

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
MESTRADO EM ECONOMIA

ANNA ERIKA COLARES MACEDO

Matrícula 12412ECO002

A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do segmento de
aviação civil brasileiro

UBERLÂNDIA

2026

ANNA ERIKA COLARES MACEDO

Matrícula 12412ECO002

**A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do segmento de
aviação civil brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Garcia Ribeiro de S. Silva.

UBERLÂNDIA

2026

ANNA ERIKA COLARES MACEDO

Matrícula 12412ECO002

A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do segmento de aviação civil brasileiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cássio Garcia Ribeiro de S. Silva

Prof. Dr. Daniel Caixeta Andrade

Prof. Dr. Marcos José Barbieri Ferreira

UBERLÂNDIA

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M141d Macedo, Anna Erika Colares, 1990-
2026 A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do
segmento de aviação civil brasileiro. [recurso eletrônico] / Anna
Erika Colares Macedo. - 2026.

Orientador: Cassio Garcia Ribeiro Soares da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Economia.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.302>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Economia. I. Silva, Cassio Garcia Ribeiro Soares da, 1979-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Economia. III. Título.

CDU: 330

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Economia

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1J, Sala 218 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4315 - www.ppge.ie.ufu.br - ppge@ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Economia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, Nº 340, PPGE				
Data:	29 de abril de 2026	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:10
Matrícula do Discente:	12412ECO002				
Nome do Discente:	Anna Erika Colares Macedo				
Título do Trabalho:	A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do segmento de aviação civil brasileiro				
Área de concentração:	Desenvolvimento Econômico				
Linha de pesquisa:	Análise de Políticas Públicas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Impactos tecnológicos do KC-390 sobre a cadeia aeronáutica brasileira				

Reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Economia, assim composta: Prof. Dr. Daniel Caixeta Andrade - UFU; Prof. Dr. Marcos José Barbieri Ferreira - UNICAMP; Prof. Dr. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva - UFU presidente da mesa. Ressalta-se que em conformidade com deliberação do Colegiado do PPGE e manifestação do orientador, a participação da aluna e dos membros da banca ocorreu de forma remota. O Prof. Dr. Marcos José Barbieri Ferreira participou desde a cidade de Campinas (SP). A aluna participou desde a cidade de Indaiatuba (SP). Os demais membros da banca participaram desde a cidade de Uberlândia (MG).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva apresentou a Banca Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cassio Garcia Ribeiro Soares da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Caixeta Andrade, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos José Barbieri Ferreira, Usuário Externo**, em 29/04/2026, às 21:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7211400** e o código CRC **3F365230**.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE – Agência Internacional de Energia

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAF – Combustível de Aviação Fóssil

CAFE – Corporate Average Fuel Economy

CBIO – Crédito de Descarbonização

CIDE – Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico

CO₂ – Dióxido de Carbono

COP – Conferência das Partes

ECLIF – Emission and Climate Impact of Alternative Fuels

EI – Energy Institute

ETS – Emissions Trading System

EV – Electric Vehicle

FAME – Faster Adoption and Manufacturing of Electric Vehicles

GEE – Gases de Efeito Estufa

Gt – Gigatonelada

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEA – International Energy Agency

II – Imposto de Importação

IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados

ISEW – Index of Sustainable Economic Welfare

IATA – International Air Transport Association

JIG – Joint Inspection Group

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MME – Ministério de Minas e Energia

MPMEs – Micro, Pequenas e Médias Empresas

MRV – Monitoramento, Relato e Verificação

Mt – Megatonelada

NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

NZE – Net Zero Emissions

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PIS/Cofins – Programa de Integração Social / Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

PM E-DRIVE – Prime Minister Electric Drive Revolution in Innovative Vehicle Enhancement

ProBioQAV – Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação

QAV – Querosene de Aviação

RED II – Renewable Energy Directive II

RECAP – Regime Especial de Aquisição de Bens de Capital

REIDI – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura

SAF – Sustainable Aviation Fuel

TES – Total Energy Supply

UNEM – União Nacional do Etanol de Milho

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

ZEV – Zero Emission Vehicle

AGRADECIMENTOS

É chegada a hora de agradecer. A emoção me toma e escrevo estas palavras em meio a lágrimas. Primeiramente, agradeço a Deus, que me concedeu vida, força e resiliência para chegar até aqui. Sem a Tua misericórdia e infinita bondade, nada disso seria possível.

Agradeço à minha família, pela paciência, parceria e compreensão. Em um dos momentos mais sensíveis de nossas vidas, decidi enfrentar o desafio de retomar os estudos, algo que antes era apenas um sonho e que hoje concluo como uma grande realização pessoal. Dedico esta pesquisa à minha mãe, Dora, que, sendo mãe solo no interior de Minas Gerais, enfrentou todas as dificuldades inerentes à criação de um filho com dignidade. Nunca soltou minha mão e jamais deixou de acreditar na minha capacidade. Ela foi e continua sendo a maior incentivadora deste projeto. Mãe, obrigada por acreditar em mim.

Aos meus filhos, Aurora e Augusto, que por vezes sentiram minha ausência, espero que um dia compreendam que a mamãe buscava construir um futuro melhor para nós. Obrigada por serem exatamente como são e por darem sentido à minha vida.

Agradeço também ao meu marido, Neto, que talvez nunca tenha compreendido plenamente minha decisão de voltar a estudar, mas que, embora não tenha concordado com essa escolha, soube respeitar meu desejo de seguir em frente, inclusive quando o mundo parecia desabar sobre nós. Obrigada por permanecer ao meu lado, mesmo sem entender todas as minhas motivações.

Às técnicas de enfermagem, enfermeiras e fisioterapeutas que cuidaram do meu filho na minha ausência como se fosse delas, deixo minha profunda gratidão. Aos médicos que fizeram de suas mãos instrumentos de cura e esperança, zelando pelo Augusto e por mim ao longo de parte dessa caminhada, meu muito obrigada. Em especial, agradeço à Dra. Fernanda e à Dra. Julianne.

À minha psicóloga, Yohanna que há anos é meu suporte emocional e pilar na construção de uma mente saudável em meio ao caos.

Não posso deixar de agradecer à Camila Lima Bazani, secretária do PPGE, que sempre me auxiliou em minhas demandas acadêmicas e pessoais. Sempre atenciosa, dedicada e gentil, Camila é, sem dúvida, um ser humano iluminado.

Aos professores doutores que fizeram parte dessa trajetória, meu sincero agradecimento. Em especial, ao professor Carlos César Santejo Saiani, que desde minha chegada à UFU me acolheu, ouviu minhas necessidades, compreendeu minhas particularidades e me apoiou ao longo da jornada. Aos professores das disciplinas que cursei — Ana Paula Macedo de Avellar, Marisa dos Reis Azevedo Botelho, Daniel Caixeta Andrade, Cleomar Gomes da Silva, Júlio Fernando Costa Santos e Humberto Eduardo de Paula Martins — agradeço pelos ensinamentos, pela compreensão, pela disponibilidade e, sobretudo, pela humanidade com que conduziram cada etapa do meu aprendizado. A vocês, minha admiração como docentes e como pessoas.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao professor Dr. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva, meu orientador, a quem, confesso, desorientei em alguns momentos, especialmente quando decidi me aventurar em uma pesquisa de campo com prazo tão curto. Obrigada por confiar em mim e por me guiar com dedicação e generosidade. Este estudo certamente não teria sido concluído sem seu apoio e comprometimento.

Agradeço à CAPES, pelo investimento na ciência e pelo suporte financeiro que possibilitou minha dedicação exclusiva a esta pesquisa, e ao CEP-UFU, pela avaliação e autorização da pesquisa de campo, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos que conquistei ao longo desta caminhada, especialmente aos colegas de turma e monitores, que foram uma rede de apoio essencial durante as disciplinas, nos grupos de estudo, nos trabalhos acadêmicos e nos seminários realizados em conjunto.

Por fim, reconheço que nenhum trabalho é fruto apenas do esforço individual. Cada um de vocês foi essencial para a construção e conclusão desta dissertação. Deixo aqui meu mais profundo e sincero agradecimento.

RESUMO

A descarbonização da aviação civil constitui um dos principais desafios da transição energética global, uma vez que o setor depende de combustíveis de alta densidade energética e apresenta limitações tecnológicas para substituição imediata do querosene fóssil. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuels* – SAF) têm sido apontados por organismos internacionais como uma das principais alternativas para a redução das emissões do transporte aéreo. O presente estudo analisa os avanços, desafios e perspectivas para a implementação do SAF no Brasil, considerando o desenvolvimento do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) e seu alinhamento com iniciativas internacionais de descarbonização, como o CORSIA da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e o programa Fly Net Zero da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA). A pesquisa adota abordagem qualitativa e exploratória, combinando revisão bibliográfica, análise institucional e pesquisa de campo. A investigação empírica foi realizada por meio da aplicação de questionário estruturado baseado em escala Likert direcionado a especialistas e profissionais atuantes em diferentes segmentos da cadeia produtiva do SAF no Brasil, totalizando 53 respostas válidas. Os resultados indicam que, embora o país apresente vantagens comparativas relevantes, como disponibilidade de biomassa e experiência na produção de biocombustíveis, a consolidação de um mercado de SAF depende da superação de desafios regulatórios, tributários e logísticos, além do fortalecimento de mecanismos de financiamento e coordenação institucional. A pesquisa também evidencia assimetrias nas percepções entre diferentes elos da cadeia produtiva, especialmente em relação ao papel das políticas públicas e dos instrumentos de precificação de carbono. Conclui-se que o desenvolvimento do SAF no Brasil dependerá da articulação entre políticas energéticas, industriais e ambientais, capazes de transformar o potencial produtivo nacional em vantagem competitiva no processo global de descarbonização da aviação.

Palavras-chave: Combustível sustentável de aviação; transição energética; descarbonização da aviação; políticas públicas; SAF no Brasil.

ABSTRACT

The decarbonization of civil aviation represents one of the major challenges of the global energy transition, as the sector relies on high-energy-density fuels and faces technological limitations for the immediate replacement of fossil jet fuel. In this context, Sustainable Aviation Fuels (SAF) have been identified by international organizations as one of the main alternatives for reducing greenhouse gas emissions from air transport. This study analyzes the progress, challenges, and prospects for the implementation of SAF in Brazil, considering the development of the National Sustainable Aviation Fuel Program (ProBioQAV) and its alignment with international decarbonization initiatives such as the International Civil Aviation Organization's CORSIA scheme and the International Air Transport Association's Fly Net Zero program. The research adopts a qualitative and exploratory approach, combining literature review, institutional analysis, and field research. The empirical investigation was conducted through a structured questionnaire based on a Likert scale directed at specialists and professionals from different segments of the SAF value chain in Brazil, resulting in 53 valid responses. The findings indicate that although Brazil has important comparative advantages, such as abundant biomass availability and consolidated experience in biofuel production, the development of a SAF market depends on overcoming regulatory, fiscal, and logistical barriers, as well as strengthening financial mechanisms and institutional coordination. The results also reveal asymmetries in the perceptions of different stakeholders within the value chain, particularly regarding the role of public policies and carbon pricing instruments. The study concludes that the successful development of SAF in Brazil will depend on the articulation of energy, industrial, and environmental policies capable of transforming the country's productive potential into a competitive advantage in the global aviation decarbonization process.

