

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

Suzana Kahn Ribeiro
Márcio de Almeida D'Agosto
Lino Guimarães Marujo
Daniel Neves Schmitz Gonçalves
Lorena Mirela Ricci



INTRODUÇÃO

Visão geral

O setor de transportes é um dos principais consumidores de combustíveis fósseis, utilizando cerca de 95% dos derivados de petróleo ofertados no mundo (IEA, 2021);

A alta correlação entre a movimentação de cargas e o PIB no mundo (TOB-OGU *et al.*, 2018) é um ponto de atenção. No Brasil, de 2005 a 2015, o transporte de carga cresceu 47% enquanto o PIB aumentou 32% (GONÇALVES *et al.*, 2017);

Com o crescimento demográfico e econômico, a atividade de transportes deve aumentar, o que pode elevar a demanda de energia e as emissões de GEE. Assim, a descarbonização do setor de transportes é um desafio a ser enfrentado para limitar as mudanças do clima (Gonçalves, 2023);

Em 2023 no Brasil, o setor de transportes representou cerca de 1/3 do consumo final de energia, sendo que apenas 22,5% da sua matriz energética veio de fontes renováveis (EPE, 2024a). Para descarbonizar esse setor é preciso pensar em várias soluções, sem exclusão obrigatória do fóssil;

Portanto, é necessário a criação de *roadmaps* realistas para a transição energética dos diversos segmentos do setor, com base no princípio de políticas "sem arrependimentos", sendo monitoradas, verificadas e reportadas regularmente as condições de mercado e inovações tecnológicas, além de evitar políticas que promovam bloqueios tecnológicos (*lock-in*), promovendo a competição entre as rotas tecnológicas (EPE, 2024b).

INTRODUÇÃO

Enfoque no projeto

Emissões diretas do setor de transporte de cerca de 8,9 GtCO_{2e} em 2019, correspondendo a cerca de 15% do total de emissões de GEE e 23% das emissões de CO₂ relacionadas à energia, sendo a maior fonte de emissões do setor. Destaca-se que o transporte rodoviário é responsável por 6,1 GtCO_{2e} (69% do total). O transporte marítimo internacional e a aviação internacional são responsáveis, respectivamente, por 0,8 GtCO_{2e} (9%) e 0,6 GtCO_{2e} (7%). As emissões do transporte rodoviário cresceram a uma taxa de 1,7% entre 2010 e 2019 e as da aviação internacional cresceram 3,4% ao ano, de acordo com a rápida expansão da atividade de transporte no globo, que cresceu 73% entre 2000 e 2018. O transporte de carga, em particular, cresceu 68% entre 2000 e 2015 e deve triplicar até 2050 com as cadeias de suprimentos globais e o comércio internacionais, o que torna a descarbonização deste segmento particularmente desafiadora (IPCC, 2022).

O Brasil, com sua vasta extensão territorial e economia diversificada, depende fortemente do transporte rodoviário para cargas pesadas. Ao contrário dos modos aquático e aéreo, que têm metas estabelecidas para a descarbonização, o transporte rodoviário ainda não possui metas para reduzir suas emissões de carbono.

O setor de transporte marítimo é essencial para o desenvolvimento econômico global, sendo responsável pela movimentação de 80% do volume comercializado no mundo (United Nations, 2023). No Brasil, esse número é ainda mais expressivo, o setor chega a movimentar mais de 95% das cargas exportadas e importadas pelo país.

O setor aéreo busca expandir o uso do SAF (Sustainable Aviation Fuel). No entanto, é fundamental promover debates para analisar as melhores opções tecnológicas e as matérias-primas associadas.

INTRODUÇÃO

Enfoque no projeto



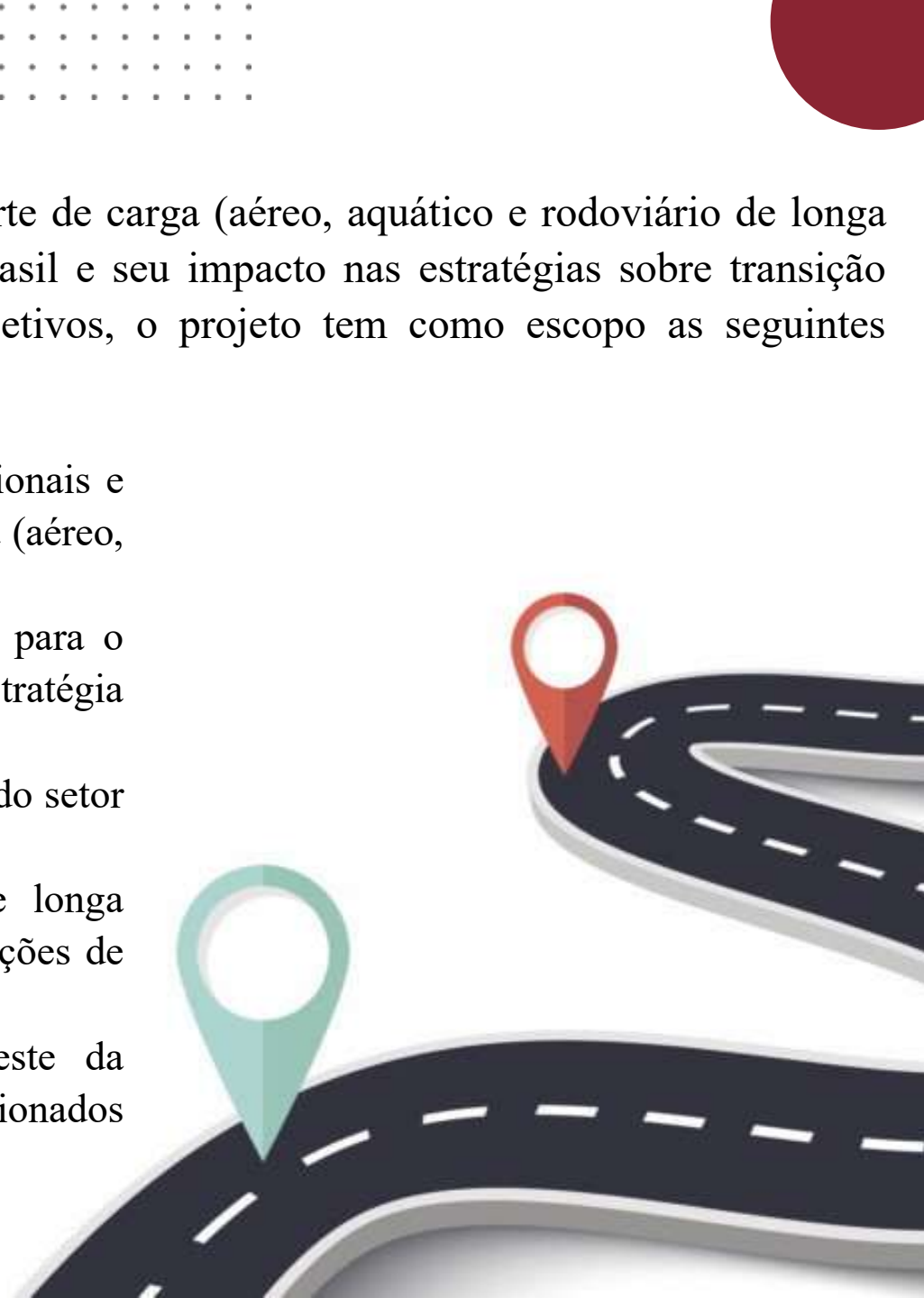
Este projeto pretende estabelecer um *roadmap* para a descarbonização do transporte rodoviário de longa distância, marítimo de cabotagem e aéreo de cargas no Brasil considerando ser este um dos principais emissores de gases de efeito estufa no setor de transporte e de energia, fortemente dependente do uso de combustíveis fósseis não renováveis com grande tendência de crescimento nas próximas décadas e que enfrenta desafios para a transição energética e tecnológica.

Assim, busca-se uma contribuição para a descarbonização deste segmento de transportes e influenciar tomadores de decisão públicos e a iniciativa privada sobre potencial de redução de emissões de GEE no transporte de carga por meio de incentivos, instrumentos e recursos para a economia de baixo carbono e subsidiar políticas públicas compatíveis com a ambição climática de forma alinhada com as estratégias do setor de óleo e gás brasileiro.

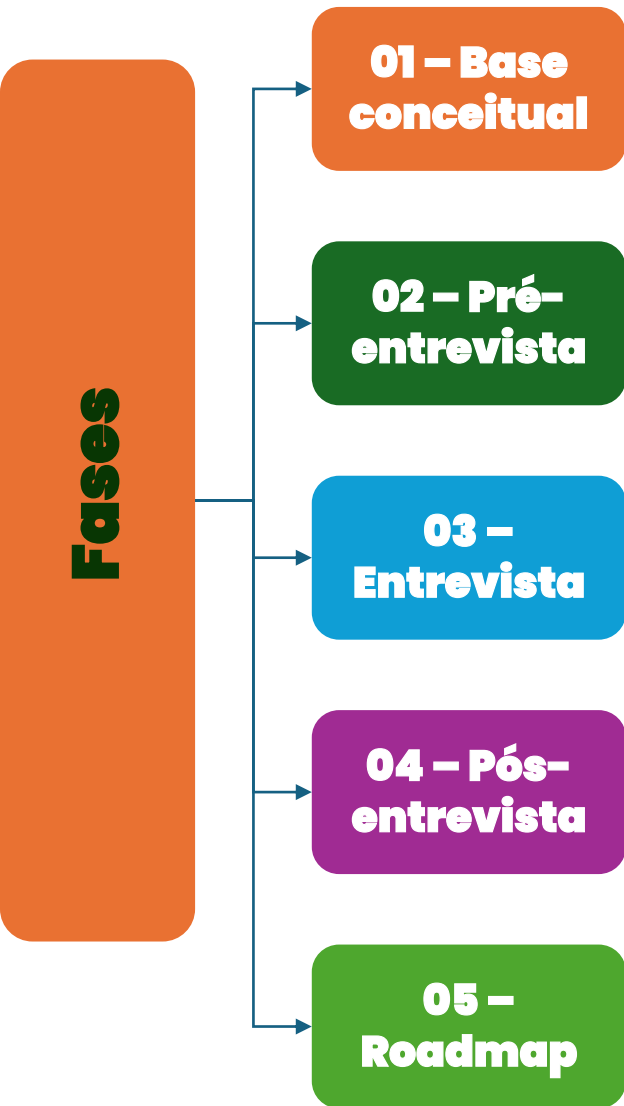
OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo avaliar o potencial da contribuição do transporte de carga (aéreo, aquático e rodoviário de longa distância) para redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil e seu impacto nas estratégias sobre transição energética e tecnológica no setor de óleo e gás. Para alcançar esses objetivos, o projeto tem como escopo as seguintes atividades:

- 1) Realizar revisão bibliográfica narrativa e documental sobre as tendências nacionais e mundiais quanto a transição energética e tecnológica para o transporte de carga (aéreo, aquático e rodoviário de longa distância);
- 2) Alinhar as tendências nacionais quanto a transição energética e tecnológica para o transporte de carga (aéreo, aquático e rodoviário de longa distância) com a estratégia do setor de óleo e gás;
- 3) Elaborar uma linha de base narrativa sobre os principais avanços e retrocessos do setor analisando um período a ser definido em conjunto com o iCS;
- 4) Propor um *roadmap* para a descarbonização do transporte rodoviário de longa distância, marítimo e aéreo de cargas no Brasil considerando cenários e projeções de emissões de GEE para o ano de 2050;
- 5) Participar de discussões técnicas com o iCS, no aperfeiçoamento e teste da metodologia no período do projeto e de eventos nacionais e internacionais selecionados sobre o tema.



Fluxograma



Método proposto

Fases

01 – Base conceitual

análise da série histórica do setor avaliado

revisão da literatura (*papers*), revisão documental (grandes agencias e institutos de pesquisa);

análise de documentos preliminares do plano setorial

análise dos programas e iniciativas governamentais

sinalização nacional e internacional

análise do cenário de referência do setor

síntese do material avaliado

Método proposto

Fases

02 – Pré-entrevista

selecção de *stakeholders*

estruturação das entrevistas

organização dos eventos

desenvolvimento das apresentações

desenvolvimento das dinâmicas

Método proposto

Fases

03 – Entrevista

apresentação/contextualização da base conceitual

espaço para dúvidas

definição de pelo menos duas estratégias

análise dos desafios, riscos e oportunidades para cada estratégia

solicitação de dados/informações adicionais

Método proposto

Fases

04 – Pós-entrevista

cobrança do feedback dos *stakeholders*, aprimoramento da próxima entrevista a partir do *feedback* da atual

análise dos resultados

verificação com o *stakeholders*

síntese dos resultados

desenvolvimento do relatório

Método proposto



Fases

05 – Roadmap

estimativa do cenário;

comparação dos resultados do cenário em relação ao cenário de referência

síntese das estratégias

organização de *workshop* para consolidação de resultados

desenvolvimento do relatório completo

revisão por parte do cliente

ajustes a partir da revisão do cliente

divulgação da versão final do relatório completo e apresentação na COP30

FASE I – Análise da série histórica



O histórico compreende resultados **até 2023**. Para isso, foram consideradas:

