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Panorama do biometano: Setor sucroenergético. Brasília, DF: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/panorama-do-biometano-setor-sucroenergetico>. Acesso em: 8 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia 2034: Demanda energética do setor de transportes. Brasília, DF: EPE, 2024a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 24 ago. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil: Perspectivas futuras. Brasília, DF: EPE, set. 2024b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras>. Acesso em: 6 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Descarbonização do setor de transporte rodoviário: Intensidade de carbono das fontes de energia. Brasília, DF: EPE, 2025a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03_Intensidade_de_Carbono_Transporte_Rodovi%C3%Alrio.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia 2035: Oferta de biocombustíveis. Brasília, DF: EPE, 2025b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/CA-EPE-DPG-SDB-2025-08_Caderno%20de%20Oferta%20de%20Biocombust%C3%ADveis_PDE2035_Final%20\(20102025\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/CA-EPE-DPG-SDB-2025-08_Caderno%20de%20Oferta%20de%20Biocombust%C3%ADveis_PDE2035_Final%20(20102025).pdf). Acesso em: 17 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia 2035: Demanda energética do setor de transportes. Brasília, DF: EPE, 2025c. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/CA-EPE-DPG-SDB-2025-09_Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE2035.pdf. Acesso em: 6 dez. 2025.

GONÇALVES, Daniel Neves Schmitz; D'AGOSTO, Márcio de Almeida. Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions, Business as Usual (BAU) scenario - 2050. Final Report. Rio de Janeiro: IBTS, 2017. Disponível em: https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relat_cen_prospec_fut_ltc_english-02.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

GONÇALVES, Daniel Neves Schmitz. Elaboração de cenários prospectivos para o uso de energia e para emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes brasileiro: uma abordagem multinível. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2024/10/tese_danielgoncalves_final.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net Zero Roadmap: a global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach – analysis. Paris: IEA, 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-c-goal-in-reach>. Acesso em: 27 ago. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy system of Brazil. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 24 nov. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Transport biofuels – Renewables 2023 – Analysis. Paris: IEA, 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/transport>. Acesso em: 24 nov. 2025.

EA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for biogas and biomethane – analysis. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane>. Acesso em: 8 nov. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. AR6 - Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

LTC – LABORATÓRIO DE TRANSPORTE DE CARGAS. Projetos em andamento: Roadmap para a descarbonização do transporte rodoviário de longa distância, marítimo e aéreo de cargas no Brasil. Rio de Janeiro: LTC, 2025. Disponível em: https://www.ltc.coppe.ufrj.br/projetos/status_projeto/em-andamento/. Acesso em: 7 nov. 2025.

MÜLLER-CASSERES, Eduardo; CARVALHO, Francielle; NOGUEIRA, Tainan; FONTE, Clarissa; IMPÉRIO, Mariana; POGGIO, Matheus; WEI, Huang Ken; PORTUGAL-PEREIRA, Joana; ROCHEDO, Pedro R. R.; SZKLO, Alexandre; SCHAEFFER, Roberto. Production of alternative marine fuels in Brazil: an integrated assessment perspective. *Energy*, [S. l.], v. 219, p. 119444, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119444>. Acesso em: 13 out. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Futuro da energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil. [S. l.]: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://oc.eco.br/futuro-da-energia-visao-do-observatorio-do-clima-para-uma-transicao-justa-no-brasil-sumario-executivo/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

PETROBRAS. Petrobras lança Plano de Negócios 2025-2029 com investimentos de US\$ 111 bilhões. [S. l.]: Agência Petrobras, 2024. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-lanca-plano-de-negocios-2025-2029-com-investimentos-de-us-111-bilhoes>. Acesso em: 13 out. 2025.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2023). [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

UNCTAD – UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. Review of maritime transport 2023. Genebra: UNCTAD, 27 set. 2023. Disponível em: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>. Acesso em: 24 nov. 2025.

UNITED NATIONS. Review of maritime transport: towards a green and just transition. Genebra: UNCTAD, 2023. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.



*Por um Brasil resiliente e
descarbonizado.*



Laboratório de
Transporte de Carga

COPPE
UFRJ