Keywords: Sustainable Aviation Fuel; energy transition; aviation decarbonization; public policy; Brazil.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades dos combustíveis queimados durante os experimentos ECLIF1 e ECLIF2/ND-MAX.	55
Tabela 2. Tabela de resumo comparativo das companhias aéreas.....	70
Tabela 3. Tabela de rotas tecnológicas para SAF	80
Tabela 4- Distribuição da amostra por elo de atores (n=53)	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolução das emissões globais totais de Gases do Efeito Estufa	26
Gráfico 2. Frequência de desastres naturais por tipo.	29
Gráfico 3. Emissões de CO ² (MTCO ²)	29
Gráfico 4. Mudança Média da Temperatura Anual (°C).....	31
Gráfico 5. Principais emissores de GEE entre os anos 2002 e 2022.	31
Gráfico 6. Oferta total de energia por fonte - Mundo (TJ) - Segmentos ordenados	44
Gráfico 7. Emissões globais de CO ₂ relacionadas à energia, 2000-2022, e no cenário Net Zero, 2030.	47
Gráfico 8. Alavancas de ação para reduções das emissões de CO ₂ da aviação até 2050. A barra sólida indica o caso central e as linhas pretas indicam reduções máximas e mínimas com base nos cenários modelados.	59
Gráfico 9. Série histórica RPK doméstico.	75
Gráfico 10 - Distribuição da amostra segundo o tipo de organização em que atua (D1).....	84
Gráfico 11- Distribuição da amostra segundo função/cargo (D2)	85
Gráfico 12 - Distribuição da amostra segundo tempo de experiência no setor (D3)	86
Gráfico 13 - Percepções sobre a viabilidade regulatória do SAF no Brasil, por grupo de respondentes	88
Gráfico 14 - Percepções sobre a viabilidade econômica do SAF no Brasil, por grupo de respondentes	94
Gráfico 15 - Percepções sobre a capacidade produtiva e expansão da oferta de SAF no Brasil	99
Gráfico 16 - Percepções dos usuários estratégicos sobre a adoção operacional do SAF.....	103

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. REFERENCIAL TEÓRICO: ECONOMIA ECOLÓGICA, MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESCARBONIZAÇÃO	19
1.1 Aquecimento global e mudanças climáticas: causas, efeitos e principais emissores. 26	
1.2 A descarbonização da economia como imperativo global	33
1.3 Instrumentos econômicos para mitigação: mercado de carbono, tributos verdes, incentivos.....	35
1.4 Transição energética como resposta estratégica à crise ambiental.....	43
2. A AVIAÇÃO CIVIL NO CONTEXTO DA DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL.....	52
2.1 Particularidades das emissões do setor aéreo.....	53
2.2 Soluções globais para descarbonizar a aviação.....	58
2.3 Iniciativas internacionais relevantes	65
2.4 O posicionamento das companhias aéreas com maior receita internacional e das companhias aéreas atuantes no Brasil frente a transição energética.	68
3. O PROBIOQAV E AS PERSPECTIVAS BRASILEIRAS PARA O SAF	74
3.1 O Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) ...	76
3.2 As rotas tecnológicas de SAF desenvolvidas no Brasil e seus níveis de prontidão 79	
3.3 Evidência empírica: percepções da cadeia do SAF.....	83
3.3.1 Perfil da amostra e credibilidade da evidência empírica	83
3.4 Resultados da pesquisa de campo.....	87
3.4.1 Viabilidade regulatória e coordenação institucional	88
3.4.2 Viabilidade econômica e condições de mercado	93
3.4.3 Capacidade produtiva, logística e escala	98
3.4.4 Adoção operacional e posicionamento dos usuários estratégicos	102
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICES	121
Apêndice A – Questionário aplicado a pesquisa de campo.....	121
Apêndice B – Modelo genérico de convite à participação da pesquisa.....	132
ANEXOS.....	134
Anexo 1. Parecer do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP/UFU)	134

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas consolidaram-se nas últimas décadas como um dos principais desafios ambientais, econômicos e políticos do século XXI. O aumento persistente das emissões de gases de efeito estufa (GEE), decorrente sobretudo da expansão industrial, da intensificação do consumo energético e da dependência global de combustíveis fósseis, tem contribuído para a elevação da temperatura média global e para a intensificação de eventos climáticos extremos. A elevação do nível do mar, o aumento da frequência de secas e inundações e a perda acelerada de biodiversidade indicam que o atual modelo de desenvolvimento econômico apresenta limites ambientais cada vez mais evidentes (STERN, 2007; DIETZ, 2015).

Diante desse cenário, a descarbonização da economia tornou-se uma prioridade central nas agendas internacionais de política climática. Diversos países e organismos multilaterais passaram a estabelecer metas de neutralidade de carbono, com o objetivo de reduzir progressivamente a dependência de combustíveis fósseis e promover a transição para sistemas energéticos mais sustentáveis. Nesse contexto, a literatura da economia ecológica tem contribuído para ampliar a compreensão sobre os limites biofísicos do crescimento econômico e sobre a necessidade de reorientar os sistemas produtivos em direção a padrões mais compatíveis com a sustentabilidade ambiental. Autores como Daly (1999) e Georgescu-Roegen (2005) destacam que a economia deve ser compreendida como um subsistema do ecossistema global, sujeito às restrições impostas pela disponibilidade de recursos naturais e pela capacidade de assimilação dos resíduos gerados pelas atividades humanas.

Entre os setores econômicos que enfrentam maiores desafios para reduzir suas emissões destaca-se o transporte, responsável por parcela significativa das emissões globais de carbono. No interior desse segmento, a aviação civil apresenta particular complexidade no processo de descarbonização. Diferentemente de outros modais de transporte, nos quais alternativas tecnológicas como eletrificação e hidrogênio avançam com maior rapidez, o transporte aéreo depende de combustíveis de alta densidade energética e enfrenta limitações tecnológicas que dificultam a substituição imediata do querosene de aviação de origem fóssil (IATA, 2023; IEA, 2023).

Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação — conhecidos internacionalmente como *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) — emergem como uma das principais alternativas para reduzir as emissões do setor aéreo nas próximas décadas. Produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como resíduos agrícolas, biomassa lignocelulósica, açúcares, amidos e óleos vegetais, os SAF apresentam potencial para reduzir significativamente a intensidade de carbono do transporte aéreo sem exigir mudanças estruturais imediatas na frota de aeronaves ou na infraestrutura aeroportuária. De acordo com estimativas da International Air Transport Association, o SAF poderá representar até 65% da redução total de emissões necessária para que o setor aéreo alcance a meta de neutralidade de carbono até 2050 (IATA, 2021). Entretanto, a expansão desses combustíveis ainda enfrenta desafios relacionados à escala de produção, custos elevados, disponibilidade de matérias-primas e necessidade de marcos regulatórios adequados (IEA, 2023).

Nesse cenário, diversos países têm desenvolvido políticas específicas para estimular a produção e o consumo de SAF, incluindo subsídios, metas obrigatórias de mistura, incentivos fiscais e instrumentos de precificação de carbono. Nos Estados Unidos e na União Europeia, por exemplo, programas de incentivo à produção de combustíveis sustentáveis têm buscado acelerar investimentos em novas rotas tecnológicas e ampliar a capacidade produtiva do setor (IEA, 2023). No entanto, a implementação desses combustíveis também depende de fatores institucionais, logísticos e econômicos específicos de cada país, o que torna fundamental analisar como diferentes economias estão estruturando suas estratégias para a descarbonização da aviação.

No caso brasileiro, o debate sobre combustíveis sustentáveis de aviação ganhou relevância recente com a criação do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), iniciativa voltada à estruturação de um mercado doméstico de SAF e à integração do país às estratégias globais de descarbonização da aviação. O Brasil apresenta vantagens comparativas importantes nesse campo, como ampla disponibilidade de biomassa, experiência consolidada na produção de biocombustíveis e infraestrutura agroindustrial desenvolvida. Essas características colocam o país em posição potencialmente estratégica no mercado internacional de combustíveis sustentáveis de aviação.

Entretanto, a consolidação desse potencial depende da superação de diversos entraves institucionais e econômicos. Questões regulatórias, tributárias, logísticas e de

coordenação entre diferentes atores da cadeia produtiva ainda representam obstáculos relevantes para o desenvolvimento do SAF no país. Além disso, a literatura nacional sobre o tema ainda é relativamente incipiente, especialmente no que se refere à análise integrada entre políticas públicas, governança da cadeia produtiva e percepção dos diferentes atores envolvidos no processo de implementação desses combustíveis.

Dessa forma, identifica-se uma lacuna de pesquisa relacionada à compreensão dos desafios institucionais, tecnológicos e econômicos que condicionam o desenvolvimento do SAF no Brasil, bem como à forma como esses desafios são percebidos pelos diferentes elos da cadeia produtiva. A análise dessas percepções torna-se particularmente relevante em um contexto no qual a implementação do ProBioQAV ainda se encontra em fase inicial, exigindo a construção de arranjos institucionais capazes de coordenar atores públicos e privados em torno de uma estratégia de transição energética para o setor aéreo.

Diante desse contexto, esta dissertação é orientada pela seguinte pergunta de pesquisa: como o Brasil tem avançado na implementação de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), considerando o desenvolvimento do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), os desafios institucionais e regulatórios associados à sua implementação e as percepções dos diferentes atores da cadeia produtiva frente às metas globais de descarbonização da aviação?

A partir dessa questão central, o objetivo geral da pesquisa é analisar as perspectivas e os caminhos para a implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil, considerando o Programa ProBioQAV e seu alinhamento com as metas internacionais de descarbonização estabelecidas por organismos como a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA).

Para alcançar esse objetivo geral, a pesquisa estabelece os seguintes objetivos específicos: identificar as principais rotas tecnológicas e matérias-primas associadas à produção de SAF no Brasil; avaliar o papel das políticas públicas e dos instrumentos regulatórios necessários para impulsionar sua produção e adoção; examinar o posicionamento do Brasil frente às iniciativas internacionais de descarbonização da aviação, como o CORSIA da OACI e o programa Fly Net Zero da IATA; e analisar os desafios associados à estruturação da cadeia produtiva de SAF no país, considerando

aspectos como disponibilidade de matérias-primas, infraestrutura logística e governança institucional.

Parte-se da hipótese de que os principais obstáculos à expansão do SAF no Brasil não estão relacionados exclusivamente à disponibilidade tecnológica ou à oferta de matérias-primas, mas sobretudo à ausência de mecanismos estáveis de coordenação institucional, previsibilidade regulatória e alinhamento entre os incentivos econômicos dos diferentes agentes da cadeia produtiva.

Do ponto de vista metodológico, o estudo combina revisão bibliográfica, análise institucional e pesquisa de campo. A investigação empírica foi realizada por meio da aplicação de questionário estruturado baseado em escala Likert, direcionado a especialistas e profissionais atuantes em diferentes segmentos da cadeia do SAF no Brasil, incluindo produtores, reguladores e usuários estratégicos do combustível. A pesquisa contou com 53 respostas válidas, permitindo identificar padrões de concordância, divergência e assimetria de percepções entre os diferentes elos da cadeia produtiva. Esses dados foram analisados de forma comparativa e interpretados à luz da literatura sobre transição energética e políticas de descarbonização.

Além desta introdução, a dissertação está estruturada em três capítulos. O primeiro capítulo apresenta o referencial teórico, discutindo os fundamentos da economia ecológica, as mudanças climáticas e o processo de descarbonização da economia global. O segundo capítulo analisa o setor de aviação civil no contexto da transição energética, destacando as particularidades de suas emissões e as principais iniciativas internacionais voltadas à redução das emissões do setor. O terceiro capítulo examina o Programa ProBioQAV e as perspectivas brasileiras para o desenvolvimento do SAF, abordando os desafios institucionais e regulatórios associados à sua implementação e apresentando os resultados da pesquisa de campo realizada com atores da cadeia produtiva.

Ao integrar análise teórica, avaliação institucional e evidências empíricas, esta pesquisa busca contribuir para o debate acadêmico e para a formulação de políticas públicas voltadas à descarbonização do transporte aéreo, oferecendo uma análise abrangente sobre os desafios e as oportunidades para a implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil.

1. REFERENCIAL TEÓRICO: ECONOMIA ECOLÓGICA, MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESCARBONIZAÇÃO

A economia ecológica é fundamental para entender a interação entre atividade econômica e meio ambiente, abordando os impactos da ação humana e estratégias para promover um desenvolvimento sustentável. A partir da análise apresentada por Daly (1999), torna-se evidente a urgência de uma abordagem crítica ao paradigma do crescimento econômico ilimitado, sobretudo diante dos impactos ambientais e climáticos globais.

Para o autor, a concepção tradicional de crescimento como sinônimo de progresso ignora o fato de que, em determinados contextos, o crescimento pode se tornar antieconômico, isto é, quando os custos sociais e ambientais superam os benefícios produtivos. Na medida em que o Produto Interno Bruto (PIB) é utilizado como principal indicador de desempenho, os efeitos negativos sobre o meio ambiente — como poluição, esgotamento de recursos naturais e degradação de ecossistemas — são invisibilizados ou, paradoxalmente, contabilizados como ganhos econômicos (DALY, 1999).

A crítica ao paradigma neoclássico é fundamental para compreender os limites biofísicos do planeta. Enquanto esse modelo encara o meio ambiente como uma simples extensão ou setor dentro do sistema econômico, a economia ecológica propõe uma inversão dessa lógica, entendendo a economia como um subsistema do ecossistema global (DALY, 1999).

Enquanto o paradigma neoclássico, cuja gênese remonta a figuras como Alfred Marshall, fundamenta-se na premissa de racionalidade individual e na maximização da utilidade como princípios estruturantes da ação econômica, compreendendo os agentes como indivíduos autônomos que, ao buscarem seus próprios interesses, contribuiriam para a autorregulação dos mercados.

Essa visão tem sido criticada por estudiosos da sustentabilidade, que apontam que esse arcabouço teórico falha ao omitir a relevância dos limites ecológicos e dos efeitos externos sobre o meio ambiente. A crítica ressalta que a economia neoclássica tende a

reduzir o meio ambiente a uma função secundária, cabendo-lhe apenas o papel de insumo ou receptor de externalidades passíveis de internalização através de instrumentos de correção (DIESENDORF, 2024).

Outro vetor fundamental do pensamento neoclássico é a concepção de substituíbilidade entre recursos naturais e capital produzido, tecnológica ou físico, o que legitima a ideia de crescimento econômico contínuo como principal indicador de progresso. Essa perspectiva, amplamente associada ao “crescimento econômico ilimitado”, baseia-se em pressupostos como o modelo Solow-Swan, que permite substituir recursos naturais por tecnologia e acumulação de capital físico, mantendo a trajetória de expansão.