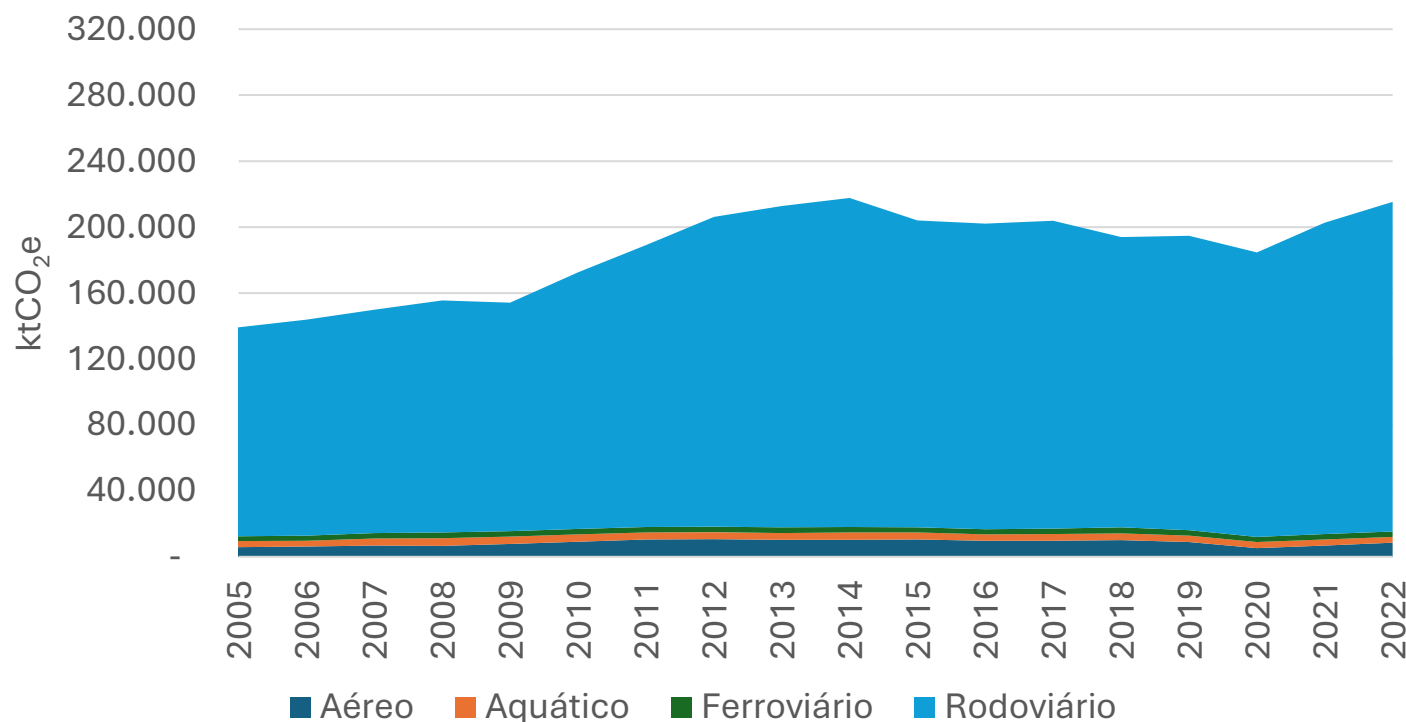
- **Matrizes abertas** do Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2024);
- **Emissões** do Primeiro Relatório Bienal de Transparência – 1990-2022 (BTR1)
- **Fatores de emissão e dados de rendimento energético** da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS);
- **Anuários ou dados estatísticos com dados de atividade** da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE) e Associação Brasileira das Empresas Importadoras de Veículos Automotores (ABEIFA).

Em relação a evolução da atividade:

- **Transporte de carga por cabotagem:** observou-se um crescimento significativo na carga geral containerizada (cerca de 85% - 2023 vs 2015). Além disso, houve um aumento na demanda pelo transporte de petróleo e derivados (46,5% - 2023 vs 2015). Por fim, o transporte de minérios para o mercado interno cresceu cerca de 32,4% (2023 vs 2015);
- **Navegação interior:** o transporte de soja e milho aumentou entre 3 e 5 vezes, respectivamente;
- **Transporte rodoviário de longa distância:** o fluxo interno de soja e milho com destino às instalações portuárias focadas no comércio exterior aumentou, em toneladas transportadas, cerca de 84,3% (2023 vs 2015).

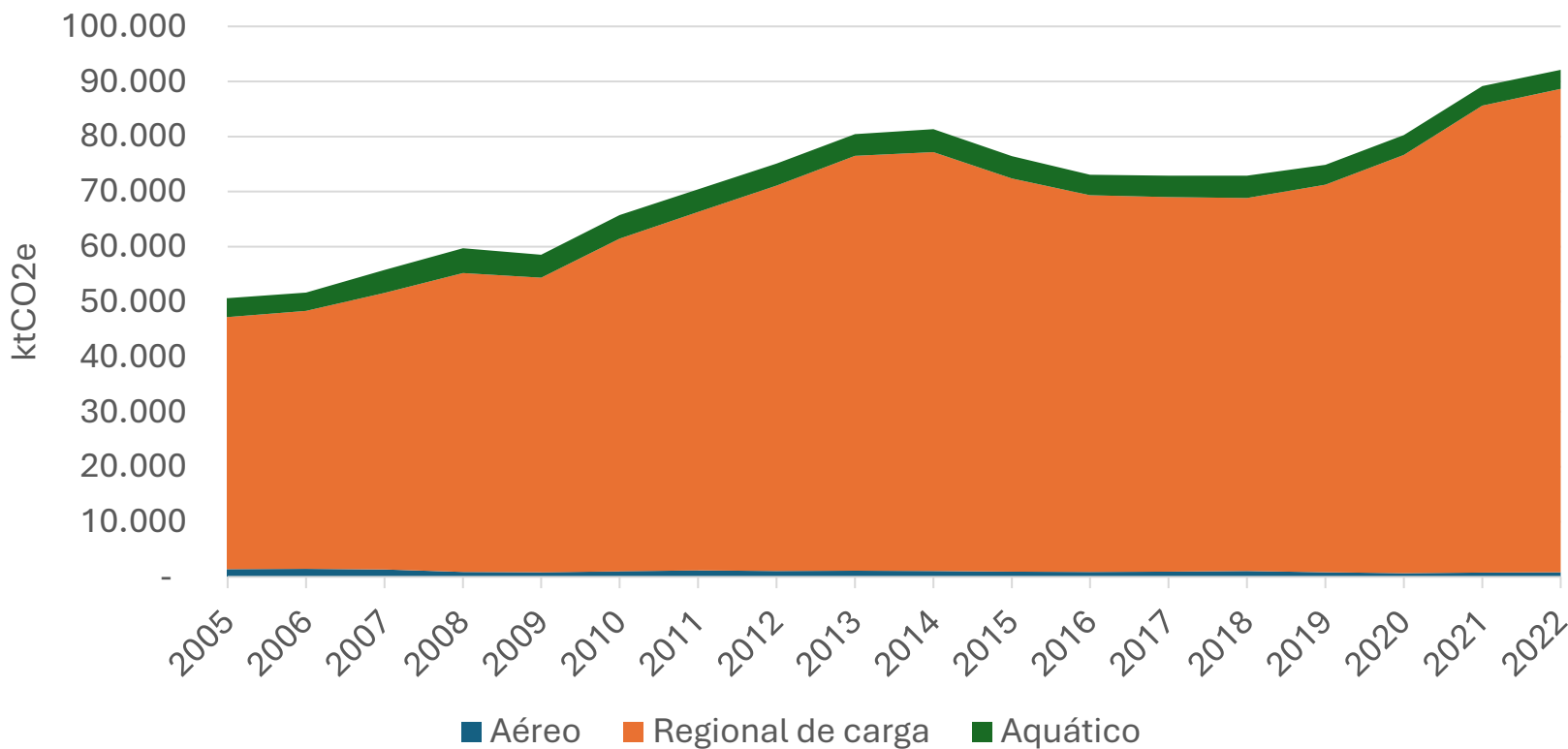
FASE I – Análise da série histórica

- Entre 2005 e 2022, as emissões do setor de transportes cresceram de 139.226 kt CO₂e para 215.353 kt CO₂e, (56,1%) com o rodoviário como principal responsável.
- A aviação teve um aumento moderado, de 5.931 kt CO₂e em 2005 para 8.513 kt CO₂e em 2022 (43,5%)
- A pandemia de 2020 causou uma queda nas emissões de 5,3% entre 2019 e 2020, com destaque para o transporte aéreo (queda de 43%) que recuperou o volume em 2023.
- Considerando os direcionadores subnacionais, São Paulo concentra 22% das emissões totais.

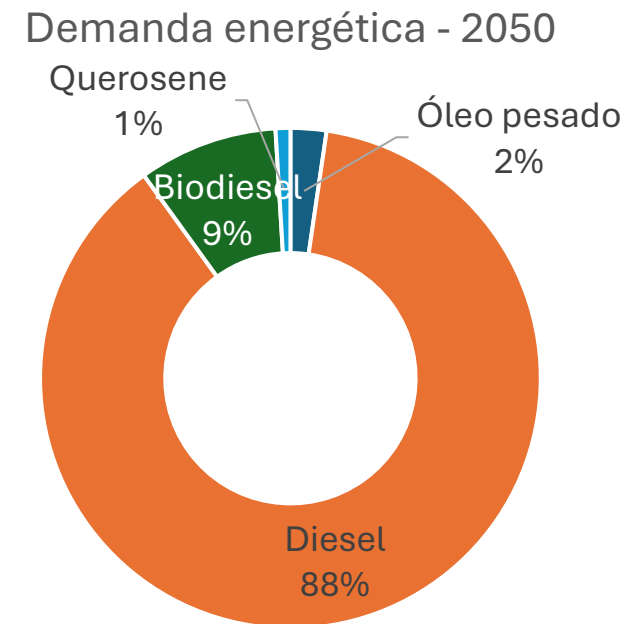


FASE I – Análise da série histórica

- Entre 2005 e 2022, as emissões dos modos aéreo, aquático e rodoviário (regional) cresceram de 50.618 kt CO₂e para 92.114 kt CO₂e, (78,9%) com o transporte rodoviário de longas distancias como principal responsável;
- Ao contrário do setor como um todo, a pandemia de 2020 não causou uma queda nas emissões desses segmentos, aumentando cerca de 7,2% entre 2019 e 2020;
- Estes segmentos representaram em 2005 cerca de 36% das emissões, aumentando para 43% em 2022;
- Em relação apenas ao transporte de carga, estes segmentos representam nos últimos cinco anos cerca de 80% das emissões.



Rodoviário
95%



FASE I – Propostas preliminares – Planos setoriais

Propostas do Capítulo de Transportes

Eletrificação de Caminhões Médios e Pesados a bateria; Eletrificação de Caminhões Médios e Pesados a células de combustível a hidrogênio; Aumento da mistura de biodiesel e do diesel verde no diesel; Substituição dos veículos a diesel por GNC e GNL em caminhões médios e pesados; Uso de biometano; Práticas de condução eficiente no rodoviário; Melhoria da qualidade de pavimento das rodovias; Soluções tecnológicas para reduzir ineficiências (*free flow*, HS-WIM*, otimização do uso da capacidade de carga, redução de perdas e avarias na carga); Controle de emissões em caminhões médios e pesados e ônibus: Limites de emissão para novos veículos (CONAMA); Controle de emissões em caminhões médios e pesados - inspeção veicular; Aumento da participação das ferrovias na matriz de transporte de carga e de passageiros; Aumento do uso do combustível sustentável de aviação; Aumento da eficiência em operações áreas (controle de tráfego aéreo e controle de aeronave em solo); Modernização da frota de aeronaves com aumento de eficiência energética; Uso de biocombustíveis e combustíveis alternativos em embarcações; Substituição de rebocadores / embarcações auxiliares movidas a diesel por elétricos; Práticas de condução eficientes na navegação, alinhadas às condições meteorológicas; Aumento da participação da navegação de cabotagem e do transporte hidroviário na matriz de transporte de carga; Uso em larga escala de biocombustíveis em todos os modos de transportes; Eletrificação de caminhões médios e pesados, com células de combustível a etanol.

*High-Speed Weigh-In-Motion (em português, Pesagem em Movimento de Alta Velocidade).

FASE I – Programas e iniciativas governamentais

Instrumento de Política Pública em andamento

Programa Combustível do Futuro (Lei nº 14.993, de 08/10/2024)

Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV)

Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV)

Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano

Aeroportos sustentáveis

SustentAr

Conexão SAF

Resolução ANAC nº 743, de 15 de maio de 2024.

Rede Ambiental da Aviação

Plano de ação para redução das emissões de GEE da aviação civil brasileira

Regulamentação do Programa BR do Mar (Lei nº 14.301/2022).

Definição de embarcação sustentável.

Monitoramento de emissões da frota de embarcações inscritas no Programa BR do Mar.

Aliança para Descarbonização dos Portos

Resolução ANTAQ nº 2.650/2012 Índice de Desempenho Ambiental - ANTAQ

Projeto PJ02 da Agenda Ambiental e de Segurança Aquaviária 2023/2024 da ANTAQ

Plano Nacional de Redução de Emissões dos Gases de Efeito Estufa - GEE Subsetor Transporte Marítimo e Aquaviário

Portaria 330/2023 Prêmio ANTT – Destaques 2023

Resoluções Conama nº 18/1986, 297/2002 Programas de Controle de Emissões Veiculares (Proconve e Promot)

Lei nº 7.408/1985 Regula o limite de peso no transporte rodoviário de cargas e de passageiros

Projeto CCAC – Desenvolvimento de Programa de Inspeção de Emissões Veiculares

Portaria n. 622/2024 - diretrizes para alocação de recursos em contratos de concessão rodoviária visando ao desenvolvimento de infraestrutura resiliente, à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à transição energética.

Portaria n. 689/2024 - Debêntures incentivadas e de debêntures de infraestrutura.

FASE I – Programas e iniciativas governamentais

Nova Indústria do Brasil

Missão 3: Foca na infraestrutura, incluindo veículos elétricos e desenvolvimento de baterias, com três cadeias produtivas: (i) sistemas de propulsão (rodoviário), (ii) baterias e (iii) transporte metroferroviário.

Metas para 2026: alcançar 3% de participação no licenciamento de veículos elétricos com baterias produzidas no Brasil.

Orçamento: cerca de R\$ 65 bilhões em novos investimentos diretos e R\$ 288 bilhões em financiamento para o setor de construção. O programa Mover terá quase R\$ 19 bilhões em créditos tributários para empresas automotivas que atendam a requisitos de sustentabilidade. A iniciativa privada comprometeu-se com aproximadamente R\$ 1 trilhão.

Missão 5: aumentar em pelo menos 50% a participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes até 2033.

Biocombustíveis mencionados incluem diesel verde, SAF e etanol, além de hidrogênio verde e biometano.

Metas para 2026: aumentar em 27% a participação de biocombustíveis e eletricidade na matriz energética de transportes, com a meta de aumentar 50% até 2033, considerando os padrões atuais.

