

## NOTA TÉCNICA

# Visão dos Especialistas para a Descarbonização do Transporte Aéreo Brasileiro: Impactos, Desafios e Oportunidades.

Setembro de 2025



## **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

## **Equipe Técnica**

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

## **Revisão Técnica**

Carine Lacerda  
Tamar Roitman

## **Design Gráfico e Diagramação:**

Vitor Olavo de Oliveira Castro Moreira  
Lyvia Costa dos Santos





## Resumo Executivo

Esta nota técnica, sumariza a visão dos especialistas do transporte aéreo brasileiro sobre os desafios, estratégias e oportunidades para a descarbonização do transporte aéreo de cargas do Brasil. Com base na resposta dos especialistas, o documento aborda temas como a probabilidade de adoção das medidas mitigadoras, como uso de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) e práticas de melhorias operacionais, além de discutir sobre as rotas tecnológicas para a produção do SAF.





## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento demográfico e econômico, a atividade de transportes deve aumentar, o que pode elevar a demanda de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Assim, a descarbonização do setor de transportes é um desafio a ser enfrentado para limitar as mudanças do clima (Gonçalves, 2022), uma vez que o setor de transportes é um dos principais consumidores de combustíveis fósseis, utilizando cerca de 95% dos derivados de petróleo ofertados no mundo (IEA, 2023).

Globalmente, as emissões diretas do setor de transporte foram de cerca de 8,9 GtCO<sub>2e</sub> em 2019, correspondendo a cerca de 15% do total de emissões de GEE e 23% das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia, sendo a maior fonte de emissões do setor. Destaca-se que o transporte rodoviário é responsável por 6,1 GtCO<sub>2e</sub> (69% do total). O transporte marítimo internacional e a aviação internacional são responsáveis, respectivamente, por 0,8 GtCO<sub>2e</sub> (9%) e 0,6 GtCO<sub>2e</sub> (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 internacional, o que torna a descarbonização deste segmento particularmente desafiadora (IPCC, 2022).

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), além disso, o setor de transportes foi responsável por 44% das emissões de CO<sub>2e</sub> do setor energético (SEEG, 2024), o que leva a necessidade de pensar em várias soluções, sem exclusão obrigatória do combustível fóssil, para a descarbonização deste setor, ainda mais se considerarmos que houve um crescimento de 47% do transporte de carga no Brasil de 2005 a 2015 (GONÇALVES e D'AGOSTO, 2017).

Além das ações que buscam aprimorar a eficiência operacional do setor e dos equipamentos por ele utilizados, 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. 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, 2024).

Dessa forma, esta nota técnica tem como objetivo apresentar os resultados preliminares do projeto de pesquisa “Roadmap para a Descarbonização do Transporte Rodoviário de Longa Distância, Marítimo e Aéreo de Cargas no Brasil” conduzido pelo Laboratório de Transporte de Carga (LTC) da COPPE/UFRJ com apoio do Instituto Clima e Sociedade (iCS), analisando, a partir de uma síntese da visão de especialistas do setor de qual serão as rotas e estratégias possivelmente adotadas para a descarbonização, fornecendo um panorama das perspectivas e dos caminhos a serem seguidos para a transição energética e tecnológica do transporte aéreo.



## 2. METODOLOGIA

---

Foi aplicada uma pesquisa estruturada com 5 especialistas selecionados do presente modo de transporte, que atuam nas áreas de engenharia aeroespacial, energias (exploração de petróleo e produção de combustíveis), produção de biocombustíveis e transporte aéreo, para os quais foi apresentado o contexto do projeto onde a pesquisa está inserida e do modo a ser avaliado. Os questionamentos incluídos na pesquisa foram baseados nos resultados obtidos a partir de uma revisão bibliográfica narrativa e documental, onde foram mapeadas as tendências nacionais e mundiais quanto a transição energética e tecnológica do transporte de carga (rodoviário de longa distância, marítimo e aéreo) e também dos resultados obtidos a partir do 5º Workshop Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes (WCPUET) (COSTA et al., 2024).