No entanto, esse pressuposto é questionado por evidências empíricas que demonstram a limitada substituição possível entre capital natural e capital artificial. Estudos empíricos mostram que serviços ecossistêmicos apresentam baixa elasticidade-renda de disposição a pagar, o que sugere restrições quanto à substituição dos benefícios ecológicos por soluções tecnológicas (DRUPP et al., 2023).

Em contraponto, a economia ecológica reconfigura o entendimento do sistema econômico ao posicioná-lo como subsistema do ecossistema global, o que exige reconhecer limites físicos irreversíveis ao crescimento, bem como a complementaridade — e não substituíbilidade — entre capital natural e capital produzido.

Essa abordagem salienta a necessidade de se estabelecer uma escala econômica compatível com a capacidade regenerativa dos ecossistemas, rejeitando a noção de crescimento indefinido como objetivo primordial (PRIDDAT, 2025). Essa reformulação teórica desafia o paradigma neoclássico ao priorizar a sustentabilidade forte, ou seja, a preservação dos estoques naturais essenciais à manutenção da vida, independentemente da compensação tecnológica.

Tal reposicionamento epistemológico revela que o crescimento econômico irrestrito não é apenas insustentável, mas potencialmente catastrófico, especialmente em um cenário de mudanças climáticas aceleradas, perda de biodiversidade e colapso de serviços ecossistêmicos.

A evidência empírica reforça essa perspectiva. Estudos como o *Index of Sustainable Economic Welfare* (ISEW) demonstram que, a partir da década de 1980 nos

Estados Unidos, o crescimento do PIB deixou de estar correlacionado positivamente com o bem-estar da população (DALY; COBB JR., 1994). Isso revela que o desenvolvimento econômico, quando divorciado de preocupações ambientais, pode resultar em uma falsa sensação de prosperidade. A manutenção dessa lógica compromete não apenas a integridade dos ecossistemas, mas também a capacidade das futuras gerações de usufruírem de condições ambientais mínimas.

A globalização intensifica esses desafios ao enfraquecer a autonomia dos Estados nacionais na implementação de políticas ambientais e sociais. Ao transformar problemas locais — como desemprego, superpopulação e injustiça distributiva — em dilemas globais, ela reduz a eficácia de instrumentos regulatórios e promove o imperativo do crescimento a qualquer custo (DALY, 1999). Esse fenômeno agrava a exploração dos recursos naturais, principalmente nos países em desenvolvimento, cujas economias são mais vulneráveis às imposições do mercado internacional.

Dessa forma, o autor defende que a transição para um modelo de desenvolvimento baseado na sustentabilidade ecológica torna-se urgente. Isso envolve não apenas redefinir indicadores econômicos para que incluam os custos ambientais, como também adotar o conceito de “desenvolvimento sem crescimento”, proposto pela economia ecológica (DALY, 1999). Nesse contexto, para ele, a qualidade substitui quantidade como eixo central das políticas públicas, e o uso racional dos recursos naturais passa a ser prioridade diante dos limites planetários.

Nesse sentido, corrobora Rockström et al. (2009), que se esses limites forem ultrapassados, podem comprometer a estabilidade dos sistemas naturais essenciais para o bem-estar humano. As mudanças climáticas representam um dos desafios mais urgentes da economia ecológica. Dietz et al. (2020) destacam como o aquecimento global é intensificado pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), derivadas da industrialização e do uso de combustíveis fósseis. Fato é que o aumento da temperatura global tem causado eventos climáticos extremos, afetando economias e sociedades.

Portanto, reconhecer a economia como parte integrante e dependente do ecossistema é um passo essencial para enfrentar essas mudanças climáticas e as crises ambientais atuais. A lógica do crescimento ilimitado precisa ser substituída por um paradigma que valorize a resiliência dos sistemas naturais, a equidade social e a justiça intergeracional.

O pensamento de Nicholas Georgescu-Roegen também oferece uma contribuição essencial à compreensão dos limites físicos do crescimento econômico ao introduzir a Lei da Entropia como elemento estruturante da análise econômica. Segundo o autor, todo processo econômico é intrinsecamente irreversível e transforma recursos de baixa entropia — ou seja, altamente organizados e úteis — em produtos de alta entropia, como resíduos e calor dissipado, que não podem ser reutilizados produtivamente (GEORGESCU-ROEGEN, 2005). Essa abordagem desafia as bases mecanicistas da economia neoclássica, que ignoram os processos reais de degradação da energia e da matéria, reforçando a necessidade de incorporar fundamentos termodinâmicos na elaboração de políticas econômicas e ambientais.

Georgescu-Roegen também destaca que o processo econômico não se perpetua por meio de um ciclo fechado e conservativo, como propõem os modelos tradicionais, mas exige fluxos contínuos de energia e matéria retirados da natureza, que inevitavelmente degradam os sistemas ecológicos. O autor evidencia que, ao contrário do que sugerem os mitos econômicos, não há fonte infinita de energia disponível nem possibilidade de sua repetida reutilização sem perda. Isso implica reconhecer a escassez como fenômeno físico, e não apenas monetário, marcando o limite objetivo da expansão econômica (GEORGESCU-ROEGEN, 2005).

A crítica ao paradigma econômico vigente é aprofundada ao se considerar o papel dos recursos naturais como base para a sobrevivência humana. O autor denuncia a negligência sistemática da economia ortodoxa quanto à origem e à finitude dos insumos ecológicos. Segundo o autor, ao desprezar a importância do capital natural e assumir uma visão de mundo que exclui o meio ambiente das equações econômicas, a teoria dominante ignora os riscos de colapso ecológico e de extinção da própria espécie humana. Georgescu-Roegen argumenta que a degradação ambiental ocorre cumulativamente desde o início da atividade humana, exigindo uma nova racionalidade baseada na preservação e no respeito aos limites planetários (GEORGESCU-ROEGEN, 2005).

Ele também reconhece que a entropia é o cerne da escassez econômica e da fragilidade ecológica. Ao transformar recursos valiosos em resíduos, o processo produtivo acelera a degradação dos ecossistemas e compromete a capacidade de suporte do planeta. Nesse sentido, é indispensável compreender que os organismos vivos, especialmente o ser humano, ocupam posição central na aceleração da entropia global. O modelo de produção e consumo atual, baseado na queima de combustíveis fósseis e na

exploração intensiva de recursos naturais, representa uma trajetória insustentável e incompatível com a manutenção da vida em longo prazo.

A compreensão contemporânea sobre a escala da atividade econômica e suas implicações ecológicas têm avançado ao considerar os limites impostos pela capacidade de suporte dos ecossistemas. Essa análise, baseada nas leis da termodinâmica, especialmente a segunda lei — que aborda o aumento da entropia — revela que os processos econômicos estão intrinsecamente ligados ao consumo irreversível de energia e matéria. Esse entendimento reforça a necessidade de reconhecer que o crescimento econômico contínuo exerce pressão direta sobre os fluxos ecológicos, comprometendo o equilíbrio necessário à manutenção da vida e à estabilidade dos sistemas naturais (ÖZKAYNAK; ADAMAN; DEVINE, 2012).

Além da dimensão biofísica, a abordagem ecológica enfatiza que o desenvolvimento humano é marcado por uma coevolução entre sociedade, tecnologia e ecossistemas. Essa perspectiva identifica padrões históricos de dependência de combustíveis fósseis como elementos centrais de uma trajetória industrial que levou à intensificação da degradação ambiental. As estruturas sociais e culturais moldadas por valores materialistas e produtivistas consolidaram práticas que dificultam a transição para formas sustentáveis de viver. A urgência da crise climática exige, portanto, não apenas mudanças técnicas, mas reconfigurações sociais profundas, capazes de romper com condicionamentos históricos de consumo e crescimento (ÖZKAYNAK; ADAMAN; DEVINE, 2012).

Em contextos de elevada complexidade e incerteza, como os que envolvem decisões ambientais, a economia ecológica propõe o uso de racionalidade procedimental e de instituições deliberativas. Tais mecanismos permitem incluir múltiplos saberes e perspectivas na formulação de políticas públicas, promovendo uma compreensão mais ampla dos riscos ambientais e sociais em jogo. A ciência pós-normal e os processos participativos são instrumentos fundamentais para enfrentar os dilemas contemporâneos, especialmente diante da rapidez com que mudanças climáticas, perda de biodiversidade e desequilíbrios ecológicos se intensificam no cenário global (ÖZKAYNAK; ADAMAN; DEVINE, 2012).

A superação da lógica unidimensional baseada no Produto Interno Bruto requer a adoção de indicadores de sustentabilidade que levem em conta critérios biofísicos, éticos

e sociais. Avaliações multicritério oferecem alternativas capazes de captar a diversidade de valores envolvidos na gestão ambiental e de ampliar a transparência dos processos decisórios. A incorporação desses indicadores permite a construção de políticas mais sensíveis às realidades ecológicas locais e globais, evidenciando que a preservação ambiental deve ocupar posição central nas estratégias de desenvolvimento e nos marcos regulatórios das sociedades contemporâneas (ÖZKAYNAK; ADAMAN; DEVINE, 2012).

A articulação entre os conceitos de entropia, coevolução social-ecológica e desenvolvimento qualitativo, presentes também nos trabalhos de Daly (1999), Georgescu-Roegen (2005) e Özkaynak et al. (2012), apontam para a necessidade de um novo paradigma econômico baseado na sustentabilidade, na equidade intergeracional e na preservação da vida. A descarbonização não é apenas uma resposta técnica à crise climática, mas uma inflexão ética e política que reflete o reconhecimento dos limites do crescimento em um planeta finito.

Dessa maneira, a descarbonização da economia surge, portanto, como uma estratégia essencial para mitigar os impactos climáticos. Stern (2007) reforça argumentando que os custos da inação frente à degradação ambiental são significativamente maiores do que os investimentos necessários para reduzir as emissões. Políticas públicas, inovação tecnológica e incentivos econômicos são fundamentais para essa transição.

Uma das abordagens para incentivar a redução das emissões é a precificação do carbono. Baranzini et al. (2017) exploram os mecanismos de precificação de carbono e seus impactos na política climática, destacando a necessidade de instrumentos complementares para garantir uma transição eficaz. Impostos sobre carbono e sistemas de comércio de emissões têm sido adotados em diversos países com resultados positivos.

A economia ecológica propõe uma reestruturação dos padrões de consumo e produção, promovendo soluções inovadoras e sustentáveis. Rockström et al. (2009) ressaltam a importância de adotar práticas que respeitem os limites do planeta, garantindo a sustentabilidade a longo prazo.

Além das políticas públicas, a cooperação internacional desempenha um papel crucial. O Acordo de Paris, firmado em 2015 por 195 países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), estabeleceu o

compromisso de limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para contê-lo em até 1,5 °C (UNFCCC, 2015). Como apontam Dietz et al. (2020), esforços globais são essenciais para conter as mudanças climáticas e proteger comunidades vulneráveis.

A transição para uma economia de baixo carbono não representa apenas desafios, mas também oportunidades. Nesse sentido, Stern (2007) enfatiza que investimentos em energia limpa podem impulsionar a inovação e o crescimento econômico, criando empregos e fortalecendo mercados sustentáveis.

O autor, ao contrário de Daly (1999), enfatiza que estes investimentos podem criar empregos e fortalecer mercados sustentáveis. Para ele, a resposta às mudanças climáticas não deve ser vista como um obstáculo ao desenvolvimento, mas como um vetor para reconfigurar as bases do crescimento, tornando-o mais resiliente e compatível com os limites ambientais. Sua abordagem, portanto, combina pragmatismo econômico e visão estratégica, apoiando-se no argumento de que os custos de agir são menores que os custos de não agir.

O diálogo entre esses dois referenciais não deve ser entendido como uma contradição, mas como um contraponto teórico fértil. Stern (2007) oferece caminhos viáveis de curto e médio prazo, capazes de mobilizar atores políticos e econômicos em torno da precificação do carbono e da promoção de tecnologias sustentáveis. Já Daly (1999) amplia a reflexão ao chamar atenção para os limites estruturais do modelo de crescimento contínuo, advertindo que políticas ambientais só terão alcance real se acompanhadas de mudanças mais profundas nos padrões de produção e consumo. Essa tensão revela diferentes escalas temporais e diferentes níveis de transformação: o ajuste pragmático versus a mudança paradigmática.