Orçamento: cerca de R\$ 14 bilhões para indústrias essenciais, com compromissos da iniciativa privada totalizando aproximadamente R\$ 380 bilhões.

FASE I – Programas e iniciativas governamentais

Objetivos Nacionais de Mitigação

Os cenários e o *roadmap* estarão alinhados com três (aplicáveis ao setor de transportes) dos doze Objetivos Nacionais do Plano Clima Mitigação:

Objetivo Nacional 3. Aumentar a produção sustentável de biocombustíveis, incentivar inovações tecnológicas e desenvolver cadeias de valor em bioenergia.

Objetivo Nacional 5. Fomentar a substituição de combustíveis fósseis, promovendo biocombustíveis sustentáveis e soluções de eletrificação.

Objetivo Nacional 10. Transformar as vantagens comparativas do Brasil em competitivas, tornando-o um fornecedor de soluções climáticas em um mundo em transição para modelos de baixo carbono.

Nos Objetivos Nacionais de Mitigação, destaca-se o papel dos biocombustíveis para atender metas de aviação e navegação. Além disso, em 2035, a utilização de hidrogênio é prevista como alternativa no setor de transportes, exigindo investimentos em infraestrutura. A eletrificação também se destaca, necessitando de inovações tecnológicas para adaptar rotas e expandir a rede de carregamento. A melhoria da infraestrutura e práticas de direção eficientes ajudam na redução do consumo de combustíveis.

A única possível divergência pode se dar no que se refere ao hidrogênio, pois a revisão aponta que seu uso se dará dentro do processo de produção de biocombustíveis avançados (hidrogenação catalítica para HVO e SAF) e não em seu uso em veículos.

FASE I – Programas e iniciativas governamentais

Lei do Programa de Aceleração da Transição Energética

No dia 22/01/25, o Governo Federal sancionou a lei que estabelece o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia.

O programa visa promover tecnologias limpas e ampliar a matriz energética renovável, reforçando o compromisso do Brasil com o desenvolvimento sustentável. O BNDES gerenciará o fundo, permitindo que estados e municípios acessem recursos para projetos sustentáveis. O Paten também facilita o acesso a crédito para financiar iniciativas de transição energética e incentiva a pesquisa em tecnologias de baixo carbono.

O programa abrange o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis, valorização de resíduos, modernização de infraestrutura energética e substituição de fontes poluentes. Também incentiva a pesquisa em tecnologias de captura e armazenamento de carbono, produção de hidrogênio verde e de biogás.

O Paten é estratégico para setores portuário, hidroviário e aeroportuário, promovendo a descarbonização e eletrificação das operações, como o uso do sistema fornecimento de energia em terra (Onshore Power Supply – OPS) para navios e combustíveis sustentáveis na aviação.

FASE I – Sinalização nacional

Premissas e iniciativas consideradas



Principais referências nacionais: PNE 2050; PDE 2034; PNL 2035; Lei 14.993/24 (Combustível do futuro); *World Energy Outlook 2024* (IEA, 2024); *New Energy Outlook* (Bloomberg, 2024); *Bloomberg NEF* (2024); *Avançando nos caminhos da descarbonização* (ANFAVEA, 2024); *Estudo Mover* (ICCT, 2024); *Brasil 2045 - Futuro da Energia*; *Shell Scenarios – 2024*; *Slocat Transport, Climate and Sustainability* (2023); *Visão de Futuro para o setor de transportes* (Série de workshops do BNDES); *Biofuels in Emerging Markets* (IEA, 2023); *Global Energy and Climate Outlook 2024* (Joint Research Centre, 2025); *Net Zero Industrial Policy Lab – Seizing Brazil’s opportunities in the energy transition* (Guerra et al., 2025); Proposta do Observatório do Clima para 2ª NDC; resultados do 5º Workshop de Cenários Prospectivos de Uso de Energia em Transportes (WCPUET) do LTC/PET/Coppe/UFRJ.

Principais referências internacionais: PNE 2050; PDE 2034; PNL 2035; Lei 14.993/24 (Combustível do futuro); *World Energy Outlook 2024* (IEA, 2024); *New Energy Outlook* (Bloomberg, 2024); *Bloomberg NEF* (2024); *Avançando nos caminhos da descarbonização* (ANFAVEA, 2024); *Estudo Mover* (ICCT, 2024); *Brasil 2045 - Futuro da Energia*; *Shell Scenarios – 2024*; *Slocat Transport, Climate and Sustainability* (2023); *Visão de Futuro para o setor de transportes* (Série de workshops do BNDES); *Biofuels in Emerging Markets* (IEA, 2023); *Global Energy and Climate Outlook 2024* (Joint

FASE I – Sinalização nacional

Premissas e iniciativas consideradas



- Mobilidade elétrica para o rodoviário urbano e biocombustíveis para rodoviário interurbano e modos de alta capacidade;
- Premissas generalistas como biocombustíveis para substituir diesel, querosene e gasolina;
- Poucos estudos destacaram premissas quantitativas;
- Nenhum dos estudos apresenta as curvas de custo marginal de abatimento (MACC) para as medidas apontadas ;
- Poucos estudos apresentam o CAPEX (Capital Expenditure) das medidas de mitigação consideradas;
- Nenhum dos estudos analisados apresenta OPEX (Operational Expenditure) das medidas de mitigação consideradas;
- Críticas do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI) – Foco principal em melhorar (*improve*) e mudar (*shift*), deixando de lado o evitar (*avoid*);
- Atores brasileiros otimistas com os veículos elétricos (ANFAVEA, Shell, transportadoras e *stakeholders*);
- Falta de visão de como aproveitar a oportunidade para o país virar um grande exportador de combustíveis avançados.

FASE I – Sinalização nacional

Estimativa do crescimento da atividade (2023 – 2035)



Considera-se também o impacto das políticas e transformações previstas nos cenários **PNL 2035**¹, que estima a evolução das matrizes origem-destino de carga;

A atividade do transporte aquático continua em crescimento, impulsionada principalmente pelo aumento no escoamento de produtos agrícolas, petróleo e minério de ferro;

Além do agronegócio, a recuperação dos setores industrial, de serviços e da construção civil, impulsionada pelo Novo PAC, resulta em uma maior demanda por transporte de cargas. Esse crescimento é sustentado pelo aumento da população e pelo crescimento da renda per capita que tende a impulsionar o desempenho de setores como o varejo e a construção civil, que demandam intensamente serviços de transporte de cargas;

O crescimento do PIB per capita impulsiona a recuperação das taxas históricas de crescimento do setor aéreo;

¹ Utilizam os estudos GLOBION (cenário de 2°C) e projeções do IPEA/ME, com base em um modelo de equilíbrio geral computável (CGE). As taxas de expansão foram aplicadas à matriz origem-destino 2017, considerando fluxos de exportação, importação e domésticos para cada zona de origem e produto.

FASE I – Sinalização nacional

Estimativa do crescimento da atividade (2023 – 2035)



O PNL considera as seguintes faixas de crescimento entre 2023 e 2035:

- Transporte de Graneis Sólidos Minerais: 43% (Inferior), 64% (Superior);
- Transporte de Outros Graneis Sólidos Minerais: 3% (Inferior), 15% (Superior);
- Transporte de Graneis Líquidos: 23% (Inferior), 37% (Superior);
- Transporte de Graneis Sólidos Agrícolas: 28% (Inferior), 32% (Superior);
- Transporte de Cargas Gerais Containerizáveis: 21% (Inferior), 35% (Superior);
- Transporte de Cargas Gerais Não Containerizáveis: 7% (Inferior), 19% (Superior).

FASE I – Sinalização nacional

Estimativa do crescimento da atividade (2036 – 2050)



Além do agronegócio, o crescimento dos setores industrial, de serviços e da construção civil, leva a uma maior demanda por transporte de cargas. Esses setores são fomentados pelo crescimento da população e pelo aumento da renda per capita;

As estimativas para este horizonte consideram o histórico do setor (1970 a 2023), as matrizes origem-destino da Infra SA, as estimativas de licenciamento de veículos rodoviários da ANFAVEA e os empreendimentos previstos Cenário 4 do PNL e, principalmente, a expectativa de crescimento do PIB (transporte de carga);

No entanto, apesar da expectativa de crescimento mais rápido dos modos ferroviário e aquático, o transporte rodoviário continuará predominando no perfil do transporte de cargas no Brasil.



FASE I – Sinalização nacional

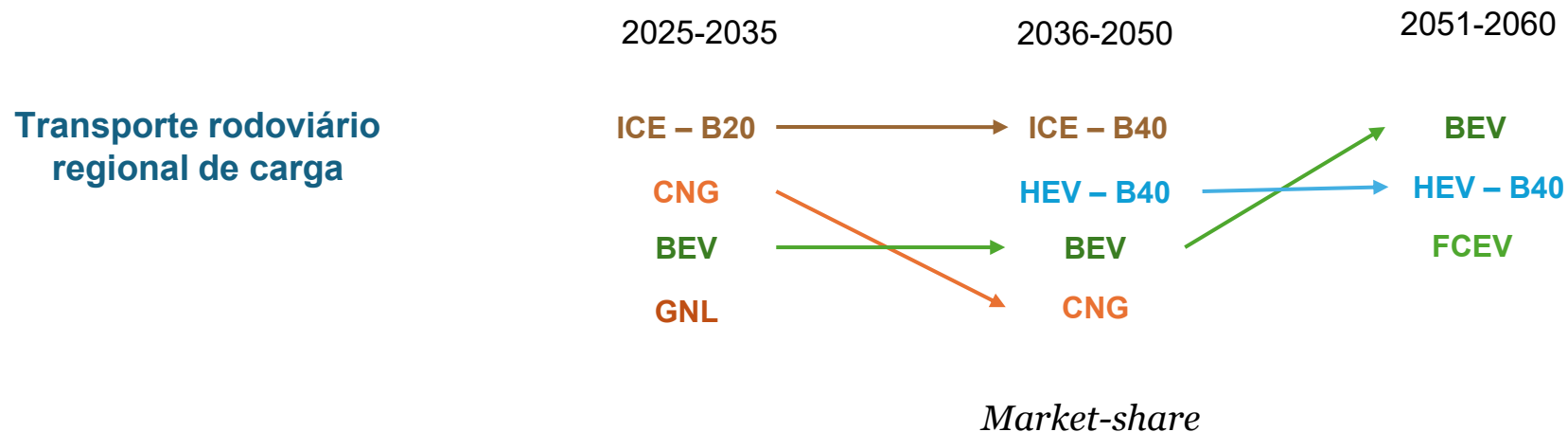
Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)

Horizontes Temporais

Curto Prazo (2025-2035): Análise das tecnologias emergentes e sua adoção inicial no mercado.

Médio Prazo (2036-2050): Perspectivas sobre a maturação e expansão das tecnologias.

Longo Prazo (2051-2060): Projeção do futuro das tecnologias de propulsão e seu possível domínio no mercado.



Legenda: ICE (Internal Combustion Engine) - Motores de combustão interna; B20 (Biodiesel 20%); CNG (Compressed Natural Gas) - Gás natural comprimido;; HEV (Hybrid Electric Vehicle) - Veículo híbrido elétrico; B40 (Biodiesel 40%); FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) - Veículo elétrico movido a célula de combustível.

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)



Transporte regional e tecnologias de propulsão:

1. Escopo e foco

- Aqui se trata das condições específicas do **transporte regional**, destacando a evolução e a adoção de **várias tecnologias de propulsão** ao longo de diferentes horizontes de tempo.

2. Horizontes de tempo

- **Curto prazo (2025–2035):**
 - Análise da **adoção inicial** de tecnologias emergentes no transporte regional de cargas, como B20, CNG, GNL e BEV.
 - Observação de como o mercado recebe e incorpora soluções mais avançadas e de menor emissão.
- **Médio prazo (2036–2050):**
 - Avaliação do **amadurecimento** das tecnologias introduzidas no curto prazo, com aparecimento dos HEV e aumento para B40.
 - **Expansão** dessas soluções no mercado, com aprimoramentos em eficiência, custo e infraestrutura.
- **Longo prazo (2051–2060):**
 - **Projeção** de desenvolvimentos futuros em tecnologias de propulsão.
 - Expectativa de **dominância** dessas soluções mais sustentáveis, transformando o setor de transporte regional.

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)

Transporte regional e tecnologias de propulsão:

3. Tecnologias de propulsão mencionadas

- **Motores de combustão interna (ICE) com misturas de biodiesel (B20, B40):**
 - Indica a **continuidade** desses motores como opção de trem de força ao longo dos períodos, embora com combustíveis mais limpos.
- **Veículos elétricos a bateria (BEVs):**
 - **Participação de mercado crescente**, sobretudo no transporte regional de carga, no curto prazo e com célula de combustível no longo prazo.
 - Reflete a **migração** para fontes de energia mais sustentáveis.
- **GNL (Gás Natural Liquefeito) e GNC (Gás Natural Comprimido):**
 - Ganham relevância como **alternativas** para diversificar o uso de combustíveis no setor, no médio prazo.
- **Veículos elétricos com célula de combustível (FCEVs) e veículos elétricos híbridos (HEVs):**
 - Mantidos como **opções de baixa emissão**, ampliando o leque de soluções disponíveis.

4. Previsões de participação de mercado

- A pesquisa sugere que **avanços tecnológicos** e condições de mercado determinarão:
 - O **aumento** progressivo de BEVs no setor de transporte regional.
 - A **manutenção** de ICEs com biocombustíveis e outras alternativas (GNL/GNC), embora possivelmente com menor participação à medida que as tecnologias elétricas avancem.
- Com a **melhoria** contínua de eficiência, redução de custos e maior disponibilidade de infraestrutura, essas tecnologias devem **dominar** gradualmente o mercado.