As perguntas do questionário foram do tipo escala de Likert para a probabilidade de uso das medidas de descarbonização (1 - pouco provável, 2 - menos provável, 3 - provável, 4 - mais provável e 5 - muito provável), relevância das barreiras para implementação das alternativas de descarbonização (barreira não relevante, pouco relevante, relevante, muito relevante e barreira crítica) e relevância das estratégias de descarbonização (estratégia não relevante, estratégia pouco relevante, relevante, muito relevante e estratégia crítica). Além disso, houve perguntas para classificação dos riscos em baixo, médio ou alto com relação ao potencial impacto e probabilidade de ocorrência. Além disso, foi realizado também um aprofundamento em qual seria a rota de produção do combustível alternativo e qual o percentual de mistura do biocombustível combustível aéreo é produtivo e economicamente viável para o Brasil, nos horizontes de 2035 e 2050. Por fim, foram feitas perguntas abertas onde os especialistas tiveram a oportunidade de deixar críticas e sugestões para a descarbonização do transporte aéreo de cargas do Brasil.



## 3. PANORAMA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE AÉREO DECARGAS

---

A seguir é apresentada uma análise da percepção dos especialistas com relação à descarbonização do transporte aéreo de cargas brasileiro. Como este estudo foi baseado na percepção dos especialistas com relação aos caminhos para a descarbonização do transporte aéreo, os resultados e conclusões apresentados se limitam às percepções deles.



### 3.1 Medidas de mitigação

Para entendermos qual a percepção dos especialistas com relação aos possíveis caminhos para descarbonização, foi indagado sobre qual a probabilidade, das medidas listadas, serem utilizadas para a descarbonização do modo aéreo, sendo classificadas em uma escala de Likert de 1 a 5, sendo 1 para pouco provável e 5 para muito provável. As medidas apresentadas foram as seguintes:

-  Aumento da eficiência em operações aéreas;
-  Modernização da frota de aeronaves com maior eficiência energética;
-  Otimização inteligente de rotas e alocação de frotas;
-  Uso de SAF (combustível sustentável para aviação).



Para os especialistas, o aumento da eficiência operacional e eficiência energética são as medidas com maior probabilidade de serem adotadas, com menor probabilidade da adoção da otimização inteligente de rotas, alocação de frotas e uso do SAF, entretanto eles consideram que o ponto focal dos investimentos e estratégias estarão voltados para o desenvolvimento das rotas tecnológicas para a produção do SAF.

### 3.2 Percepções sobre a descarbonização e rotas tecnológicas

Existiu um consenso de que a tendência para o uso de combustível alternativo estará focada na produção e uso de biodiesel convencional, onde 60% dos especialistas considerou esta rota como a principal e prioritária dos investimentos e políticas públicas para o horizonte 2026-2035 e 2035-2050 (Figura 1), sendo a segunda alternativa o uso de etanol somente (20%) ou associado ao uso do diesel verde (HVO - Óleo Vegetal Hidrotratado; 20%).

Houve um consenso entre os especialistas que o foco principal e prioritário está no uso do SAF (80%), sendo que para o horizonte de 2026-2035, 40% considerou o uso da rota a partir do etanol (Alcohol-to-Jet - AtJ) e 40% a partir de óleos e gorduras (rota HEFA), com 20% considerando a eficiência energética como foco principal (Figura 1), sendo que para o período de curto-médio prazo o foco é a rota HEFA, por ser considerada a opção mais competitiva e de implementação mais rápida e pela possibilidade de utilizar a capacidade ociosa de 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). Já no horizonte de 2035-2050, 100% dos especialistas consideraram que o foco dos investimentos e políticas públicas será o uso de SAF, com diferenciação apenas das rotas, onde 40% entendeu que seria via rota HEFA, 20% entendeu que seria o SAF na forma sintética (e-SAF) e 40% via rota AtJ (Figura 2). Nesse horizonte, a introdução da rota AtJ é fundamental para expandir a oferta de SAF de forma significativa. Com a eletrificação progressiva da frota de veículos leves, espera-se uma redução na demanda por etanol (anidro e hidratado) no Brasil. Esse excedente da produção nacional de etanol poderá ser direcionado para a produção de SAF via AtJ (DA COSTA, GONÇALVES E D'AGOSTO, 2025).