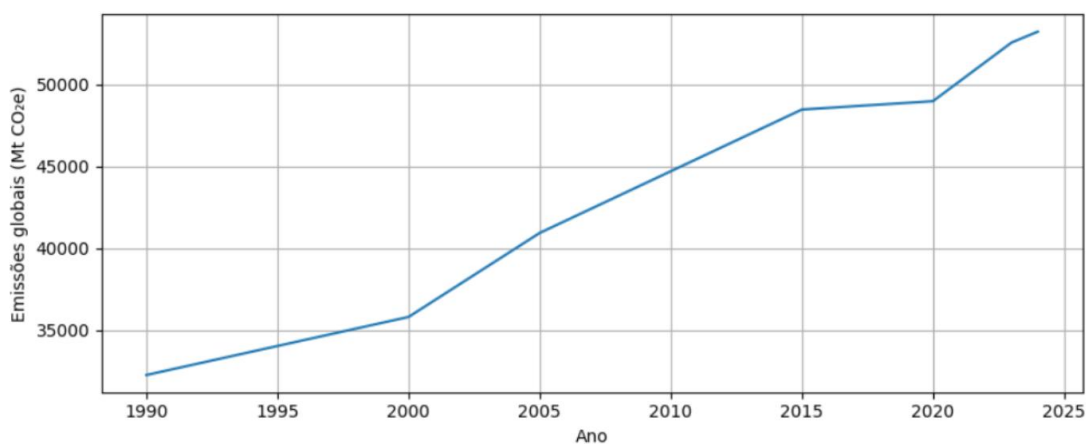
Assim, a pluralidade de perspectivas representada por Stern e Daly enriquece o debate sobre desenvolvimento sustentável. Ao mesmo tempo em que Stern contribui para políticas aplicáveis em contextos institucionais atuais, com foco em eficiência econômica e viabilidade política, Daly oferece um horizonte normativo que problematiza a dependência do crescimento e propõe alternativas mais radicais de reorganização socioeconômica. Longe de se excluírem, tais abordagens podem ser vistas como complementares, já que a superação da crise climática demanda tanto soluções imediatas de mercado quanto reflexões críticas sobre os rumos civilizatórios de longo prazo.

1.1 Aquecimento global e mudanças climáticas: causas, efeitos e principais emissores.

O aquecimento global consiste no aumento persistente da temperatura média da superfície terrestre, impulsionado principalmente pela intensificação do efeito estufa natural, resultado da crescente emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases provêm, majoritariamente, da queima de combustíveis fósseis, do desmatamento e da agropecuária industrial. De acordo com Stern (2007), os impactos das mudanças climáticas representam a maior falha de mercado já registrada, dado que os custos ambientais das emissões de carbono não são adequadamente internalizados pelos agentes econômicos. A aceleração desse processo desde a Revolução Industrial tem colocado em xeque a sustentabilidade dos sistemas produtivos contemporâneos.

O gráfico a seguir mostra a evolução das emissões globais totais de Gases do Efeito Estufa (GEE) entre os anos de 1990 e 2025, uma curva ascendente que atualmente já ultrapassa 50.000Mt.

Gráfico 1. Evolução das emissões globais totais de Gases do Efeito Estufa



Fonte: EDGAR (JRC/Comissão Europeia), Global Greenhouse Gas Emissions – Report 2025.

Conforme Rockström et al. (2009), a humanidade tem ultrapassado os limites planetários de estabilidade, promovendo alterações irreversíveis no clima global. Esse fenômeno é impulsionado por diversos fatores antrópicos, sendo as emissões de gases de efeito estufa (GEE) o principal motor da elevação das temperaturas. As consequências do

aquecimento global vêm sendo estudadas em diferentes contextos econômicos e ecológicos.

A proposta de Herman E. Daly (1991) em *“Towards an Environmental Macroeconomics”* oferece fundamentos conceituais que permitem compreender as causas econômicas do aquecimento global e das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao defender que a economia deve ser concebida como um subsistema do ecossistema maior e finito, o autor sublinha a importância de respeitar os limites ecológicos, como a capacidade da biosfera de absorver resíduos.

Nesse contexto, os GEE podem ser interpretados como subprodutos de um sistema econômico que extrapola sua escala sustentável, pois resultam da queima de combustíveis fósseis e de padrões de produção e consumo que ignoram os princípios termodinâmicos e ecológicos. A crítica de Daly (1991) ao paradigma do crescimento contínuo revela que a lógica expansiva da economia moderna não apenas ignora a capacidade de carga ambiental, mas também acelera desequilíbrios climáticos sistêmicos.

Ao propor uma macroeconomia ambiental, Daly (1991) defende medidas estruturais que se alinhem diretamente com as estratégias de mitigação do aquecimento global. A transição para uma economia de estado estacionário, sustentada por políticas de limitação de uso de recursos e de emissão de poluentes, representa uma mudança de paradigma essencial para enfrentar as mudanças climáticas. A introdução de taxas sobre emissões e o reconhecimento da escala como variável econômica central apontam para a necessidade de uma descarbonização ampla, que se traduza em práticas econômicas compatíveis com a resiliência climática.

As causas do aquecimento global estão diretamente ligadas à industrialização e ao consumo de combustíveis fósseis. Dietz et al. (2020) destacam que atividades como a queima de carvão, petróleo e gás natural liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2), intensificando o efeito estufa. Além disso, práticas agrícolas como o uso de fertilizantes nitrogenados e a pecuária contribuem com emissões de metano (CH_4), um gás ainda mais potente na retenção de calor na atmosfera.

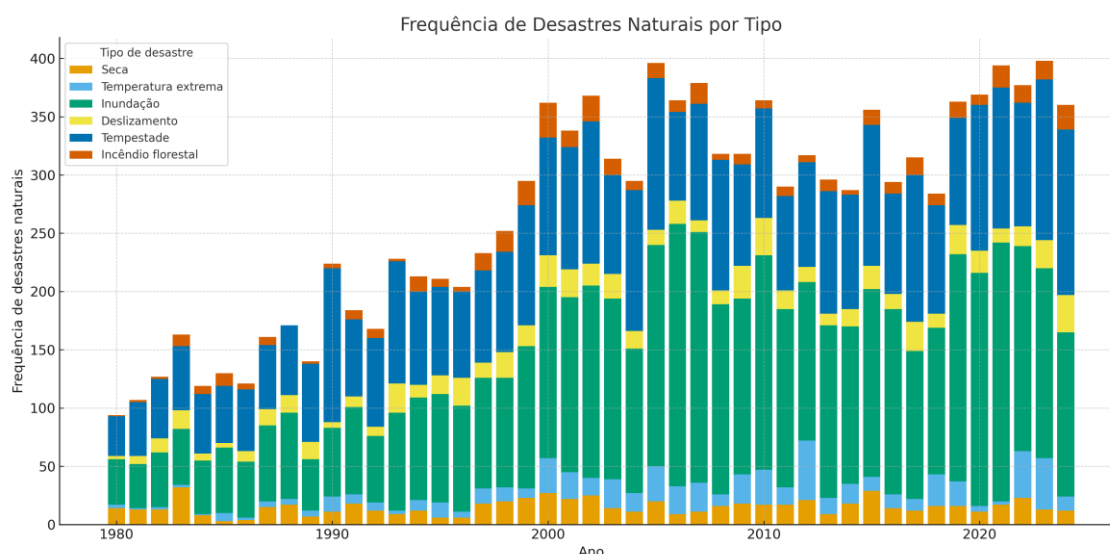
Entre os efeitos já observados estão a elevação do nível do mar, o aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, e alterações nos ciclos hidrológicos e agrícolas. Nordhaus (1991) argumenta que o crescimento das emissões de GEE sem controle adequado pode gerar perdas significativas no PIB mundial

ao longo do século XXI. Além disso, autores como Pindyck (2013) enfatizam a incerteza associada aos danos econômicos de longo prazo, o que dificulta a formulação de políticas públicas eficientes.

Os estudos de Michael E. Mann oferecem uma base científica robusta para compreender as causas do aquecimento global, especialmente no que se refere à influência humana sobre o sistema climático. Em suas análises paleoclimáticas, Mann demonstra que o aumento recente da temperatura global é sem precedentes nos últimos milênios e corrobora a afirmação de que esse aumento está diretamente relacionado às emissões de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), provenientes da queima de combustíveis fósseis (MANN et al., 1999). Ele defende que a descarbonização e a transição energética são medidas urgentes e viáveis, desde que acompanhadas por ação coletiva e pressão política.

Elizabeth Kolbert contribui com uma abordagem crítica sobre os efeitos das mudanças climáticas, destacando os impactos ecológicos e sociais da degradação ambiental. A autora apresenta evidências de que a humanidade está provocando uma extinção em massa de espécies, resultado da alteração de habitats, da acidificação dos oceanos e do aumento da temperatura global (KOLBERT, 2014). A autora também discute intervenções tecnológicas como a geoengenharia, revelando os riscos e dilemas éticos de tentar corrigir os danos ambientais por meio de novas manipulações da natureza (KOLBERT, 2021). Seus estudos reforçam que os efeitos das mudanças climáticas são sistêmicos e interdependentes, exigindo respostas estruturais que vão além de soluções técnicas pontuais.

Os desastres naturais aumentam progressivamente, um estudo do fundo monetário internacional mostra que desde os anos 1980 a frequência com que eles acontecem tem aumentado, principalmente as inundações, tempestades e temperaturas extremas.

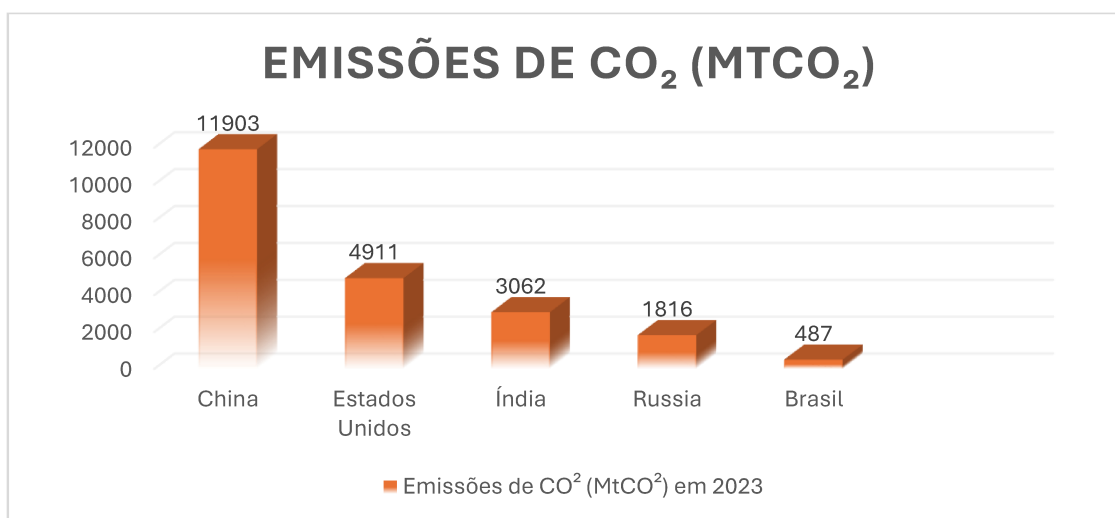
Gráfico 2. Frequência de desastres naturais por tipo.

Fonte: FMI – Macroeconomic Climate Indicators Dashboard, com base em dados do EM-DAT (CRED/UCLouvain).

O autor Rob Jackson, concentra seus estudos na quantificação das emissões globais de GEE e na identificação dos principais emissores. Como presidente do Global Carbon Project, Jackson lidera pesquisas que monitoram os fluxos de carbono e metano em escala planetária, revelando que países como China, Estados Unidos, Índia e Rússia concentram a maior parte das emissões (JACKSON et al., 2020). Seus trabalhos mostram que o crescimento energético global tem superado os esforços de descarbonização, e que políticas públicas mais ambiciosas são necessárias para conter o avanço do aquecimento global (JACKSON et al., 2019). Jackson também destaca o papel do metano como um gás de efeito estufa com alto potencial de aquecimento, propondo estratégias específicas para sua redução, como o controle de vazamentos em infraestruturas urbanas e industriais.

Segundo dados de 2023 do Global Carbon Project (2025), o Brasil figura em 12º lugar no ranking de emissões de CO₂ mundial, tendo emitido 487Mt do gás, enquanto a China emitiu 11903Mt, Estados Unidos 4911Mt, Índia 3062Mt e Rússia 1816Mt.

Gráfico 3. Emissões de CO₂ (MT CO₂)



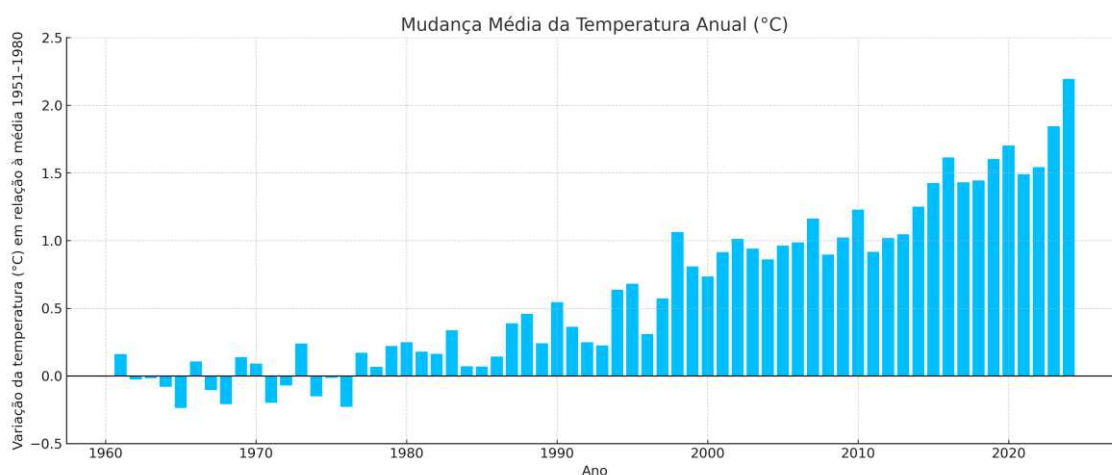
Fonte: Elaboração própria com dados do Global Carbon Project.