FASE I – Sinalização nacional

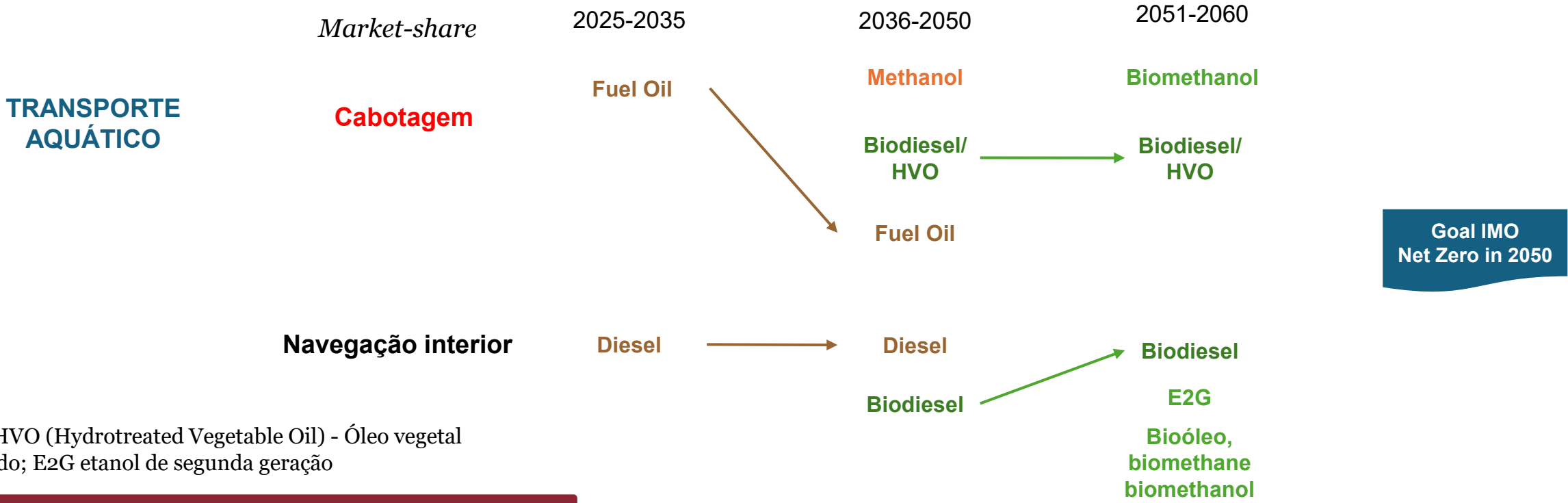
Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)

Horizontes Temporais

Curto Prazo (2025-2035): Análise das tecnologias emergentes e sua adoção inicial no mercado.

Médio Prazo (2036-2050): Perspectivas sobre a maturação e expansão das tecnologias.

Longo Prazo (2051-2060): Projeção do futuro das tecnologias de propulsão e seu possível domínio no mercado.



Legenda: HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) - Óleo vegetal hidrotratado; E2G etanol de segunda geração

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)



Transporte aquático (cabotagem e navegação interior) e horizontes das tecnologias de propulsão:

1. Horizontes de tempo

- **Curto prazo (2025–2035)**
 - Análise de **tecnologias emergentes** e sua adoção inicial no setor aquático.
 - Combustíveis tradicionais, como **óleo combustível**, devem continuar predominantes, embora já surjam opções mais sustentáveis (B20)
- **Médio prazo (2036–2050)**
 - **Amadurecimento e adoção mais ampla** das novas tecnologias – metanol, HVO e biodiesel.
 - Expectativa de maior uso de **biodiesel/HVO** e outras alternativas, acompanhando a transição gradual para combustíveis de menor impacto ambiental.
- **Longo prazo (2051–2060)**
 - **Projeção** de futuras tecnologias de propulsão, com potencial de **dominar** o mercado.
 - Combustíveis como **metanol/biometanol** e **bióleo/biometano** ganham destaque, refletindo a busca por fontes renováveis e de baixa emissão.

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)

3. Combustíveis em destaque

- **Óleo combustível**
 - Mantém relevância no **curto e médio prazo**, sendo ainda o principal combustível para operações marítimas nesse intervalo.
- **Biodiesel/HVO**
 - Apontados como **alternativas mais sustentáveis**, tanto na cabotagem quanto na navegação interior, no médio prazo
- **Metanol/biometanol**
 - Considerados **possibilidades futuras** para redução de emissões, alinhadas às metas de descarbonização do setor, no longo prazo.
- **Bióleo (bio-oil) e biometano**
 - Aparecem como **opções de base biológica**, ampliando o leque de combustíveis alternativos.

4. Projeções de participação de mercado

- Há uma **expectativa** de crescimento da participação de combustíveis alternativos (biodiesel, metanol, etc.) à medida que:
 - As **tecnologias** evoluem.
 - A **regulamentação** e o mercado se voltam para a sustentabilidade.
- Referência seja feita às **metas da IMO (Organização Marítima Internacional) para o Net Zero em 2050**, indicando alinhamento com o esforço global de **redução de emissões** no transporte marítimo.

FASE I – Sinalização nacional

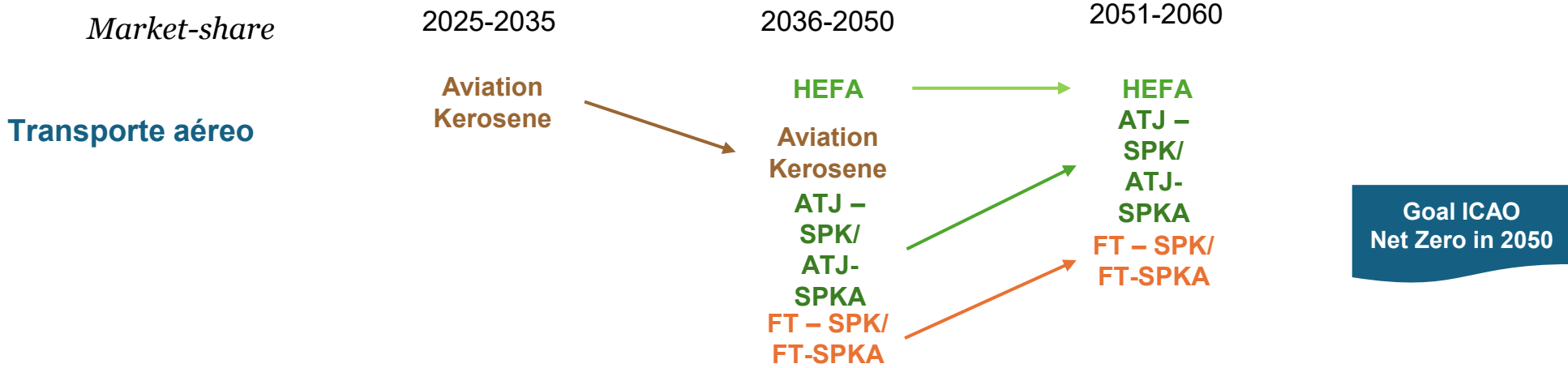
Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)

Horizontes Temporais

Curto Prazo (2025-2035): Análise das tecnologias emergentes e sua adoção inicial no mercado.

Médio Prazo (2036-2050): Perspectivas sobre a maturação e expansão das tecnologias.

Longo Prazo (2051-2060): Projeção do futuro das tecnologias de propulsão e seu possível domínio no mercado.



Legenda: HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) - Ésteres e ácidos graxos hidroprocessados; ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene) - biocombustível para aviação produzido a partir de álcool; FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene) - biocombustível sintético para aviação produzido pelo processo Fischer-Tropsch

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ª WCPUET (2024)



Apresenta-se os horizontes de tempo para o transporte aéreo, detalhando projeções e estratégias relacionadas aos combustíveis e às tecnologias que podem moldar o futuro da aviação.

1. Horizontes de tempo

- **Curto prazo (2025–2035)**
 - Análise de **tecnologias emergentes** e início de sua adoção no mercado da aviação.
- **Médio prazo (2036–2050)**
 - **Amadurecimento** dessas tecnologias e expansão de seu uso no setor aéreo.
- **Longo prazo (2051–2060)**
 - **Projeção** de futuros sistemas de propulsão e seu possível **domínio** no mercado.

2. Tipos de combustível identificados

- **Querosene de aviação**
 - Mantém-se como **principal combustível** no curto e médio prazos, refletindo a prática convencional.
- **ATJ (Alcohol-to-Jet) e SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene)**
 - Apresentados como **alternativas em potencial** para reduzir a pegada de carbono, com versões sintéticas derivadas de fontes renováveis.
- **HEFA (Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados)**
 - **Biocombustível** que pode compor o mix futuro, ampliando a diversificação das fontes de energia na aviação.

FASE I – Sinalização nacional

Principais resultados das dinâmicas com stakeholders – 5ºWCPUET (2024)



3. Previsões de participação de mercado

- Espera-se **maior incorporação** de combustíveis alternativos (como ATJ e HEFA) ao longo do tempo.
- O **querosene convencional** ainda desempenhará papel significativo, sobretudo no futuro próximo.
- As metas da **ICAO** (Organização da Aviação Civil Internacional) para **Net Zero em 2050** guiam essas transições, sinalizando o compromisso global em **reduzir emissões** no transporte aéreo.

4. Aeronaves de pequeno porte para uso agrícola

- A **gasolina** continuará sendo utilizada em aeronaves agrícolas, evidenciando **necessidades específicas** em diferentes segmentos da aviação, juntamente com o etanol de 2ª geração.

Consolidação matriz de risco – 5ª WCPUET



Risks

1. Government policy rather than state policy
2. Dependence on first-generation ethanol production for scaling up – E2G
3. Potential for sustainable E2G production not meeting market demand
4. Tax policies
5. Engine maintenance costs due to biodiesel use
6. Need for engine adaptation – E2G and Biodiesel
7. Maritime biodiesel, non-acceptance of Brazilian biofuel in the EU due to land use conflicts
8. HVO production scale
9. High investment and production costs
10. Market barriers – competitiveness across all modes
11. Ship technology for biofuel use
12. Price volatility of imported HVO and SAF
13. Insufficient sustainable production capacity of vegetable oils/fats to meet market demand
14. Mandates favoring biodiesel over other alternatives (HVO, R biodiesel, etc.), creating a captive market for only one alternative
15. Maritime, with a long-term solution funneling towards ammonia, generating higher greenhouse gases than CO₂, excluding biodiesel and HVO from the market
16. Risk of biodiesel degradation in maritime use
17. International biofuel certification mandate
18. FT-SPK imposing itself as the “sole solution” due to European interests
19. Negative impacts of climate change on raw material production
20. International regulatory discussions not considering carbon accounting of the production chain, but rather other political and commercial interests
21. Brazil not obtaining certification for the export of certain biofuels
22. Volatility in international regulation
23. Dispute between the ethanol and vegetable oil industries undermining both alternatives: ATJ and HEFA
24. Agricultural production technology

Source: Adapted from da Costa (2024)

FASE I – Sinalização Internacional

SLOCAT

Medidas mitigadoras:

- Melhoria dos veículos zero emissões
- Melhoria nas ações de conformidade (compliance)
- Melhoria da eficiência e emissões: aquático com melhoria da eficiência de 70% até 2040 (com 17% da demanda energética sendo por rotas zero emissão) e aéreo com redução de 40% entre 2020 e 2050, com 10% dos combustíveis líquidos sendo substituídos por eletrificação.
- Economia de combustível e padrões de emissões de GEE para veículos pesados são fortes instrumentos para descarbonização do transporte de carga.
- Aumento da participação dos biocombustíveis na mistura com combustível fóssil.
- Pouco esforços para incentivar a mudança do transporte rodoviário para a navegação interior. Navegação interior é responsável por 2% das emissões globais de GEE do transporte.
- Desenvolvimento de políticas que garantam a aplicação e regulamentem a descarbonização do setor de transportes



FASE I – Sinalização Internacional

UNFCCC

Objetivos de avanço para 2030 para a descarbonização do setor de transportes (UNFCCC, 2021);

Veículos pesados com motores a combustão interna terão 100% das vendas substituídas por veículos zero emissão nos grandes mercados até 2040;

Transporte marítimo - os combustíveis zero emissão terão 100% de participação até 2050;

Transporte aéreo - os SAFs serão responsáveis por 100% dos combustíveis da aviação mundial até 2050;

Embora o transporte tenha sido reconhecido em 82% das NDC, apenas 18% incluem uma meta específica de redução de emissões para o transporte.



FASE I – Sinalização Internacional

ITF – Cenários

Cenários de políticas para a demanda e escolha modal do transporte de carga

Baseline	Cenário atual		Cenário de alta ambição	
	2030	2040	2030	2040
Incentivos a veículos de alta capacidade (rodotrem) para o transporte interurbano, com um aumento de 10% na média de carga do veículo.	Os rodotrens começam a ter um maior impacto, aumentando o fator de carga e diminuindo o custo por tonelada-quilômetro.	Os fatores de carga continuam aumentando, chegando 25% mais altos em 2050, em comparação com 2019.	Os rodotrens começam a ter um impacto maior, aumentando as cargas dos caminhões e diminuindo o custo por tonelada-quilômetro.	Os fatores de carga continuam aumentando, terminando 25% mais altos em 2050, em comparação a 2019.
A navegação lenta e inteligente é incentivada no setor de transporte marítimo para reduzir emissões.	Reduções na velocidade dos navios levam a uma melhoria de 5% na eficiência.	As reduções de velocidade dos navios levam a uma melhoria de 10% na eficiência em comparação com o baseline (2019).	Reduções na velocidade da embarcação levam a uma melhoria média de 10% na eficiência, o que reduz os tempos de permanência e os impactos ambientais.	As reduções de velocidade dos navios levam a uma melhoria de 25% na eficiência em comparação com ao baseline (2019).