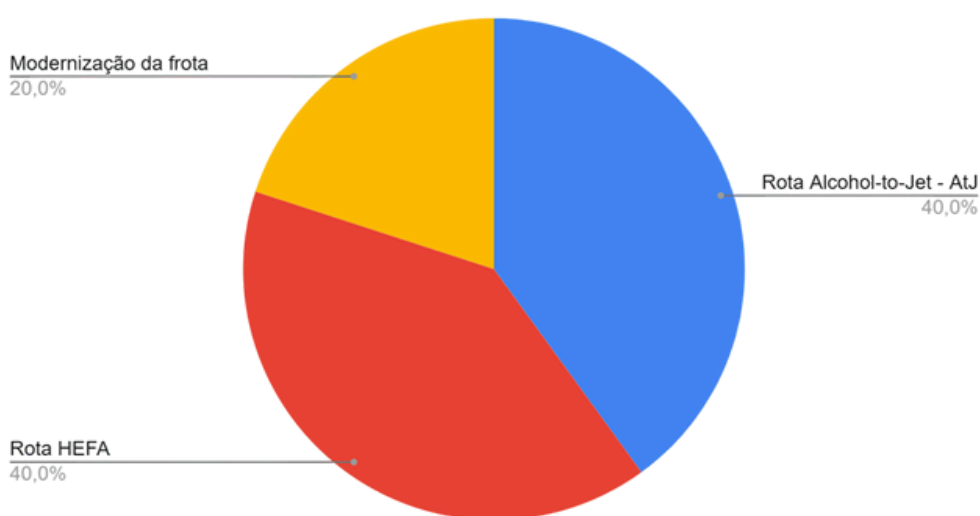


Figura 1: Foco principal e prioritário dos investimentos e políticas públicas (2026-2035).

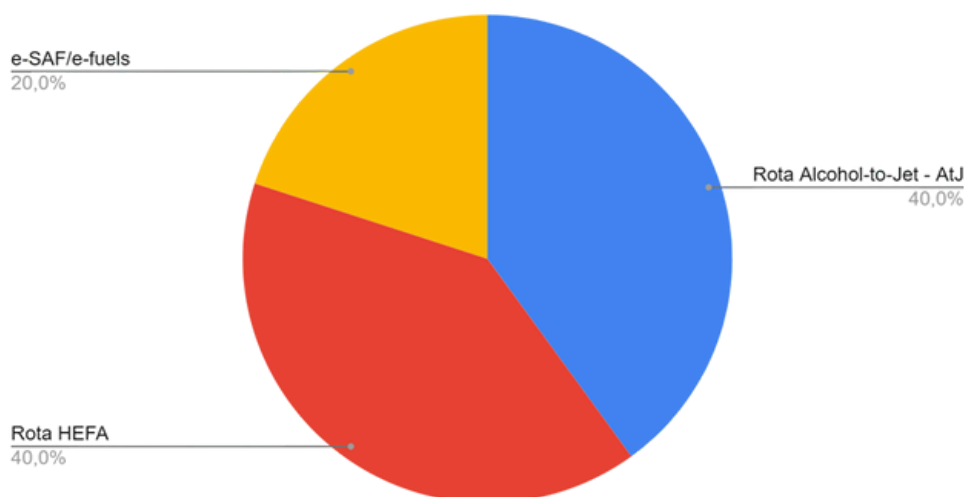


Figura 2: Foco principal e prioritário dos investimentos e políticas públicas (2035-2050).