Historicamente, as emissões per capita nos países industrializados permanecem significativamente superiores às dos países em desenvolvimento, o que reforça a necessidade de uma abordagem de “responsabilidades comuns, porém diferenciadas” nos acordos internacionais.

Frente a essa realidade, instrumentos econômicos têm sido propostos como mecanismos de mitigação, tais como taxação sobre carbono e mercados de crédito de carbono. A literatura econômica destaca a importância da precificação das emissões como incentivo à inovação limpa e à transição energética (STIGLITZ; STERN, 2017). No entanto, a eficácia dessas medidas depende de compromissos políticos, de mecanismos institucionais robustos e de uma governança global sensível à justiça climática, como salientam Heal e Millner (2014), ao abordarem os trade-offs entre eficiência econômica e equidade intergeracional.

Os efeitos do aquecimento global são evidentes e impactam diversos aspectos ambientais e socioeconômicos. Segundo Stern (2007), o aumento da temperatura média global está diretamente relacionado à elevação do nível do mar, derretimento das calotas polares e aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como furacões, incêndios florestais e secas prolongadas. Esses fenômenos prejudicam ecossistemas, infraestrutura urbana e setores produtivos, como a agricultura e a pesca.

Um estudo do FMI mapeou a variação média da temperatura global desde a década de 1960, os dados mostram que houve um aumento de mais de 2 °C no período, impactando diretamente nas condições de vida do planeta.

Gráfico 4. Mudança Média da Temperatura Anual (°C)

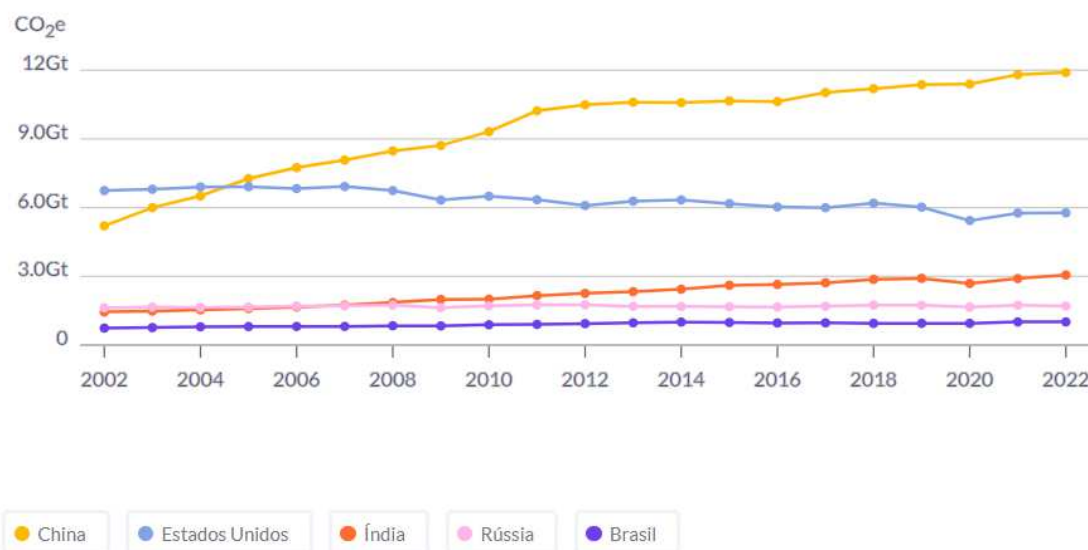
Fonte: FMI – Macroeconomic Climate Indicators Dashboard, com base em dados da FAO/FAOSTAT Climate Change.

As mudanças climáticas também afetam a biodiversidade, levando a extinções em massa e à migração de espécies em busca de condições mais favoráveis. Rockström et al. (2009) ressaltam que alterações nos padrões climáticos podem comprometer o equilíbrio de biomas inteiros, ameaçando a segurança alimentar e hídrica das populações.

A economia global é diretamente impactada pelos custos da inação frente às mudanças climáticas. Stern (2007) argumenta que os danos econômicos decorrentes do aquecimento global podem superar os investimentos necessários para sua mitigação, tornando essencial a adoção de políticas proativas. O aumento dos gastos com infraestrutura, saúde pública e recuperação de áreas afetadas reforça a necessidade de ações urgentes.

Os principais emissores de GEE estão concentrados em setores como agricultura energia e gás. Segundo dados do *World Climate*, nos últimos dez anos que esses setores foram monitorados, o Brasil aumentou as emissões de 741.00Mt em 2002 para 1.01Gt em 2022 de CO₂ equivalente. Já a China, saltou de uma emissão de 5.21Gt em 2002 para 11.90Gt em 2022 se tornando o país que mais emite CO₂ equivalente na atualidade. Enquanto nos Estados Unidos houve uma redução das emissões de 6.75Gt em 2002 para 5.77Gt em 2022 (Climate, 2025).

Gráfico 5. Principais emissores de GEE entre os anos 2002 e 2022.



Fonte: World Climate (vários anos)

De maneira geral, as emissões ainda mostram valores altos, Baranzini et al. (2017) exploram a importância da precificação do carbono como mecanismo para reduzir essas emissões, incentivando empresas a adotarem práticas mais sustentáveis. Instrumentos como impostos sobre emissões e mercados de carbono podem estimular a transição para fontes de energia mais limpas.

A cooperação internacional é essencial para conter o avanço do aquecimento global. Dietz et al. (2020) destacam que a implementação de acordos climáticos, como o Acordo de Paris, é fundamental para estabelecer metas globais de redução das emissões. O envolvimento de países em estratégias comuns aumenta a eficácia das políticas climáticas e fortalece o compromisso com a sustentabilidade.

A transição para uma economia de baixo carbono requer inovação e investimentos em tecnologias limpas. Stern (2007) enfatiza que a energia renovável, a mobilidade sustentável e a eficiência energética são áreas-chave para diminuir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo um desenvolvimento econômico alinhado com a preservação ambiental.

Dessa forma, o aquecimento global e as mudanças climáticas representam desafios complexos que demandam soluções multidisciplinares e esforços coordenados. Rockström et al. (2009) reforçam que a humanidade precisa agir dentro dos limites seguros do planeta para garantir um futuro sustentável, protegendo ecossistemas e promovendo o bem-estar das próximas gerações.

1.2 A descarbonização da economia como imperativo global

A descarbonização da economia configura-se como um imperativo global diante da urgência imposta pelas mudanças climáticas, que ameaçam a estabilidade dos sistemas naturais e socioeconômicos em escala planetária. O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO₂), tem acelerado o aquecimento global, provocando fenômenos climáticos extremos, elevação do nível do mar, desertificação, perda de biodiversidade e impactos negativos sobre a segurança alimentar, a saúde pública e o desenvolvimento econômico. A continuidade desse padrão de emissões é incompatível com a manutenção das condições necessárias à vida humana e à prosperidade das gerações futuras. Por isso, reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa e promover a transição para uma economia de baixo carbono são metas fundamentais para garantir a sustentabilidade global.

A importância da descarbonização transcende a esfera ambiental, uma vez que suas implicações são econômicas, sociais, geopolíticas e éticas. O modelo econômico contemporâneo, intensivo em energia fóssil, está associado a externalidades negativas de grande magnitude, cuja mitigação exige esforços coordenados e compromissos internacionais vinculantes. A inação frente às mudanças climáticas pode gerar perdas econômicas significativas no longo prazo, além de aprofundar desigualdades entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Nesse contexto, a descarbonização deve ser entendida como um processo estruturante para redefinir os padrões de produção, consumo, investimento e regulação econômica, com vistas à construção de sociedades resilientes e ambientalmente equilibradas.

A preocupação da incompatibilidade entre o crescimento energético contínuo e a urgência climática é iminente. Conforme aponta o artigo de Jackson et al. (2020), ainda que haja avanços na adoção de fontes renováveis, como solar e eólica, o consumo global de energia continua predominantemente dependente de combustíveis fósseis, cujas emissões agravam o aquecimento global.

No plano internacional, diversas iniciativas têm sido instituídas com o objetivo de coordenar esforços rumo à descarbonização. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), adotada em 1992 durante a ECO-92 no Rio de Janeiro, representou o primeiro marco institucional na construção de uma governança

climática global (UNFCCC, 1992). Em 1997, o Protocolo de Quioto estabeleceu metas obrigatórias de redução de emissões para os países desenvolvidos, introduzindo mecanismos como o Comércio de Emissões e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitiram a cooperação entre nações no combate às emissões (UNFCCC, 1997).

Posteriormente, o Acordo de Paris, aprovado em 2015 na 21ª Conferência das Partes (COP 21), ampliou o escopo dos compromissos climáticos ao incluir metas voluntárias e progressivas para todos os países signatários, independentemente do seu nível de desenvolvimento. O tratado tem como objetivo limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para contê-lo em 1,5°C. As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) assumem papel central nesse novo arranjo, sendo revistas periodicamente para garantir maior ambição climática (UNFCCC, 2015).

A União Europeia, por meio do *European Green Deal*, comprometeu-se a alcançar a neutralidade de carbono até 2050, por meio de ações integradas em energia, transporte, agricultura e indústria (União Europeia, 2024). Já a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) tem promovido instrumentos econômicos e diretrizes técnicas voltadas à precificação do carbono e à transição energética (OCDE, 2024).

O papel dos economistas na construção de modelos teóricos e de políticas para a descarbonização é essencial. No campo da economia ecológica, autores como Daly (1996), Georgescu-Roegen (2005) e Costanza et al. (1997) oferecem críticas contundentes ao paradigma de crescimento econômico ilimitado e propõem alternativas sustentáveis. Daly (1996) defende o conceito de “economia estacionária”, sustentando que a prosperidade não pode estar baseada na expansão material infinita, pois esta ultrapassa os limites ecológicos do planeta. Para o autor, o equilíbrio entre economia e ecossistema requer políticas que reduzam o consumo excessivo, limitem as emissões de carbono e favoreçam a regeneração dos recursos naturais.

Georgescu-Roegen (2005), ao desenvolver a bioeconomia, enfatiza os impactos entrópicos da exploração desmedida de recursos fósseis. Segundo ele, a irreversibilidade dos processos naturais torna imprescindível a racionalização do uso dos recursos e a redução das perdas energéticas, aspectos fundamentais para uma economia

descarbonizada. Costanza et al. (1997), por sua vez, contribuem ao atribuir valor econômico aos serviços ecossistêmicos, defendendo que políticas públicas e decisões empresariais devem incorporar a proteção e a restauração dos ecossistemas como elementos centrais de uma economia sustentável.

Além dos teóricos da economia ecológica, autores voltados à análise de instrumentos de mercado também oferecem contribuições relevantes. Baranzini et al. (2017) analisam a precificação do carbono como um dos mecanismos mais eficazes para a mitigação das emissões. Impostos sobre o carbono e sistemas de comércio de emissões são, segundo os autores, formas eficientes de internalizar externalidades ambientais e promover a inovação em tecnologias limpas.

Nesse sentido, Stern (2007), em seu relatório sobre a economia da mudança climática, argumenta que políticas públicas bem desenhadas e associadas a inovações tecnológicas podem não apenas evitar danos econômicos catastróficos, mas também gerar oportunidades significativas de crescimento sustentável. Dietz et al. (2020) reforçam que o sucesso dessas políticas depende da cooperação internacional e da definição clara de metas de redução, reforçando a interdependência entre os países no enfrentamento da crise climática.

Portanto, a descarbonização da economia deve ser compreendida como uma prioridade estratégica e ética no cenário contemporâneo. Ela demanda ações articuladas em nível global, com base em consensos científicos e econômicos, mas também requer uma transformação estrutural nas formas de produzir, consumir e distribuir recursos. A incorporação de princípios da economia ecológica, a implementação de instrumentos econômicos eficazes e a adesão firme aos acordos internacionais são elementos indispensáveis para garantir um futuro ambientalmente sustentável e socialmente justo.

1.3 Instrumentos econômicos para mitigação: mercado de carbono, tributos verdes, incentivos

Os instrumentos econômicos para mitigação das mudanças climáticas são fundamentais para incentivar a transição para uma economia de baixo carbono, promovendo eficiência e inovação. Entre eles, destacam-se o mercado de carbono,

transição energética, tributos verdes e incentivos econômicos, mecanismos amplamente discutidos na literatura acadêmica e nos relatórios de órgão oficiais.

O mercado de carbono é uma ferramenta essencial para precificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e incentivar reduções de maneira economicamente eficiente. Segundo Baranzini et al. (2017), os sistemas de comércio de emissões (ETS) permitem que empresas negociem permissões de emissão, tornando a descarbonização, em tese, mais flexível e menos onerosa. O Banco Mundial, no Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o Brasil, defende que um ETS no país poderia acelerar a redução de emissões, especialmente no setor industrial, enquanto compensações florestais verificadas poderiam integrar o uso sustentável do solo ao mercado de carbono.