FASE I – Sinalização Internacional

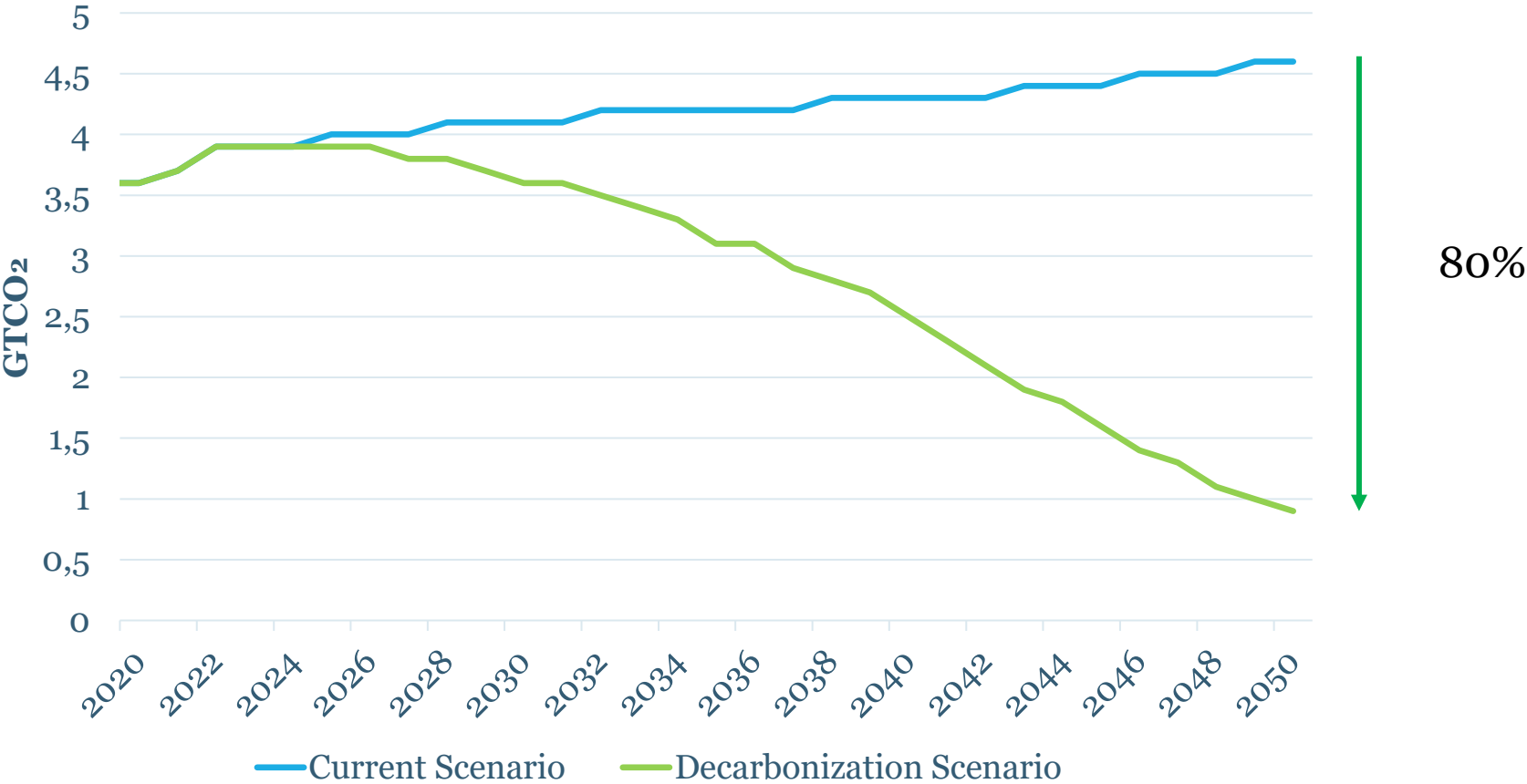
ITF – Cenários

Cenários de políticas para a demanda e escolha modal do transporte de carga

Baseline	Cenário atual		Cenário de alta ambição	
	2030	2040	2030	2040
<p>Estratégias de transformação digital que aproveitam dados quase em tempo real são usadas para reduzir os tempos de permanência intermodais em viagens com trechos realizados por ferrovia ou hidrovias.</p>	<p>Melhorias nos tempos de viagem tornam as soluções intermodais mais atraentes, mas não melhoram na mesma medida que no cenário de alta ambição.</p>	<p>Os tempos de viagem para soluções intermodais continuam a reduzir em um ritmo mais lento do que no cenário de alta ambição.</p>	<p>Reduções nos tempos de permanência em rodovias, ferrovias e hidrovias interiores resultam em uma redução nos tempos de viagem associados a viagens intermodais, tornando as soluções intermodais mais atraentes. As melhorias continuam crescentes.</p>	<p>Os tempos de viagem para soluções intermodais continuam a reduzir. Os tempos de permanência do caminhão ao porto e do caminhão à ferrovia diminuem em 45% até 2050. Os tempos de permanência da ferrovia ao porto diminuem em 45% até 2050. Os tempos de permanência das hidrovias interiores diminuem em 25%.</p>
<p>O comércio e o consumo de commodities baseadas em petróleo e carvão começam a diminuir, impactando diretamente a demanda de transporte de carga por combustíveis fósseis e a atividade de carga associada ao comércio dessas commodities.</p>	<p>Enquanto o comércio de outras commodities continua a aumentar, o comércio de petróleo e carvão cresce em menor grau.</p>	<p>Enquanto o comércio de outras mercadorias continua a aumentar, o comércio de petróleo e carvão cresce em menor grau.</p>	<p>Enquanto o comércio de outras commodities continua a aumentar, há uma diminuição anual na demanda por carvão e petróleo.</p>	<p>Há uma redução anual de 50% na demanda por carvão e petróleo.</p>

FASE I – Sinalização Internacional

ITF – Cenários



Source: ITF (2023)



FASE I – Sinalização Internacional

IPCC – Principais medidas de mitigação para o transporte de carga

- Melhorar a eficiência energética dos veículos de carga.
- Desenvolver e usar combustíveis alternativos de baixo emissão.
- Expandir a eletromobilidade para caminhões.
- Otimizar a logística e integrar diferentes modos de transporte.
- Criar regulamentações e incentivos para adoção de tecnologias limpas.
- A eficiência veicular e da cadeia logística é essencial para todos os modos de transporte.
- O mercado de biocombustíveis para veículos pesados internacionalmente ainda não é amadurecido o suficiente e carece de desenvolvimento e exigem investimentos e incentivo do mercado.

Os combustíveis para veículos pesados, como navios e aviões, dependem de P&D, financiamento e demonstrações em portos, ressaltando a importância de intervenções escalonadas para descarbonizar o transporte e sugere que diferentes estratégias são necessárias para diferentes prazos para sua viabilidade e adoção no mercado.



FASE I – Sinalização Internacional

IPCC – Eletromobilidade

Para o IPCC, estima-se que a eletrificação do transporte em conjunto com a descarbonização do setor de energia seja uma estratégia-chave para a mitigação profunda de CO₂ em muitos países. O transporte de passageiros e cargas leves já pode ser eletrificado, mas a eletrificação do transporte rodoviário pesado e a troca de combustível na aviação e no transporte marítimo são muito mais difíceis e não foram abordadas na maioria das pesquisas recentes

Na Alemanha, a eletrificação generalizada de veículos particulares é esperada até 2030 (Schmid e Knopf 2012), enquanto para a UE-28, 50% da eletrificação geral do transporte (excluindo matéria-prima) e 75% da eletrificação do transporte rodoviário são necessárias para atingir a neutralidade líquida de carbono de acordo com (Duscha et al. 2019). Além disso, novos combustíveis como hidrogênio, hidrocarbonetos sintéticos e combustíveis biogênicos sustentáveis são necessários para descarbonizar a aviação e o transporte aquático para atingir a neutralidade líquida de carbono (Duscha et al. 2019).

Embora a eletrificação de usos finais seja uma estratégia-chave de descarbonização, alguns usos finais, como transporte de longa distância (rodoviário, aviação e transporte marítimo) e indústrias intensivas em energia, serão mais difíceis de eletrificar. Para esses setores, combustíveis alternativos ou transportadores de energia, como biocombustíveis, hidrogênio, amônia ou metano sintético, podem ser necessários. A maioria dos cenários aponta que o consumo de hidrogênio crescerá gradualmente, tornando-se mais valioso quando o sistema de energia se tornar predominantemente de baixo carbono.

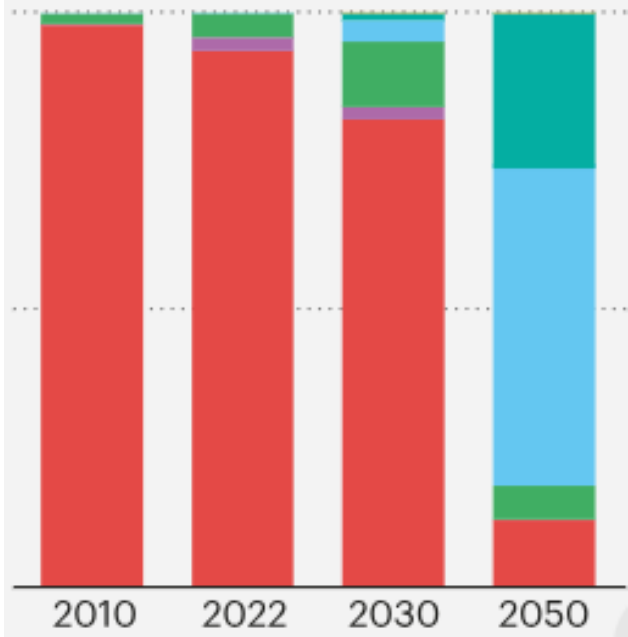


FASE I – Sinalização Internacional

IEA – Roadmap to Net Zero

Transporte rodoviário pesado: é estimado que a eletrificação e os biocombustíveis terão papel fundamental na descarbonização do transporte rodoviário para 2030. É projetada um redução cumulativa de 16% das emissões para o transporte rodoviário.

	2022	2030	2035	2050
Vendas de veículos elétricos e híbridos plug-in para veículos pesados	1%	37%	65%	100%
Participação dos biocombustíveis	5%	11%	12%	3%
Participação da eletricidade	0%	8%	22%	74%
Participação do hidrogênio	0%	1%	2%	16%



Consumo por tipo de fonte energética – Veículos pesados

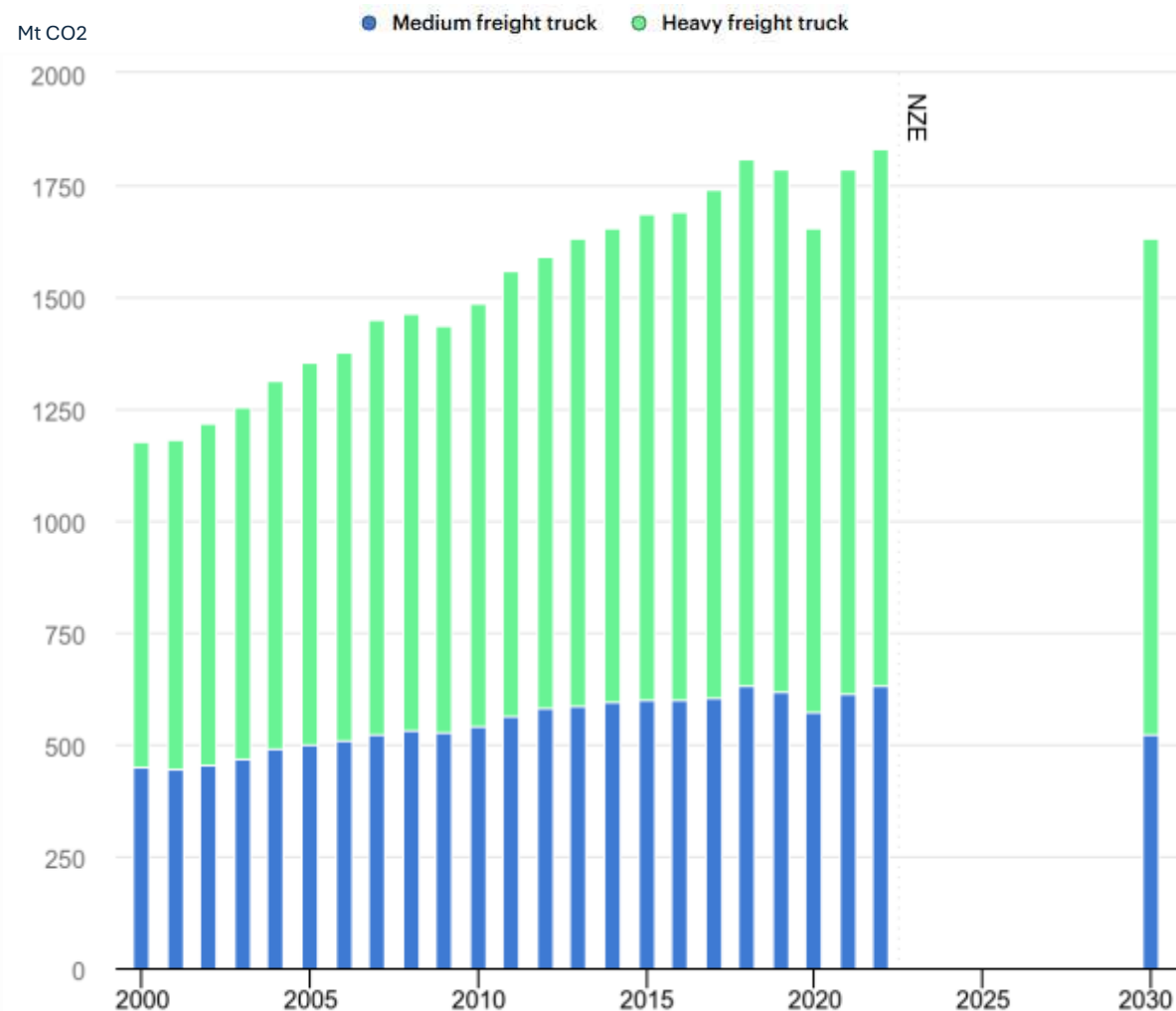


FASE I – Sinalização Internacional

IEA – Roadmap to Net Zero

Os caminhões são responsáveis por cerca de 35% das emissões diretas de CO₂ provenientes do transporte rodoviário, por isso um dos focos da descarbonização do transporte rodoviário a eletrificação. A China lidera as vendas de caminhões elétricos no mundo, sendo responsável por cerca de 70% das vendas em 2023.

A União Europeia, em maio de 2024, adotou padrões ambiciosos de CO₂ para a maioria dos novos caminhões. Já os Estados Unidos, em março de 2024, lançou a Estratégia Nacional Corredor de Transporte de Carga Zero Emissão, que definiu uma abordagem gradativa para o estabelecimento de infraestrutura de abastecimento e recarga para caminhões médios e pesados zero emissão.