Com relação a participação percentual do SAF na mistura com a querosene de aviação (QAV), 40% dos especialistas entendeu que o percentual economicamente factível é 10%, 40% considerou 20% como sendo o percentual economicamente factível e 20% considerou como factível 30% de mistura do SAF no QAV, isso levando em consideração o horizonte de 2035. Já para o horizonte de 2050, os especialistas consideram que haverá um salto considerável na participação do SAF, com 60% entendendo que a participação será de 50%, 20% que será de 80% e 20% que será de 100%.

Com relação aos riscos relacionados à descarbonização do transporte aéreo, os principais desafios são os custos operacionais e a volatilidade na regulamentação internacional com uma alta probabilidade de ocorrência e alto impacto, uma vez que o custo para produção do SAF é elevada, impactando diretamente nos custos operacionais, uma vez que, como notado por um dos especialistas, o combustível corresponde a cerca de 40% dos custos operacionais, além disso, ainda existe a possibilidade de que pelo alto valor agregado desse combustível e a rigorosidade das regulamentações internacionais, os produtores nacionais priorizem os mercados estrangeiros para a comercialização do combustível, impactando a disponibilidade para o mercado interno.

Na Figura 3, é apresentada a matriz de risco para o transporte aéreo. Para a alocação dos riscos dentro da matriz, para casos de convergência da resposta foi considerada a moda, quando não houve convergência entre as respostas foi considerada a média.

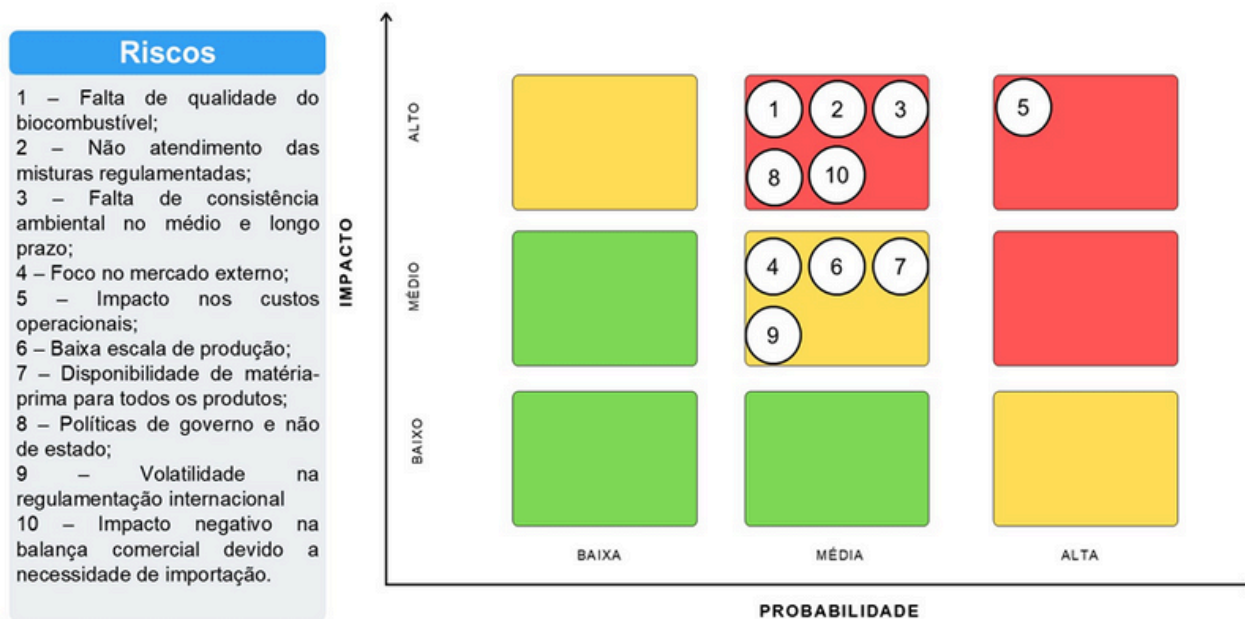


Figura 3: Matriz de risco do transporte aéreo de cargas.