Os créditos de carbono são frequentemente apresentados como uma solução viável para a descarbonização da economia, permitindo que empresas e países compensem suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio da compra de permissões de emissão ou investimentos em projetos de sequestro de carbono. No entanto, diversos estudos acadêmicos apontam limitações e desafios desse mecanismo, que podem comprometer sua eficácia na redução real das emissões globais (VEIGA NETO, 2018; MAY, 2020).

Um dos principais problemas dos créditos de carbono é a possibilidade de *greenwashing*, ou seja, a prática de empresas que adquirem créditos sem efetivamente reduzir suas emissões. Isso ocorre porque, em muitos casos, os créditos são utilizados como uma alternativa para evitar mudanças estruturais nos processos produtivos, permitindo que grandes emissores continuem suas atividades sem implementar medidas concretas de mitigação (SANTOS, 2019).

O princípio do poluidor-pagador, amplamente discutido na literatura econômica ambiental, estabelece que aqueles que causam danos ambientais devem arcar com os custos de sua mitigação. No entanto, a aplicação desse princípio por meio dos créditos de carbono pode ser distorcida, pois permite que grandes emissores simplesmente comprem permissões para continuar poluindo, em vez de internalizar os custos ambientais e modificar suas práticas produtivas (SANTOS, 2019).

Além disso, há desafios relacionados à verificação e certificação dos créditos de carbono. A falta de padronização nos métodos de cálculo e certificação pode levar à emissão de créditos que não correspondem a reduções reais de carbono. Estudos indicam que alguns projetos de compensação não garantem a permanência do carbono sequestrado, especialmente em iniciativas de reflorestamento que podem ser revertidas por desmatamento ou incêndios florestais (VEIGA NETO, 2018).

Um aspecto crítico é a distribuição desigual dos benefícios dos créditos de carbono. Países em desenvolvimento, como o Brasil, frequentemente se tornam fornecedores de créditos para nações industrializadas, sem que haja um retorno proporcional em investimentos para a transição energética local. Isso pode perpetuar desigualdades econômicas e ambientais, dificultando a implementação de políticas efetivas de descarbonização nos países que mais precisam (MAY, 2020).

Outro problema relevante é a volatilidade do mercado de carbono, que pode comprometer sua eficácia como instrumento de mitigação. O preço dos créditos de carbono varia significativamente, dependendo da oferta e demanda, o que pode gerar incertezas para empresas e governos que buscam investir em projetos de redução de emissões. Essa instabilidade dificulta o planejamento de longo prazo e pode desestimular investimentos em tecnologias limpas (VEIGA NETO, 2018).

Além disso, há preocupações sobre a efetividade dos mecanismos de compensação. Muitos projetos de créditos de carbono envolvem iniciativas de reflorestamento ou conservação de áreas naturais, mas essas ações nem sempre resultam em reduções permanentes de emissões. A degradação ambiental e mudanças climáticas podem comprometer a capacidade desses projetos de sequestrar carbono ao longo do tempo (MAY, 2020).

A falta de transparência e governança no mercado de carbono também é um fator crítico. Em muitos casos, há dificuldades na rastreabilidade dos créditos e na garantia de que os projetos financiados realmente contribuem para a mitigação das emissões. A ausência de regulamentações internacionais robustas pode permitir fraudes e práticas especulativas, reduzindo a credibilidade do sistema (SANTOS, 2019).

Diante dessas limitações, especialistas defendem que a descarbonização deve ser baseada em reduções diretas de emissões, por meio da transição para fontes de energia renováveis, eficiência energética e mudanças estruturais nos processos produtivos. Os créditos de carbono podem ser um complemento, mas não devem substituir políticas de mitigação efetivas e obrigatórias (VEIGA NETO, 2018).

Portanto, embora os créditos de carbono sejam um instrumento útil para incentivar a redução de emissões, eles apresentam desafios significativos que podem comprometer sua eficácia. A implementação de políticas mais rigorosas, maior transparência e investimentos em soluções estruturais são fundamentais para garantir que a descarbonização ocorra de maneira justa e sustentável (MAY, 2020; SANTOS, 2019).

A partir desta análise, uma solução importante para mitigação desse cenário desafiador é a chamada compensação de carbono de alta integridade ambiental, que se desdobra em um mecanismo que busca garantir que projetos de neutralização ou redução de emissões realmente resultem em benefícios climáticos mensuráveis, verificáveis e duradouros. Sua relevância cresce nesse contexto em que tanto empresas quanto países adotam metas de neutralidade de carbono e, portanto, recorrem a créditos de carbono para complementar reduções diretas de emissões.

A integridade ambiental é o parâmetro que define se esses créditos correspondem, de fato, a reduções ou remoções adicionais de gases de efeito estufa (GEE) que não ocorreriam na ausência do projeto, por meio de critérios de adicionalidade, permanência e ausência de dupla contagem.

A adicionalidade, assegura que a atividade ou projeto gerador do crédito não teria acontecido sem o incentivo financeiro proporcionado pelo mercado de carbono. Ou seja, evita-se a emissão de créditos por ações que já seriam implementadas de qualquer forma por razões regulatórias, tecnológicas ou econômicas. A falta de adicionalidade é apontada como um dos principais riscos à credibilidade dos mercados voluntários de carbono, pois compromete o caráter compensatório da iniciativa (Gillenwater, 2012).

Outro requisito essencial é a permanência, que diz respeito à capacidade da redução ou remoção de GEE manter-se efetiva ao longo do tempo. Projetos baseados em soluções baseadas na natureza, como reflorestamento, apresentam riscos de reversão caso a vegetação seja perdida por incêndios, desmatamento ou eventos climáticos extremos.

Para mitigar essa vulnerabilidade, alguns padrões internacionais exigem mecanismos de buffer — reservas de créditos que compensam perdas imprevistas — ou a adoção de contratos de longo prazo que garantam a manutenção das condições ambientais do projeto (Schneider; La Hoz Theuer, 2019).

A ausência de dupla contagem, por sua vez, é igualmente fundamental, pois assegura que a mesma redução ou remoção de carbono não seja contabilizada simultaneamente por diferentes atores, como o país hospedeiro do projeto e a empresa compradora dos créditos. Essa preocupação ganhou destaque após a implementação do Artigo 6 do Acordo de Paris, que introduziu diretrizes para evitar que créditos internacionais de carbono sejam reportados de forma redundante, distorcendo o real impacto climático global (Howard; Hood, 2020).

Portanto, os mecanismos de compensação de alta integridade ambiental só são efetivos quando apoiados em metodologias transparentes, verificações independentes e

sistemas robustos de monitoramento, relato e verificação (MRV). A adoção rigorosa dos critérios de adicionalidade, permanência e ausência de dupla contagem garante que a compensação de carbono não seja um mero instrumento de *greenwashing*, mas sim uma ferramenta legítima de mitigação climática, capaz de complementar a descarbonização estrutural de economias e cadeias produtivas.

Outra estratégia eficiente para incorporar os custos ambientais nas decisões econômicas são os tributos verdes. Stern (2007) argumenta que a precificação do carbono, por meio de impostos sobre emissões, pode incentivar empresas e consumidores a adotarem práticas mais sustentáveis, inclusive na aviação civil. O relatório do Banco Mundial (2020) sugere que um imposto sobre o carbono poderia ser incluído em uma ampla reforma fiscal no Brasil, promovendo a neutralidade nas receitas e substituindo tributos ineficientes, ao mesmo tempo que financia investimentos em sustentabilidade e resiliência.

Nesse contexto, um dos pontos mais relevantes diz respeito à definição da base de incidência. A literatura especializada destaca três alternativas principais: a tributação direta das emissões de gases de efeito estufa, a taxação sobre o consumo de combustíveis fósseis e a imposição de encargos adicionais sobre produtos de alto conteúdo de carbono (OECD, 2019). Cada uma dessas modalidades apresenta implicações distintas em termos de efetividade, simplicidade administrativa e alcance setorial. A opção por incidir sobre as emissões diretas, por exemplo, permite maior alinhamento ambiental, mas demanda sistemas de monitoramento robustos; já a taxação de combustíveis fósseis pode ser operacionalmente mais simples, embora menos precisa em termos de intensidade emissora (STAVINS, 2019).

Outro aspecto de destaque é o desenho das alíquotas, que pode variar conforme setores e intensidade emissora. Pizer e Aldy (2016) ressaltam que uma estrutura uniforme pode gerar distorções, penalizando setores menos adaptáveis no curto prazo e comprometendo a competitividade internacional. Dessa forma, defende-se uma abordagem diferenciada, calibrando as alíquotas de acordo com a intensidade de carbono das atividades econômicas. Além disso, instrumentos complementares, como subsídios para inovação tecnológica e mecanismos de compensação, podem mitigar impactos distributivos e fortalecer a aceitação social da medida (BARANZINI; CARATTINI; PIGLIARU, 2017).

Entretanto, a efetividade dos tributos verdes depende de uma estrutura de fiscalização sólida. Sem mecanismos de medição, reporte e verificação (MRV)

confiáveis, o risco de evasão fiscal e de práticas de *greenwashing* torna-se significativo, reduzindo o impacto ambiental esperado (CRAMTON; OCKENFELS; STOTZ, 2017). Nesse sentido, o fortalecimento institucional e a adoção de tecnologias de monitoramento são indispensáveis, sobretudo em países em desenvolvimento, nos quais a capacidade de *enforcement* é limitada e as estruturas administrativas apresentam fragilidades históricas (WORLD BANK, 2020).

Sendo assim, é fundamental reconhecer as barreiras políticas e distributivas que acompanham a implementação desses instrumentos. Em sociedades marcadas por desigualdades socioeconômicas, como o Brasil, tributos ambientais podem ser percebidos como regressivos, já que impactam proporcionalmente mais as famílias de baixa renda (GOULDER; SCHEIN, 2013). Isso exige a adoção de medidas compensatórias, como transferências sociais ou a redução de outros tributos regressivos, de forma a neutralizar efeitos adversos e assegurar legitimidade política.

A experiência internacional mostra que a aceitação social e a sustentabilidade política de tributos verdes dependem de sua integração em uma estratégia fiscal ampla, orientada à justiça distributiva e ao financiamento da transição energética (SACHS et al., 2019). Os incentivos econômicos desempenham papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono em todos os setores. Segundo Dietz et al. (2020), subsídios para tecnologias verdes e políticas de investimento podem impulsionar a inovação e a adoção de soluções sustentáveis.

O relatório do Banco Mundial (2023) identifica, oportunidades para financiar projetos de descarbonização no Brasil, incluindo a mobilização de financiamento privado e o uso estratégico de instrumentos de mercado.

Além dos mecanismos tradicionais, instrumentos financeiros inovadores têm ganhado destaque na agenda climática global. Segundo Costanza et al. (1997), a valorização dos serviços ecossistêmicos pode ser incorporada em mercados financeiros, possibilitando o financiamento da conservação ambiental. Tal discussão envolve o papel dos títulos verdes e da precificação de carbono como forma de apoiar políticas climáticas e reduzir os impactos das emissões de GEE.

O relatório de 2025 da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) traz uma preocupação para que a transição seja justa e equitativa. Há uma preocupação em assegurar que a transição para a neutralidade de carbono ocorra de maneira justa constitui uma exigência essencial tanto sob a ótica da equidade social quanto para garantir o apoio da população às políticas de enfrentamento das mudanças

climáticas. As ações de mitigação climática tendem a provocar impactos substanciais nos mercados de trabalho e na vida das famílias, com variações importantes conforme a região, o gênero e outros marcadores sociodemográficos. Assim, o adequado gerenciamento desses efeitos é indispensável para evitar o agravamento das desigualdades já existentes.

É necessário ponderar os custos associados às políticas de mitigação frente às consequências da inação, cujos efeitos — como prejuízos à saúde, perdas patrimoniais e danos aos meios de subsistência — devem incidir de maneira mais severa sobre os grupos mais vulneráveis da sociedade (OCDE, 2024).

As projeções atuais indicam que o impacto líquido da transição para uma economia neutra em carbono sobre o nível agregado de emprego tende a ser relativamente modesto. No âmbito da OCDE, aproximadamente 6% da força de trabalho atua em ocupações com alta intensidade de emissões de gases de efeito estufa, enquanto cerca de 20% já se encontra inserida em atividades com foco ambiental (OCDE, 2024). Esses dados sugerem que uma parcela limitada da população economicamente ativa será diretamente afetada pelas transformações estruturais. No entanto, os riscos de deslocamento ocupacional concentram-se de maneira significativa em setores e territórios específicos.

Segundo a organização, trabalhadores das indústrias mais expostas à descarbonização, em geral, são mais velhos, residem predominantemente em áreas rurais e estão empregados em funções relativamente bem remuneradas em comparação com seu nível de escolaridade. Estima-se que as perdas de postos de trabalho nesses segmentos sejam, em média, 24% mais onerosas do que aquelas observadas em setores de baixas emissões (OCDE, 2024).