Emissões globais de CO₂ dos caminhões médios e pesados



FASE I – Sinalização Internacional

IEA – Roadmap to Net Zero

Transporte aéreo e marítimo: o uso de bioenergia, hidrogênio e combustíveis baseados em hidrogênio correspondem atualmente a menos de 1% da demanda energética destes modos, é esperado que se tenha um aumento considerável do uso dessas fontes energéticas para viabilização do cenário Net Zero. No transporte marítimo a descarbonização será mais impactada por melhorias relacionadas com a eficiência energética, enquanto para a aviação estará na redução da demanda pela mudança de comportamento do usuário.

É estimada uma redução acumulada de 5% das emissões para ambos os setores.



FASE I – Sinalização Internacional

IEA – Roadmap to Net Zero

	2022	2030	2035	2050
Transporte Marítimo - Consumo final por fonte energética				
Biocombustíveis	0%	8%	13%	19%
Hidrogênio	0%	4%	7%	19%
Amônia	0%	6%	15%	44%
Metanol	0%	1%	1%	3%
Transporte Aéreo - Consumo final por fonte energética				
Biocombustíveis	0%	10%	22%	33%
Combustíveis sintéticos à base de hidrogênio	0%	1%	4%	37%
Demanda evitada por medidas comportamentais	0%	9%	14%	20%



FASE I – Sinalização Internacional

Síntese

O foco da descarbonização do transportes rodoviário está na venda de veículos zero emissão (VZE) e no uso de biocombustíveis.

Para o transporte marítimo a aposta é combustíveis alternativos, mas a principal medida mitigadora está na melhoria da eficiência do combustível ou embarcações.

No transporte aéreo, o foco está no uso do SAF, mas também aponta-se para a mudança na demanda como fator contribuinte da descarbonização.



FASE I – Sinalização Internacional

Brasil na transição energética global – Estudo Johns Hopkins (2025) – Mobilidade elétrica

O Brasil já possui um nascente polo de produção de baterias. Entretanto, há um risco de que essa indústria tenha pouco valor agregado, dada a elevada competitividade do setor, que já dá sinais de sobrecapacidade. Por isso, esperam-se baixas margens de lucro nas etapas finais da cadeia, sobretudo na montagem. O grosso do valor agregado na cadeia produtiva das baterias provavelmente se concentrará nas etapas iniciais, sobretudo na mineração e no processamento dos minérios. Assim, é imperativo que os países que desejam se beneficiar com a produção de baterias desenvolvam investimentos nas etapas iniciais da cadeia produtiva.

Caso o Brasil consiga superar seus desafios e implementar um conjunto robusto de políticas para o setor de produção de baterias, poderá se tornar um importante participante do mercado mundial de veículos elétricos (VE) e híbridos. Dado o tamanho de seu mercado doméstico, seu setor automotivo consolidado (em 2022 o país foi o oitavo maior produtor de veículos no mundo), e sua matriz energética limpa, o país está bem posicionado para construir um setor competitivo de produção de veículos elétricos. Assim, se a produção de baterias avançar de modo a acompanhar a produção de carros, o Brasil poderá se posicionar como um polo de valor agregado verde.

FASE I – Sinalização Internacional

Brasil na transição energética global – Estudo Johns Hopkins (2025) – SAF

O estudo avaliou o panorama tecnológico e político em sete setores críticos para a economia verde global projetada para 2050. E o Brasil tem uma posição privilegiada em todos eles, sendo um dos quatro países do mundo com maior capacidade de liderar a transição energética em âmbito global, ao lado de China, EUA e Rússia.

Na área de biocombustíveis o estudo aponta que o Brasil tem o potencial para ser um líder mundial no mercado de SAFs, dada sua forte bioeconomia, apoiada pelo grande crescimento do agronegócio. O país possui as matérias-primas, a expertise em óleo e gás, e a base consolidada em biocombustíveis que são necessárias para expandir rapidamente sua participação nas cadeias de valor de SAFs.

A produção brasileira de etanol de cana-de-açúcar pode beneficiar a rota de descarbonização da aviação por meio da produção de álcool para combustível de aviação (AtJ, do inglês alcohol-to-jet). A Shell e a Raizen anunciaram que estão explorando projetos de AtJ no Brasil.

O AtJ brasileiro teria uma vantagem crucial: sua intensidade de carbono é baixa podendo emitir 1/3 das emissões do etanol de milho, e menos da metade das emissões de SAFs extraídas de canola, palma ou soja. Do jeito como os mercados de combustível de baixo carbono (LCFS - Low-Carbon Fuel Standard) estão se desenvolvendo, os SAFs de baixo carbono serão vendidos a preços mais altos que o combustível fóssil, colocando o AtJ brasileiro numa posição competitiva forte.

FASE I – Sinalização Internacional

Nota técnica da Organização Latino – Americana de Energia – OLADE (2025)

A América Latina contribuiu com 27% da produção global de biocombustíveis líquidos, tendo o Brasil como principal *player* (93% do mercado regional). A experiência com etanol e biodiesel são vistas como uma vantagem competitiva, ao lado da disponibilidade de matérias-primas e capacidade agroindustrial, para desbravar novas oportunidades que se abrem com a transição energética;

Ao mesmo tempo, é preciso avançar em questões como financiamento ao longo de toda a cadeia produtiva e cooperação regional em pesquisa, inovação e certificação;

Um desses mercados é o SAF. A demanda para abastecer o setor aéreo é projetada para superar, globalmente, cerca de 400 bilhões de litros até meados do século. Assim, para os países latino-americanos, a produção e fornecimento de SAF representa uma oportunidade estratégica. À medida que o Corsia avança, a região necessita reforçar a sua capacidade produtiva para abastecer o tráfego intra-regional e internacional;

O estudo também destaca os desafios pendentes para a região, como a necessidade de fortalecer os marcos regulatórios para a sustentabilidade, otimizar a infraestrutura logística e garantir a rastreabilidade da cadeia produtiva para aumentar o valor agregado com foco na exportação.

FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Premissas e iniciativas consideradas

Premissas	Histórico		Limite inferior		Mediana ou média ¹		Limite superior	
	2019	2023	2035	2050	2035	2050	2035	2050
Mistura regulamentada biodiesel	11,0%	13,0%	18%	20%	20%	60%	22%	100%
Mistura regulamentada de diesel verde	0,0%	0,0%	0%	40%	2%	40%	3%	80%
Mistura regulamentada de SAF	0,0%	0,0%	28%	10%	30%	50%	32%	90%
Mistura regulamentada de biometano	0,0%	0,0%	3%	-	4%	-	5%	-
Caminhões pesados BEV	0,0%	0,0%	-	7%	0%	17%	-	80%

¹Dependendo do número de observações e do desvio padrão

FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Premissas consideradas no Cenário de Referência

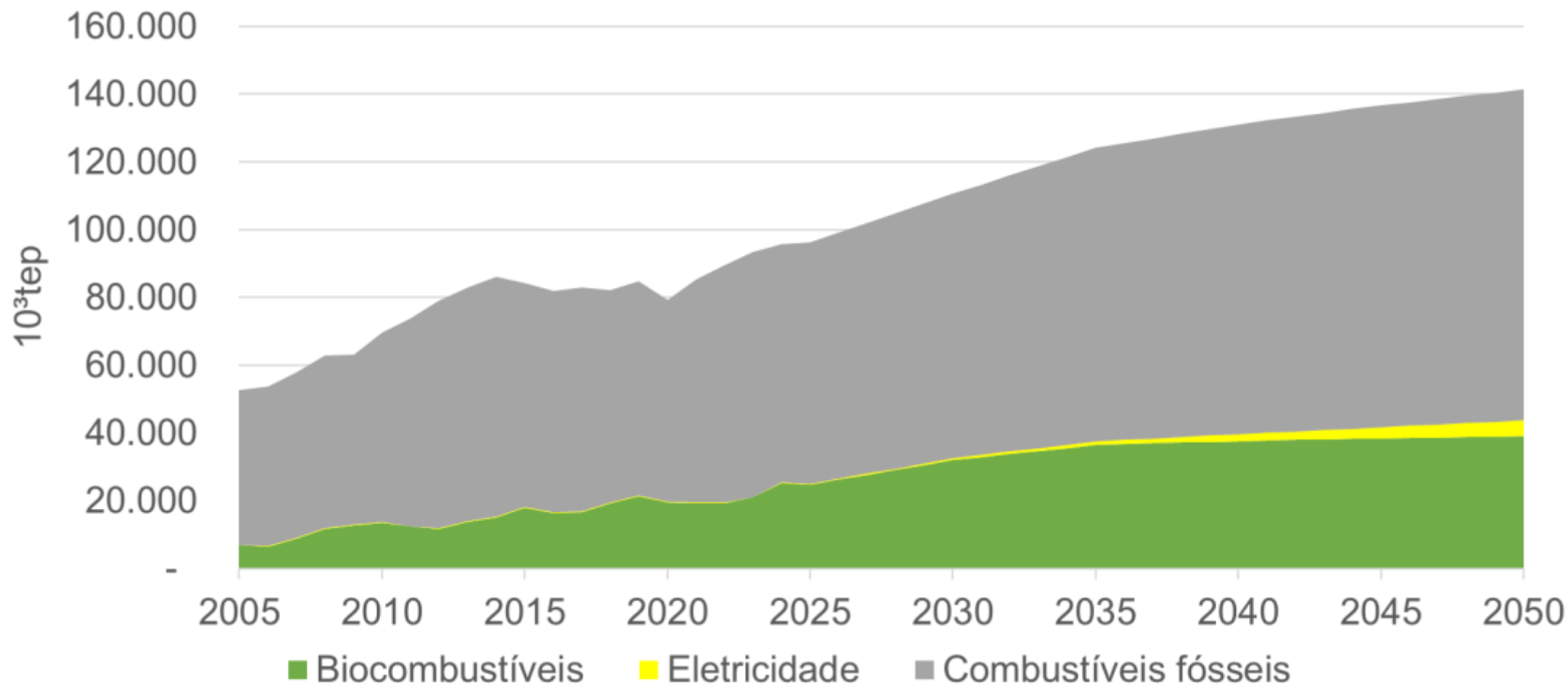
Considera as tendências de medidas de mitigação do setor, com foco na eficiência energética dos veículos leves, na ampliação da oferta de biocombustíveis convencionais e no aumento gradual da participação de modos de alta capacidade para o transporte de carga.

Escopo	Transformações	REF		
		2030	2040	2050
Biocombustíveis	Mistura regulamentada (% em volume)	Biodiesel (Rodo e Ferro) – 15% SAF – 2%	Biodiesel (Rodo e Ferro) – 20% SAF – 5%	Biodiesel (Rodo e Ferro) – 20% SAF – 5%
Otimização e diversificação dos modos de transportes de carga	Expansão das malhas ferroviária e aquática	Cenário 4 do PNL - Leva em conta a manutenção e finalização dos empreendimentos de infraestrutura em execução e com orçamento previsto no PPA, a implementação dos empreendimentos de parcerias qualificados no PPI até maio de 2021, a implementação da carteira de empreendimentos de curto prazo consolidada do Ministério dos Transportes e a os impactos do programa “BR do Mar”.		
Eletromobilidade (% médio de licenciamentos e da frota circulante) (-50% no custo da bateria em 2050 em relação a 2022 – Cenário tendencial da NREL)	BEV	Leves (5%), C. leve (5%), transporte público (11%), caminhões TUC (15%)	Leves (20%), C. leve (8%), transporte público (25%), caminhões TUC (20%)	Leves (33%), C. leve (25%), transporte público (33%), caminhões TUC (33%)
	Híbridos	Leves (15%), C. leve (1%), caminhões pesados (2%)	Leves (32%), C. leve (11%), caminhões pesados (8%)	Leves (50%), C. leve (27%), caminhões pesados (20%)
Eficiência energética	Programas de certificação	Mover, PBEV, PLVB e Despoluir		
Uso de energia - Resultados (% em relação ao consumo energético do setor)	Biocombustíveis	29%	29%	28%
	Eletricidade	0,5%	1,5%	3,4%

FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

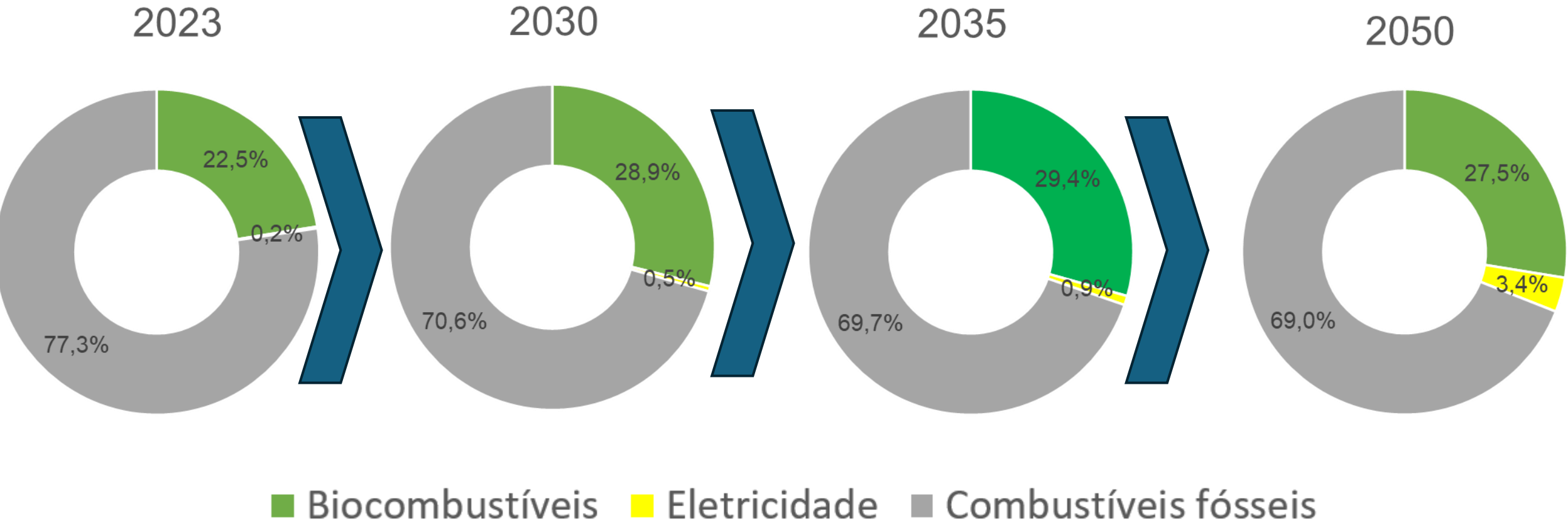
Estimativa da demanda energética para o cenário de Referência

Projeção de crescimento de 51% na demanda energética até 2050 em comparação a 2023, impulsionada, em grande parte, pelo setor de transporte de carga, que representa 62% desse aumento.



FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

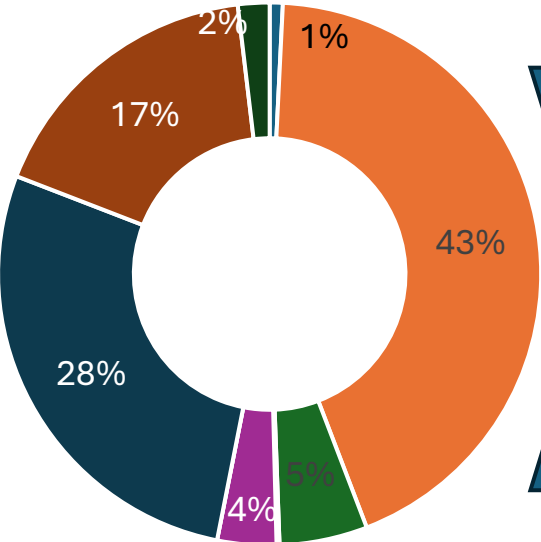
Estimativa da demanda energética para o cenário de Referência



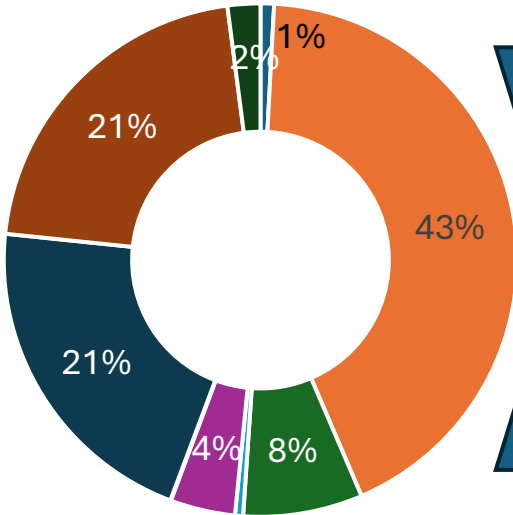
FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Estimativa da demanda energética para o cenário de Referência

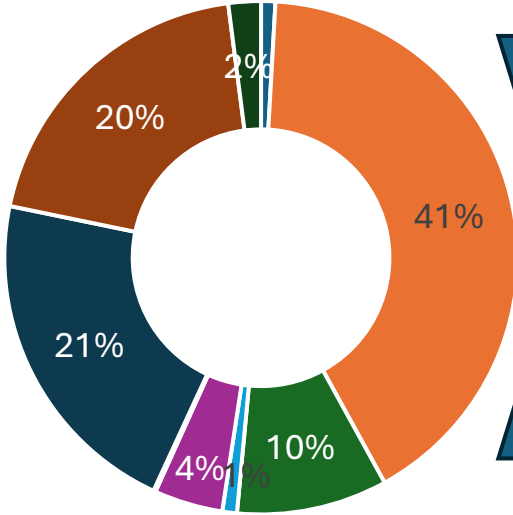
2023



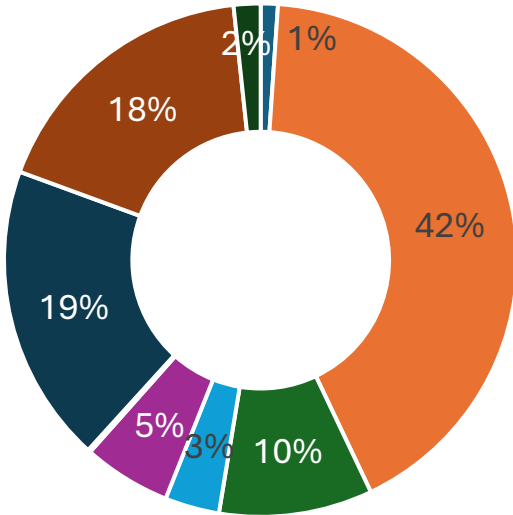
2030



2035



2050

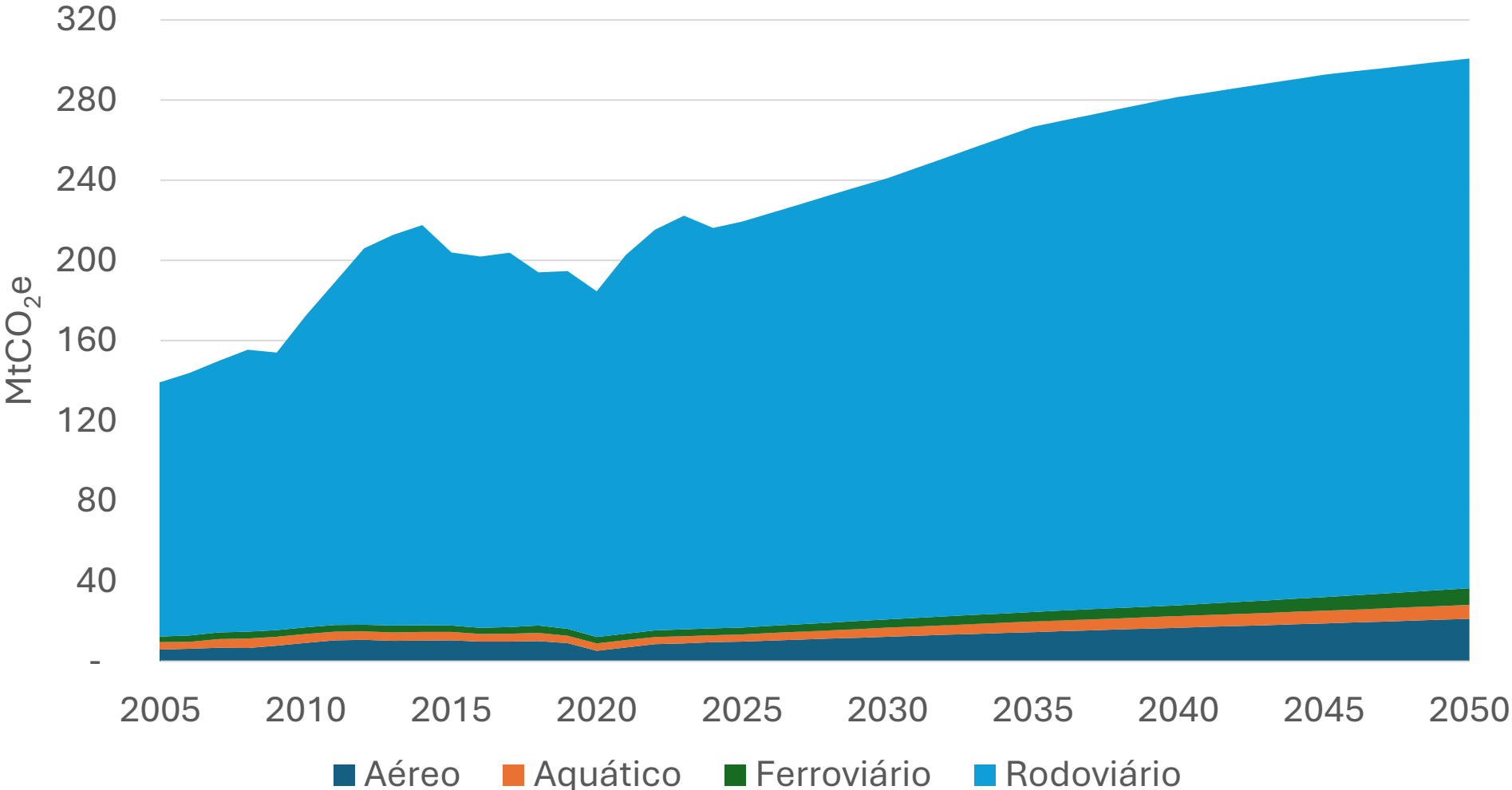


- Óleo combustível
- Eletricidade
- Gasolina
- Diesel
- Querosene de aviação
- Etanol
- Biodiesel
- SAF
- GNV

FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Estimativa das emissões do cenário de Referência

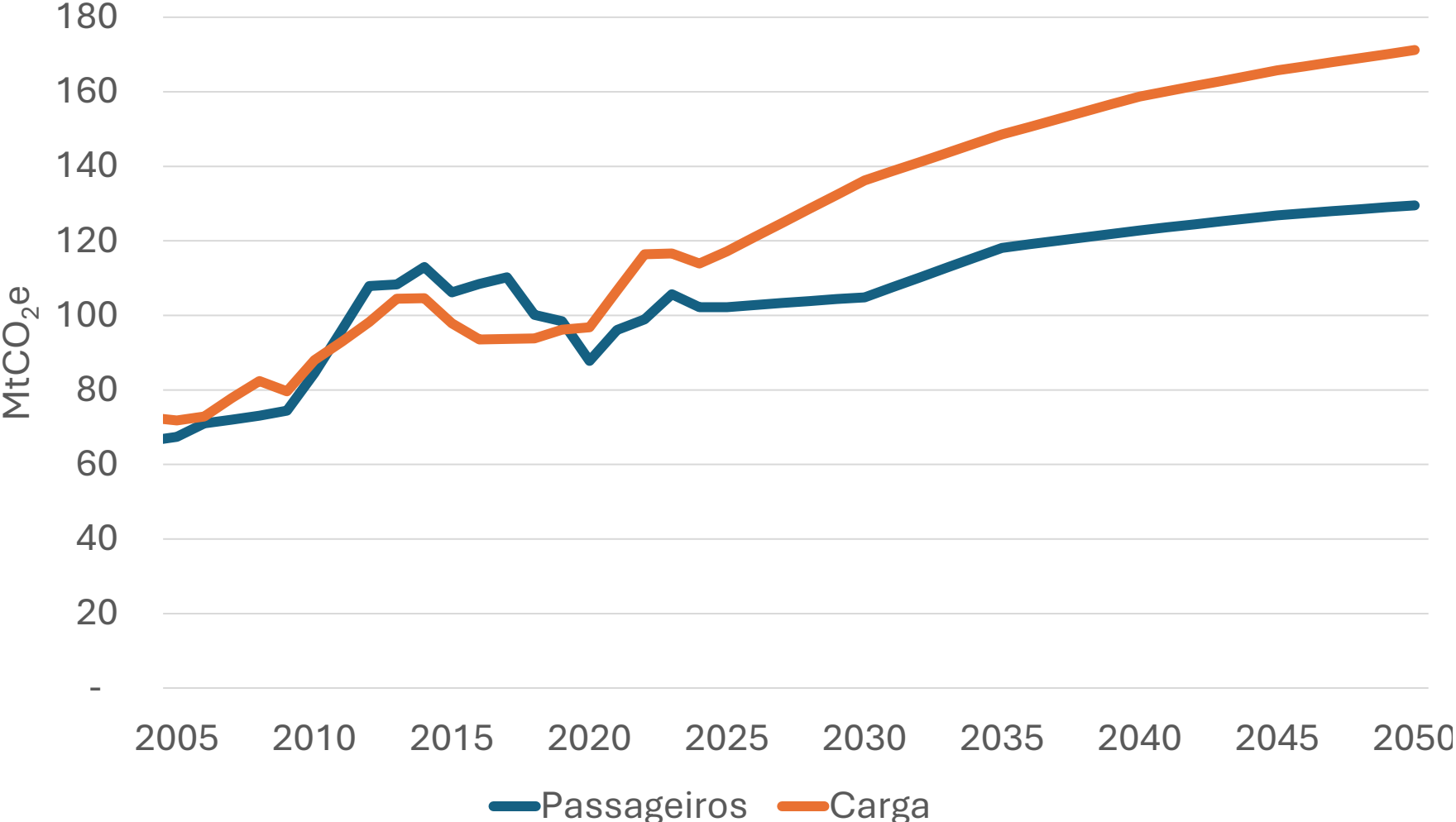
Projeção de crescimento de 35% nas emissões até 2050 em comparação a 2023, impulsionado, em grande parte, pelo setor transporte rodoviário de carga de longas distancias, seguido do transporte aéreo de passageiros.



FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Estimativa das emissões do cenário de Referência

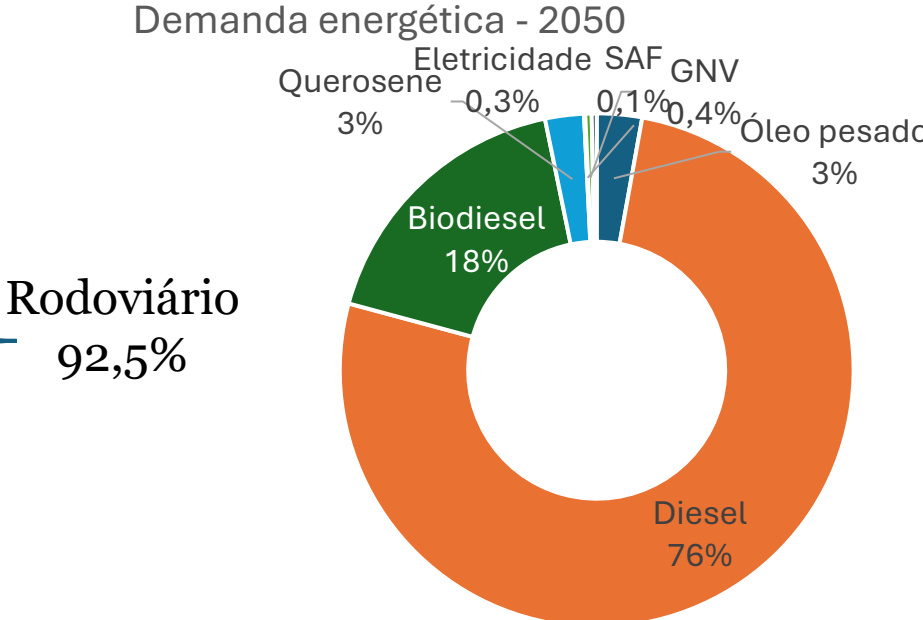
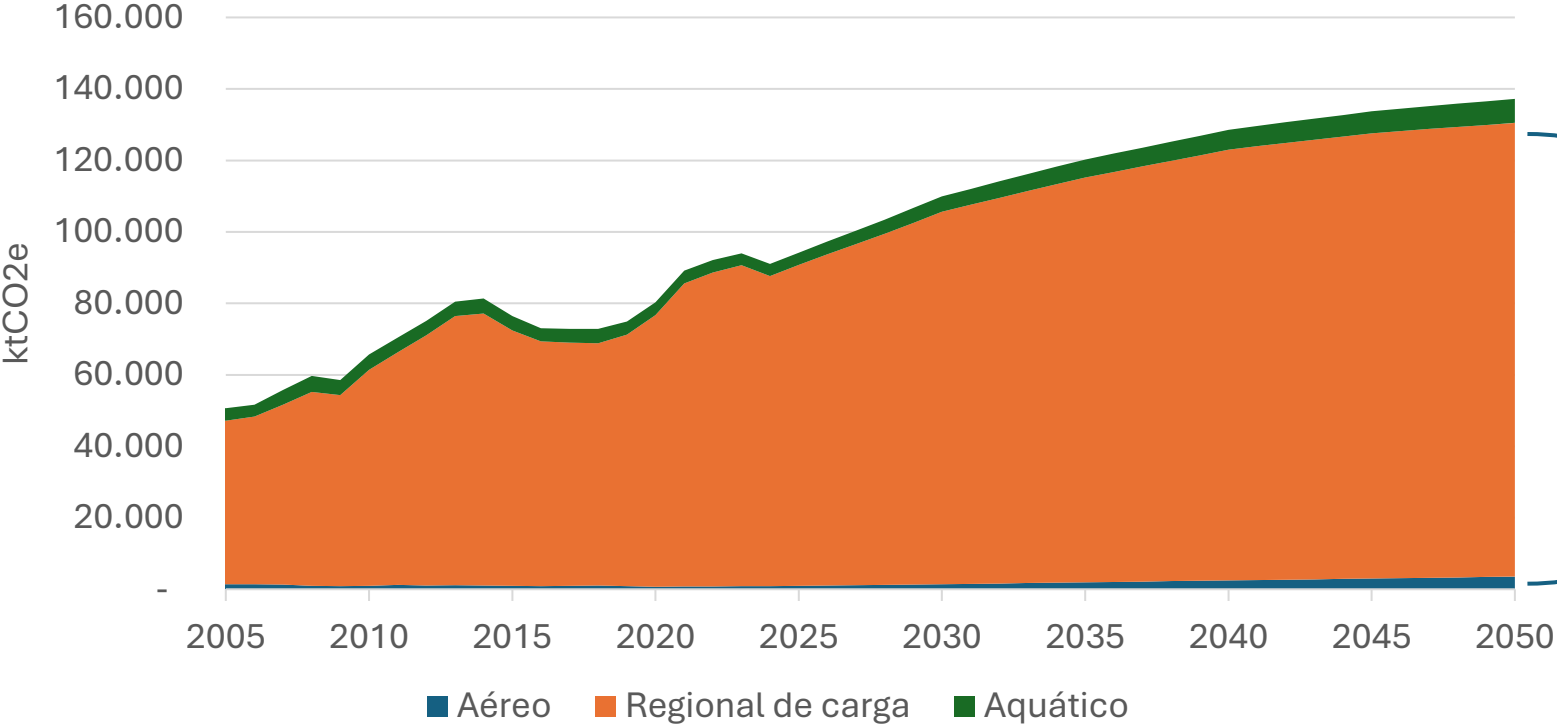
As emissões provenientes do transporte de carga superaram as do transporte de passageiros durante a pandemia e permanecem predominantes ao longo de todo o horizonte projetado.



FASE I – Análise do cenário de Referência – BR

Estimativa de emissões – enfoque no recorte do projeto

- Entre 2022 e 2050, as emissões dos modos aéreo, aquático e rodoviário (regional) tende a crescer cerca 49%, com o transporte rodoviário de longas distancias como principal responsável;
- Estes segmentos tendem a representar cerca de 46% das emissões do setor de transportes e cerca de 80% do transporte de carga;
- A estimativa que os biocombustíveis e a eletricidade representem 31% da demanda energética do setor. No entanto, para estes segmentos, sua participação será de apenas 18%.



FASE I – Síntese das medidas observadas

Biodiesel

A Lei nº 14.993 de 8/10/24 estabelece metas percentuais obrigatórias de adição de biodiesel, começando com 15% em 2025 e atingindo 20% em 2030, podendo chegar a 25%.

A Petrobras recebeu a certificação ISCC EU RED, confirmando que seu bunker renovável do Terminal de Rio Grande atende às normas ambientais da UE. O combustível possui até 0,5% de enxofre, caracterizando-o como óleo com baixo teor de enxofre (VLS), e contém 24% de biodiesel renovável, com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em cerca de 20%, dependendo da matéria-prima utilizada.

Há cases de sucesso no país de uso de 100% de biodiesel, como o da Distribuidora Potencial (Fornecedor Potencial Biodiesel) e da JBS (Fornecedora - Biopower). Para rodar com B100 em veículos convencionais, deve-se trocar itens como filtros e o *software* de gerenciamento do motor, o sistema custa cerca de R\$ 20.000,00 e são fornecidos pelo fabricante.

FASE I – Síntese das medidas observadas

Diesel verde

A Lei nº 14.993 de 8/10/24 estabelece a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde (“produzido a partir de matérias-primas exclusivamente derivadas de biomassa renovável”) em relação ao diesel comercializado ao consumidor em 3%, permitida a adição voluntária de diesel verde superior a esse limite

Tende a ter sua produção conjunta com SAF, conforme investimento da Vibra e da Brasil BioFuels (biorefinaria na Zona Franca de Manaus), tendo como base o óleo de palma (Rota HEFA);

Diversos estudos como da ANFAVEA, CEBRI, Estudo Brasil 2045, além do *feedback* de *stakeholders* (V WCPUET), apostam para o uso elevado de diesel verde adicionado ao diesel nos próximos anos, principalmente entre 2031 e 2050.

SAF

A Lei nº 14.993 de 8/10/24 estabelece que os operadores aéreos ficam obrigados a reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas por meio do uso de SAF, conforme os seguintes percentuais mínimos de redução: 1% em 2027 aumentando 1% a.a. até alcançar 10% em 2037. No entanto, no § 3 é apontado que o CNPE poderá alterar os percentuais de que trata o caput deste artigo, a qualquer tempo, por motivo justificado de interesse público, e, após a normalização das condições que motivaram a alteração, os referidos percentuais serão reestabelecidos.

FASE I – Síntese das medidas observadas

Biometano e GNV

A Lei nº 14.993, de 8/10/24, no artigo 17, estabelece metas anuais de redução de emissões de GEE no mercado de gás natural, com aumento na participação do biometano, passando de 1% em 2026 para 10% em 2035.

Os principais fabricantes de caminhões a gás natural e biometano incluem Scania, Iveco e Volkswagen, enquanto a MWM (Grupo Tupy) se destaca na conversão de veículos convencionais, com custos de transformação variando entre 270 e 330 mil reais, a depender da autonomia que é proporcional ao número de cilindros. Além disso, em relação ao rendimento energético (km/m³), a MWM aponta que o rendimento tende a ser similar a de um caminhão diesel, por exemplo, um caminhão com rendimento de 2 km/l se transformado teria um rendimento de 2 km/m³. No entanto, caso rode com biometano o rendimento tende a ser 5% menor a depender da qualidade deste biocombustível.

Quanto a produção de biometano, a MWM adota um modelo de negócios onde assume o CAPEX e OPEX dos biodigestores, sendo remunerada pela produção de energia elétrica, biometano e biofertilizante. Para isso, a propriedade deve gerar, pelo menos, 36 toneladas de fertilizante organomineral por dia.

As vantagens para as fazendas incluem redução de custos na gestão de resíduos, melhorias de imagem, e o benefício de evitar o CBAM (Mecanismo de Ajuste de Carbono na Fronteira), aumentando a lucratividade das exportações.

Além disso, o biometano pode ampliar a oferta de energia para caminhões, permitindo abastecimento tanto na costa (GNV) quanto no interior (biometano). A conversão de veículos também pode prolongar sua vida útil, possibilitando a reinstalação e/ou remanufatura do motor diesel.

FASE I – Síntese das medidas observadas

Desafios dos biocombustíveis

É fundamental assegurar que as distribuidoras cumpram as misturas regulamentadas de biocombustíveis, especialmente quando estes têm um custo superior ao do combustível fóssil. O Instituto Combustível Legal (ICL) e o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) notaram um aumento de irregularidades na venda de combustíveis, assim como problemas no balanço de massa em distribuidoras que não seguem normas adequadas.

Entidades como o Sindtrr e a Fecombustíveis também observaram essa tendência preocupante. Além das baixas retiradas em relação à demanda, o setor pede uma fiscalização mais rigorosa para garantir a segurança do abastecimento e a estabilidade do mercado. Essa fiscalização é essencial para assegurar práticas justas e produtos de qualidade para os consumidores.

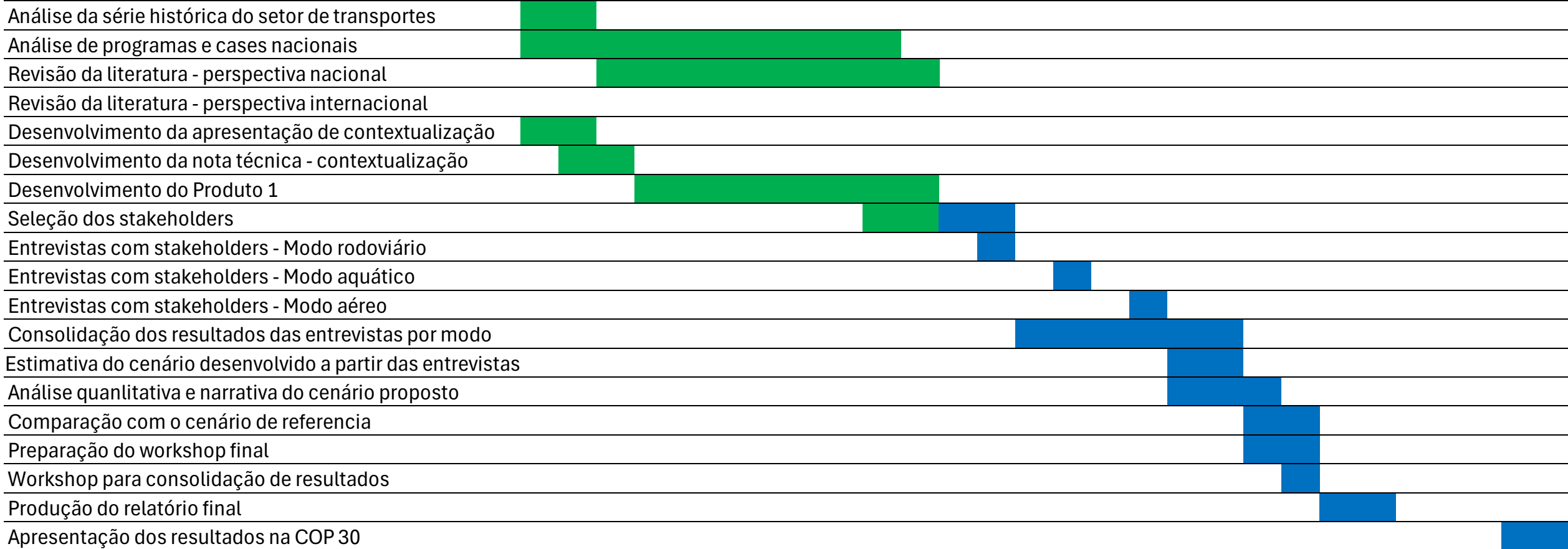
Ao enfrentar esses desafios, fortalecemos a confiabilidade do mercado de combustíveis e promovemos o desenvolvimento sustentável ao integrar biocombustíveis de forma eficiente na matriz energética do país.

Próximos passos

Cronograma

mês out/24 nov/24 dez/24 jan/25 fev/25 mar/25 abr/25 mai/25 jun/25 jul/25 ago/25 set/25 out/25 nov/25
 semana 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-2 3-4 1-4 1-2

Atividade



Referências Seleccionadas

- Guerra, A. M.; Sahay, T.; Gaspi, R. H.; Allan, B. Net Zero Industrial Policy Lab – Seizing Brazil’s opportunities in the energy transition. Geopolitical Brief n° 3. Johns Hopkins University, Baltimore, 2025.
- IEA (2023) Net Zero Roadmap: A global Pathway to keep the 1,5^a g Goal in reach. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- IPCC (2022). AR6 - Mitigation of Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- Organización Latinoamericana de Energia – OLADE. Uma introducción al sector de los biocombustibles em América Latina y el Caribe – El rol de los biocombustibles em la descarbonización de la matriz energética. Nota técnica n° 5, Quito, Ecuador, 2025.
- SLOCAT transport and climate change global status report. (2023, June 27). SLOCAT Transport and Climate Change Global Status Report. <https://tcc-gsr.com/>
- UNFCCC (2021), Upgrading Our Systems Together: A global challenge to accelerate sector breakthroughs for COP26 - and beyond, <https://racetozero.unfccc.int/wpcontent/uploads/2021/09/2030-breakthroughs-upgrading-our-systems-together.pdf>

www.coppe.ufrj.br

Suzana Kahn Ribeiro | Director
suzanak@adc.coppe.ufrj.br