Os especialistas também enfatizam a importância de políticas públicas (risco de alto impacto) e estratégias para garantir as misturas regulamentadas e que favoreçam o mercado interno, trazendo segurança para quem atua no setor e incentivando a descarbonização do modo, além disso, a falta de políticas públicas e a ausência de regulamentação são consideradas barreiras críticas para o avanço da descarbonização do transporte aéreo, juntamente com a falta de subsídios e linhas de créditos, uma vez que exige um investimento elevado para a viabilização da transição energética.

No que diz respeito às estratégias para o avanço do uso do SAF no Brasil, os especialistas consideraram como crítica a criação de normas e regulamentações que garantam o uso adequado e com padrões claros do combustível, além do investimento em pesquisa e desenvolvimento, já que existem diversas rotas que podem viabilizar a produção do SAF. Em adição, a existência de subsídios financeiros, isenções fiscais e tributárias e a criação de uma política nacional de uso de energia em transportes serão fundamentais para a ampliação da adesão ao SAF pelo setor e aceleração do processo de descarbonização do transporte aéreo.

Apesar de ser uma preocupação a disputa com outros mercados pelo SAF, ainda é do interesse nacional que o Brasil se torne referência e até mesmo um líder global na produção e exportação do SAF, para tal, os especialistas entenderam que deve ser priorizado para os próximos anos a produção do SAF pela rota AtJ (60%) e pela rota HEFA (40%).



#### 4. RECOMENDAÇÕES

Com base na percepção dos especialistas, recomenda-se:

- Estabelecer um Marco Regulatório\* Sólido para o SAF: Priorizar a criação de uma política nacional para o uso de energia em transportes, incluindo metas obrigatórias, garantir os incentivos fiscais e linhas de crédito específicas para a produção e uso de SAF, visando desonerar o custo final e garantir a competitividade do setor;



- Apoiar a Pesquisa e Desenvolvimento (P&P): Destinar recursos para P&P em rotas de produção do SAF, visando a redução de custos e ganho de escala de produção;
- Investir em Infraestrutura Aeroportuária: Investir na modernização dos aeroportos brasileiros para capacitá-los a receber, armazenar e abastecer aeronaves com SAF;
- Promover a Colaboração Setorial e Parcerias Público-Privadas (PPP): Estimular a formação de consórcios e PPPs entre governos, empresas aéreas, produtores de SAF e centros de pesquisa para compartilhar riscos, incentivar investimentos e acelerar a inovação;
- Incentivar Práticas Operacionais Eficientes: Continuar promovendo e incentivando a adoção de práticas de aumento da eficiência energética e otimização inteligente de rotas, que oferecem ganhos de descarbonização imediatos e complementam o uso do combustível alternativo;
- Fornecer Subsídios no Curto Prazo: Considerar subsídios financeiros nos primeiros anos da transição para SAF, dado o diferencial de preço em relação ao combustível fóssil e o impacto nos custos operacionais das companhias aéreas;
- Monitorar e Avaliar o Progresso: Implementar um sistema robusto de monitoramento das emissões e do progresso da descarbonização para ajustar as estratégias conforme necessário.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A percepção dos especialistas aponta que, a curto prazo, medidas mitigadoras voltadas para o aumento da eficiência energética e operacional terão maior probabilidade de aplicação, apesar disso, o ponto crítico para a viabilização da descarbonização do transporte aéreo está no desenvolvimento e aprimoramento da produção de SAF, com investimento para definir qual a rota tecnológica mais eficiente e economicamente viável para avanço e ganho de escala da produção do combustível. Levando em consideração o horizonte até 2035, houve um impasse entre a rota de produção a partir do etanol (AtJ) e produção a partir de óleos e gorduras (HEFA), com a rota HEFA tendo protagonismo devido a infraestrutura já amadurecida de produção, associada a capacidade de aproveitamento dos excedentes das refinarias, já para 2050 foi introduzida a possibilidade de produção de combustíveis sintéticos, além das duas mencionadas anteriormente, com o protagonismo sendo a rota AtJ, uma vez que com o avanço do uso de veículos elétricos (passageiro) teremos um possível excedente de etanol que pode ser redirecionado para a produção do SAF.