Além disso, muitas das regiões com elevada concentração de atividades intensivas em carbono já apresentam fragilidades socioeconômicas significativas. Tais localidades costumam exibir indicadores abaixo da média nacional em termos de produto interno bruto (PIB), remuneração, escolaridade e capacidade de investimento em infraestrutura, inovação e energias renováveis (OCDE, 2023). Esses fatores ampliam os obstáculos relacionados à transição energética e aumentam o risco de aprofundamento das disparidades regionais. Portanto, a formulação de políticas públicas eficazes deve considerar a necessidade de reduzir os impactos assimétricos dessa transição, com foco especial nas regiões e populações mais vulneráveis.

Adicionalmente, é fundamental que o processo de transição contemple as dificuldades enfrentadas por micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), as quais representam, em média, 69% do total de empregos nos países da OCDE e desempenham papel estratégico na promoção da inovação verde. Apesar disso, muitas políticas climáticas são desenhadas com foco em grandes empresas, o que dificulta o engajamento das MPMEs. Entre os principais entraves enfrentados por essas empresas destacam-se a carência de capacidades técnicas e gerenciais, o acesso restrito a linhas de crédito e financiamento verde, bem como a limitação de recursos para atender a exigências regulatórias e de relatórios (OCDE, 2023). Diante disso, cabe aos formuladores de políticas adotar estratégias específicas que removam essas barreiras, de modo a permitir uma transição inclusiva e verdadeiramente sustentável.

A implementação desses instrumentos no país requer ajustes institucionais e jurídicos, bem como o fortalecimento da governança e da transparência no setor ambiental. Rockström et al. (2009) destacam a importância de políticas bem estruturadas para garantir que mecanismos econômicos sejam eficazes na redução de emissões e na proteção dos ecossistemas. O relatório do Banco Mundial (2023) alerta para a necessidade de políticas complementares e sistemas robustos de medição e verificação das emissões.

O impacto econômico dos instrumentos de mitigação é significativo. A literatura acadêmica enfatiza que a transição para uma economia verde pode gerar oportunidades de crescimento econômico e criação de empregos. Stern (2007) enfatiza que:

Ninguém pode prever as consequências da mudança climática com total certeza; mas agora sabemos o suficiente para entender os riscos. A mitigação - tomar medidas fortes para reduzir as emissões - deve ser vista como um investimento, um custo incorrido agora e nas próximas décadas para evitar os riscos de consequências extremamente severas no futuro. Se esses investimentos forem feitos de forma inteligente, os custos serão gerenciáveis, e haverá uma ampla gama de oportunidades de crescimento e desenvolvimento ao longo do caminho.

O relatório do banco mundial (2023) também aponta desafios econômicos e políticos na implementação desses instrumentos. A resistência de setores intensivos em carbono, como a mineração e o agronegócio, pode dificultar reformas estruturais. No entanto, soluções como transição justa e compensação financeira para comunidades afetadas podem facilitar essa transformação.

A literatura e relatórios como o da OCDE (2025) e do Banco Mundial (2023) convergem na necessidade de coordenação internacional e políticas nacionais robustas para que os instrumentos econômicos sejam eficazes. O Brasil pode se beneficiar do

comércio global de carbono e dos fundos climáticos, além de fortalecer suas políticas internas.

Dessa forma, instrumentos como os créditos de carbono (desde que bem fiscalizados), a transição energética, os tributos verdes e os incentivos econômicos formam um conjunto de ferramentas fundamentais para a mitigação das mudanças climáticas no Brasil. O desafio está na implementação eficaz desses mecanismos, garantindo que promovam inovação, competitividade e desenvolvimento sustentável sem comprometer a justiça, equidade social e a prosperidade econômica.

1.4 Transição energética como resposta estratégica à crise ambiental.

A transição energética, como discutido, é um dos pilares fundamentais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da queima de combustíveis fósseis. O desenvolvimento de um modelo sustentável de produção e consumo de energia se apresenta como uma necessidade urgente, considerando os desafios ambientais, sociais e econômicos que o aquecimento global impõe à humanidade. Segundo Kemp et al. (2022), a crise climática demanda uma análise aprofundada dos piores cenários possíveis, destacando a necessidade de uma transição energética estruturada para evitar impactos catastróficos.

A transição energética é um processo que busca substituir gradativamente fontes não renováveis por alternativas sustentáveis, promovendo maior eficiência na utilização dos recursos naturais e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Nesse sentido, Stern (2007) argumenta que existem maneiras de reduzir os riscos das mudanças climáticas e que as medidas devem começar o quanto antes. Com os incentivos certos, o setor privado responderá e pode oferecer soluções que sejam economicamente executáveis. A estabilização das concentrações de gases de efeito estufa, na atmosfera é viável, com custos significativos, mas gerenciáveis. Para o autor, ainda é possível evitar os piores impactos das mudanças climáticas; mas isso requer ação coletiva forte e urgente. A demora seria cara e perigosa.

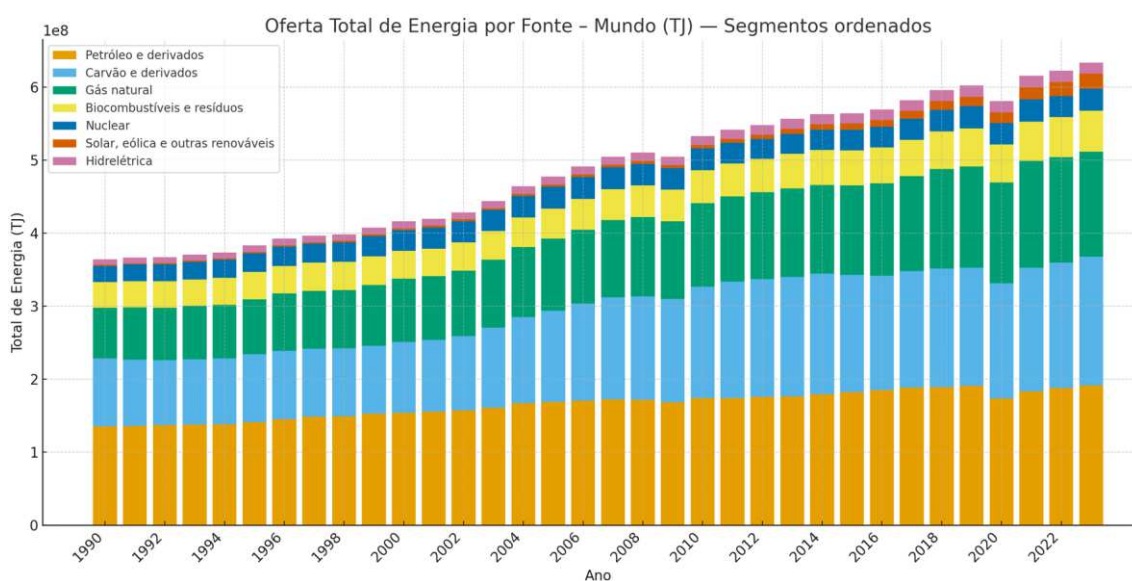
O relatório da OCDE intitulado: *Fast-tracking Net Zero by Building Climate and Economic Resilience: A Summary for Policymakers* (2025) alerta que o ano de 2024 foi o mais quente já registrado, ultrapassando pela primeira vez a média de +1,5 °C, o que indica um cenário de superaquecimento climático iminente. Para evitar os impactos

sistêmicos e irreversíveis decorrentes da superação de pontos de inflexão no sistema climático, a redução drástica das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030 é considerada um imperativo. Nesse contexto, substituir fontes fósseis por tecnologias limpas e renováveis não é apenas uma medida ambiental, mas uma reestruturação urgente dos sistemas produtivos e dos modelos de desenvolvimento.

O documento enfatiza que tecnologias como energia solar, eólica, veículos elétricos e baterias já estão disponíveis e passaram por significativa queda de custo nos últimos anos, tornando sua implementação viável em larga escala. No entanto, embora tenham avançado, essas alternativas ainda não substituem suficientemente a matriz energética baseada em carvão, petróleo e gás natural. Isso demonstra que a transição energética precisa ser acelerada por meio de políticas públicas coerentes, investimentos robustos e ações coordenadas em múltiplas frentes — incluindo comportamento social, governança institucional e planejamento urbano. A OCDE aponta que, mesmo os países com boas políticas climáticas, ainda não atingiram níveis de ambição e escala compatíveis com os desafios colocados.

O gráfico a seguir demonstra o total de energia por fonte que são utilizados no mundo, este estudo da IEA corrobora o fato de que, há muito tempo, a base energética mundial é dependente de fontes não renováveis, além de alertar para o fato de que não houve mudança significativa nesta matriz nos 30 anos analisados.

Gráfico 6. Oferta total de energia por fonte - Mundo (TJ) - Segmentos ordenados



Fonte: IEA World Energy Balances <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>

Além de mitigar a mudança climática, a transição energética pode gerar benefícios econômicos, sociais e sanitários. Segundo o relatório, a adoção de sistemas energéticos eficientes promove segurança energética, criação de empregos verdes e melhorias em saúde pública, ao reduzir poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis. Essas vantagens reafirmam que a descarbonização deve ser vista não como uma restrição ao crescimento econômico, mas como oportunidade estratégica para transformar economias e sociedades em direção à sustentabilidade e à resiliência. A urgência da crise climática exige que essa transição ocorra com prioridade máxima nos próximos cinco anos, integrando todos os setores da sociedade.

Os combustíveis alternativos surgem como uma das soluções estratégicas para viabilizar a transição energética. Entre eles, destacam-se os biocombustíveis, o hidrogênio verde e a eletrificação baseada em fontes renováveis. Georgescu-Roegen (2005) enfatiza que o consumo de recursos fósseis tende a aumentar a entropia no sistema econômico, tornando a substituição por fontes renováveis uma necessidade para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

O hidrogênio verde, por exemplo, é produzido por eletrólise utilizando energia renovável e se apresenta como uma alternativa promissora para setores como transporte e indústria pesada, porém apresenta um custo de implementação elevado. Costanza et al. (1997) reforçam a importância de considerar os serviços ecossistêmicos na formulação de políticas ambientais, permitindo que a produção e uso de combustíveis sustentáveis sejam alinhados aos princípios da economia ecológica.

A implementação de políticas públicas robustas e mecanismos de mercado é essencial para viabilizar a transição energética. Baranzini et al. (2017) defendem que a precificação do carbono, por meio de impostos ambientais e mercados de crédito de carbono bem regulamentados, pode estimular empresas a adotarem práticas mais sustentáveis. Segundo o relatório do Banco Mundial (2023), o Brasil possui grande potencial para desenvolver um sistema de comércio de emissões que favoreça investimentos em tecnologias limpas e impulse a competitividade do setor energético.

A cooperação internacional também desempenha um papel fundamental no avanço da transição energética. Dietz et al. (2020) ressaltam que acordos como o Acordo de Paris são essenciais para estabelecer metas globais de redução de emissões e incentivar a transição para fontes renováveis. Conforme Kemp et al. (2022), o enfrentamento da

crise climática requer estratégias coordenadas entre diferentes países para evitar impactos irreversíveis nos sistemas ecológicos e econômicos.

Segundo a *Internacional Energy Agency* (IEA), o avanço da eficiência energética ganhou ritmo nas últimas duas décadas, porém será necessário duplicar esse progresso para que se alcance a meta de emissões líquidas zero. Desde o início dos anos 2000, as melhorias na intensidade energética — ou seja, a quantidade de energia consumida por unidade de produto econômico — foram responsáveis por reduzir pela metade as emissões de dióxido de carbono (CO₂) que teriam sido geradas em decorrência do crescimento populacional e do aumento da renda global. A taxa média anual de melhoria da intensidade energética aumentou de 0,8% entre 2000 e 2010 para aproximadamente 1,8% entre 2010 e 2022. Nesse período, estima-se que tenham sido evitadas cerca de 2,5 Gt de CO₂ entre 2000 e 2010, e 7 Gt entre 2010 e 2022.

Caso esse ritmo de melhoria seja intensificado, a eficiência energética poderá contribuir com mais de um terço da redução total de emissões de CO₂ necessária até 2030, considerando uma trajetória compatível com a neutralidade de carbono até 2050. Para isso, é fundamental acelerar a eletrificação de setores intensivos em energia, aperfeiçoar o desempenho técnico de equipamentos e processos, e fomentar mudanças comportamentais que reduzam o consumo energético.

Além disso, a eficiência energética desempenha papel estratégico na substituição progressiva dos combustíveis fósseis. De acordo com projeções alinhadas ao cenário da Agência Internacional de Energia (AIE) para emissões líquidas zero no setor energético até 2050, o fortalecimento das medidas de eficiência poderá ser responsável por mais de dois terços da redução prevista na demanda por petróleo e por cerca da metade da queda na demanda por gás natural até 2030. A diminuição no consumo de petróleo, comparável ao uso total desse combustível pela China em 2024, será impulsionada principalmente por avanços tecnológicos, como a maior eficiência dos motores e a expansão dos veículos elétricos (EVs). Já a retração no uso de gás natural, superior ao volume consumido por toda a Europa em 2024, será viabilizada, em grande parte, por medidas como o reforço do isolamento térmico de edificações e a eletrificação dos sistemas de aquecimento.