A ausência de políticas públicas claras, normas e regulamentações consistentes e elevado investimento para transição do combustível, são vistas como as principais barreiras para o avanço da descarbonização do transporte aéreo, sendo estratégias com o estabelecimento de um marco regulatório claro para o SAF e avanço das pesquisas das rotas de produção do combustível serão fundamentais para que seja viabilizado a adesão do SAF pelo setor.



*\*Os especialistas consideraram isso como um fator importante, apesar de já existir a Lei do Combustível do Futuro. Isto posto, no Roadmap será explorado como aprimorar a Lei para superarmos esta barreira.*

## REFERÊNCIAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024. Combustíveis de Aviação. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>

COSTA, M. G. et al. V Workshop de Cenários Prospectivos de Uso de Energia em Transportes. Rio de Janeiro, RJ: IBTS, 2024.

DA COSTA, M. G.; GONÇALVES, D. N. S.; D'Agosto, M. A. From commodities to high-value exports: biofuels as a catalyst for Brazil's energy transition and economic transformation. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 81, p. 104416, 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2024a. Plano Decenal de Expansão de energia 2034. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2024b. Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil: Perspectivas Futuras. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02\\_Combust%C3%ADveis\\_Sustent%C3%A1veis\\_Avia%C3%A7%C3%A3o\\_Brasil.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_Combust%C3%ADveis_Sustent%C3%A1veis_Avia%C3%A7%C3%A3o_Brasil.pdf)

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2022. Revista Pesquisa FAPESP. Combustível de Aviação Pode ser Produzido a partir de CO2. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/combustivel-de-aviacao-pode-ser-produzido-a-partir-de-co2/>

GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. de A. Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions, Business as Usual (BAU) scenario – 2050, Final Report. 1ª ed, Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS), Rio de Janeiro, 2017.

GONÇALVES, D. N. S. Elaboração de Cenários Prospectivos para o Uso de Energia e Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor de Transportes Brasileiro - Uma Abordagem Multinível. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

IEA – International Energy Agency, 2023. Net Zero Roadmap: A global Pathway to keep the 1,5ª g Goal in reach. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. AR6 - Mitigation of Climate Change. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf)

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

United Nations, 2023. Review of Maritime Transport - 2023, Towards a green and just transition. United Nations Conference on trade and development. Disponível em: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf).





## Anexo I

### Glossário dos combustíveis

**Combustível Sustentável de Aviação (SAF):** Combustível alternativo para a aviação produzido a partir de matéria prima renovável com propriedades análogas ao querosene de aviação, sendo considerado *drop-in*, com variação apenas da rota de produção (EPE, 2024).

**Querosene de Aviação (QAV):** O querosene de aviação, também conhecido como Jet-A1 ou QAV, é um derivado de petróleo obtido por processos de refino como o fracionamento por destilação atmosférica, contendo cadeias de 11 a 12 carbonos e utilizado em motores movidos a turbina (ANP, 2024).

**Rota Alcohol-to-Jet (AtJ):** SAF produzido a partir de álcoois, cuja tecnologia de produção já está consolidada com a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar (EPE, 2024).

**Rota a partir de óleos e gorduras (HEFA):** SAF produzido a partir de óleos e gorduras, sendo a rota tecnológica mais madura e comum para a produção desse combustível (EPE, 2024).

**Combustíveis sintéticos (e-SAF/e-fuels):** Combustível sintetizado a partir de rotas tecnológicas e que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. No caso do e-SAF o método de produção é o Power-to-Liquid (PtL) combinando o hidrogênio verde com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (FAPESP, 2022).





*Por um Brasil resiliente e  
descarbonizado.*



Laboratório de  
Transporte de Carga

**COPPE**  
UFRJ