Por outro lado, cada ano em que o progresso da eficiência energética se dá em ritmo inferior ao necessário implica em maior consumo de energia e emissões de CO₂ em escala global. Isso torna a tarefa de descarbonização mais complexa, exigindo tecnologias

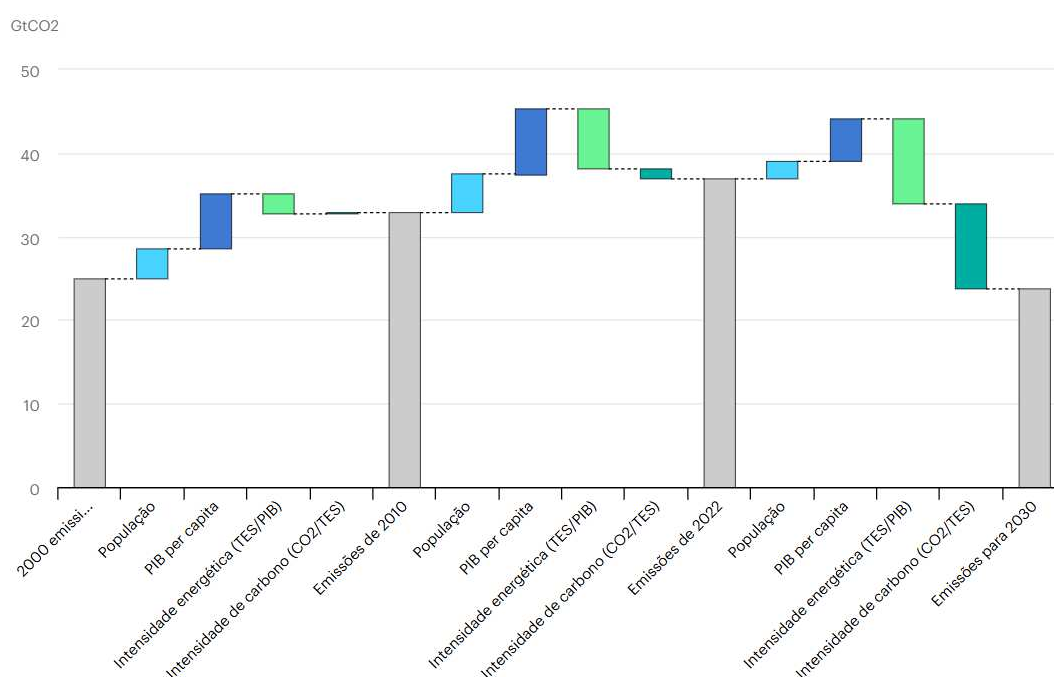
de energia limpa mais avançadas, com custos mais elevados e prazos mais curtos para sua implementação em larga escala.

O gráfico a seguir mostra as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, 2000-2022, e no cenário Net Zero, 2030. NZE refere-se ao cenário de emissões líquidas zero até 2030, enquanto TES corresponde ao fornecimento total de energia. As emissões de CO₂ relacionadas à energia incluem emissões de combustão de combustível e emissões de processos industriais.

As emissões de CO₂ aumentaram de 25,0 Gt em 2000 para 32,9Gt em 2010, chegando a 37,0Gt em 2022. A expectativa com a transição energética e as metas globais de Net Zero é que o patamar reduza em 2030 para 23,9 Gt. Como supramencionado, a melhora na intensidade energética e na intensidade de carbono é peça chave nessa redução.

Outro ponto importante é uma expectativa de redução no ritmo de crescimento populacional, que refletiu em uma redução de emissões populacionais totais de 4.6 Gt em 2010 para 2.1Gt em 2022. Isso impacta diretamente na redução de emissões per capita que passou de 7.9Gt em 2010 para 5.1Gt em 2022.

Gráfico 7. Emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, 2000-2022, e no cenário Net Zero, 2030.



Fonte: IEA (2024).

O aumento dos preços da energia e as ameaças à segurança do fornecimento energético têm intensificado as preocupações globais com as mudanças climáticas, conferindo ainda maior urgência à implementação de políticas voltadas à eficiência energética. Nos últimos anos, os mercados internacionais de energia enfrentaram choques significativos, como elevação de preços, riscos à estabilidade no abastecimento e eventos climáticos extremos, incluindo ondas de calor mais frequentes em diversas regiões do planeta (IEA, 2024)

Diante desse cenário, governos ao redor do mundo passaram a reconhecer com mais clareza a necessidade de acelerar a transição energética. Esse reconhecimento foi formalizado na 28ª Conferência das Partes (COP28), na qual os países firmaram um compromisso coletivo de dobrar a taxa média global de melhoria da eficiência energética até 2030 (IEA, 2024).

Para alcançar essa meta ambiciosa, diversos países têm iniciado a implementação de políticas públicas novas ou atualizadas ao longo de 2024. Na Europa, a União Europeia aprovou, em maio de 2024, a versão revisada da Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios, que exige que todas as novas construções sejam de emissão zero até 2030. A medida também estabelece padrões mínimos obrigatórios de desempenho energético para edifícios não residenciais e planos de renovação de longo prazo. Complementarmente, foi adotada uma revisão da Diretiva de Eficiência Energética ao final de 2023. No Reino Unido, o Esquema de Descarbonização do Setor Público destinou cerca de US\$ 680 milhões para promover melhorias de eficiência em instituições como escolas, hospitais e edifícios governamentais (IEA, 2024).

Na América do Norte, os Estados Unidos atualizaram em 2024 os padrões para automóveis de passeio, prevendo um aumento anual de 2% nas metas da Economia Média Corporativa de Combustível (CAFE) entre os anos-modelo 2027 e 2032. O país também endureceu os regulamentos para veículos pesados, cujos novos padrões, a serem aplicados a partir de 2027, são de 40% a 60% mais rigorosos que os anteriores. Espera-se que tais medidas elevem a participação dos veículos de emissão zero (ZEVs) para até 60% das vendas totais de carros até 2032. O Canadá, por sua vez, lançou a Estratégia de Construção Verde, que inclui investimentos de aproximadamente US\$ 600 milhões para acelerar retrofits e descontinuar gradualmente o uso de aquecimento a óleo em novos edifícios a partir de 2028. O México também avançou, ao apresentar um novo rascunho regulatório para condicionadores de ar centrais (IEA, 2024).

A China publicou, em maio de 2024, o Plano de Ação para Conservação de Energia e Redução de Carbono 2024–2025, que estabelece a meta de melhorar a intensidade energética em 2,5% para 2024, sendo esta meta ampliada para 3,5% nos setores industriais de maior consumo energético. Estima-se que esse plano proporcione, ao longo de dois anos, economia energética equivalente a 100 Mt de carvão. Complementarmente, o país lançou diretrizes específicas para setores como cimento, aço, amônia sintética, alumínio eletrolítico, data centers e indústria petroquímica (IEA, 2024).

A Índia adotou o programa *PM Electric Drive Revolution in Innovative Vehicle Enhancement* (PM E-DRIVE), em setembro de 2024, como sucessor do FAME (*Faster Adoption and Manufacturing of Electric Vehicles*). A nova iniciativa visa estimular a adoção de veículos elétricos de duas e três rodas, além de ônibus elétricos, por meio de incentivos à compra e investimentos em infraestrutura de recarga. Paralelamente, foi instituído o Esquema para Promover a Produção de Automóveis de Passageiros Elétricos, com o objetivo de atrair fabricantes globais para estabelecerem unidades industriais no país (IEA, 2024).

Na região Ásia-Pacífico, o Japão divulgou a Estratégia Nacional de Eficiência Energética e Transição para Energias Não Fósseis, priorizando a otimização do uso de calor na indústria e nos edifícios, bem como o aprimoramento do desempenho energético de veículos e da gestão de dados. A Coreia do Sul lançou o Programa de Metas de Intensidade Energética para edifícios de médio e grande porte, estabelecendo metas específicas por metro quadrado e um sistema de classificação baseado no desempenho energético relativo (IEA, 2024).

A Austrália, por sua vez, implementou um novo padrão veicular com vistas à redução de mais de 60% nas emissões de novos automóveis de passageiros e à diminuição pela metade das emissões de veículos comerciais leves até 2030. Já Cingapura passou a oferecer um subsídio de SGD 300 (aproximadamente US\$ 225) para incentivar a aquisição de eletrodomésticos com maior eficiência energética e hídrica. A Indonésia também está desenvolvendo padrões de consumo de combustível para veículos pesados com o apoio da Agência Internacional de Energia. (IEA, 2024)

Na América do Sul, o Brasil estabeleceu novos índices de eficiência energética para refrigeradores, com a expectativa de um ganho de 17% na eficiência dos modelos disponíveis no mercado a partir de 2028. O Chile, por sua vez, passou a vigorar com seu

novo padrão de eficiência energética para veículos leves, que objetiva um aumento de 45% na eficiência de novos automóveis (IEA, 2024).

Por fim, no continente africano, a Comunidade de Desenvolvimento da África Austral aprovou padrões mínimos de eficiência energética (MEPS) para sistemas de ar-condicionado e refrigeração, com potencial de economizar até US\$ 840 milhões anuais nas contas de energia dos consumidores. Na África do Sul, foi promulgada a nova Lei de Mudança Climática, que estabelece metas setoriais obrigatórias de emissões e promove a eficiência energética em escala nacional. O Quênia também atualizou seu código de construção, tornando obrigatórios os requisitos de eficiência energética em novas edificações (IEA, 2024).

Nesse sentido, a transição energética não apenas reduz os impactos ambientais, mas também gera oportunidades econômicas e tecnológicas. Stern (2007) destaca que investimentos em energia limpa podem fomentar a inovação e impulsionar o crescimento econômico, criando empregos e fortalecendo mercados emergentes. O relatório do Banco Mundial (2023) estima que a implementação de políticas de incentivo à mobilidade elétrica e ao uso de biocombustíveis pode favorecer o desenvolvimento sustentável e a segurança energética no Brasil.

Apesar dos benefícios, a transição energética enfrenta desafios significativos. Setores altamente dependentes de combustíveis fósseis, tendem a resistir a mudanças estruturais é o caso da mineração e o agronegócio. Daly (1996) propõe que a sustentabilidade econômica deve ser incorporada às políticas públicas, garantindo que a transição energética ocorra de forma justa e equilibrada. Kemp et al. (2022) alertam que falhas na implementação de estratégias climáticas podem resultar em impactos sistêmicos e aprofundar crises socioeconômicas.

Segundo o estudo de Jackson et. al. (2020), a aceleração da descarbonização enfrenta, ainda, múltiplos desafios estruturais. Os autores identificam obstáculos como a resistência de indústrias emissoras tradicionais, a fragmentação das políticas públicas e a complexidade na coordenação entre setores e escalas de governo. Há também barreiras culturais, expressas na dificuldade de promover mudanças nos padrões de consumo e nas práticas sociais que sustentam o modelo atual. Apesar disso, os autores defendem que a descarbonização não deve ser vista apenas como uma meta ambiental, mas como uma oportunidade estratégica para reconfigurar sistemas produtivos em direção à

sustentabilidade, à justiça climática e à preservação das condições de vida das futuras gerações.

A transição energética figura, portanto, como um caminho inevitável para garantir a estabilidade climática e a sustentabilidade ambiental. Conforme Rockström et al. (2009), respeitar os limites planetários e adotar práticas mais eficientes na produção e consumo de energia é essencial para evitar o colapso ecológico. A continuidade dos investimentos em combustíveis alternativos e a formulação de políticas públicas eficazes são elementos-chave para assegurar um desenvolvimento sustentável.

Desta maneira, diante da crescente necessidade de respostas estratégicas à crise ambiental, a transição energética se apresenta como um mecanismo indispensável para reduzir as emissões de GEE e mitigar os impactos das mudanças climáticas. A adoção de eficiência energética e uso de combustíveis alternativos, combinada com políticas econômicas eficientes e cooperação internacional, pode impulsionar um modelo de desenvolvimento sustentável. A literatura e os relatórios internacionais convergem na urgência de ações estruturadas para evitar cenários catastróficos e garantir um futuro adequado para as próximas gerações.

2. A AVIAÇÃO CIVIL NO CONTEXTO DA DESCARBONIZAÇÃO GLOBAL

O avanço das mudanças climáticas e seus impactos crescentes sobre os sistemas naturais e socioeconômicos tornaram a descarbonização da economia uma prioridade para a agenda internacional. O Acordo de Paris, baseado em metas de redução de emissões, reflete a necessidade de ações coordenadas entre países. Para alcançar esse objetivo, é imprescindível reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em todos os setores da economia, especialmente naqueles mais intensivos em carbono, como a aviação civil internacional.

Apesar de sua contribuição relativa às emissões globais ser inferior à de outros setores (2 a 3%), a aviação é um dos segmentos mais complexos de descarbonizar, tanto pelas especificidades tecnológicas quanto pelas múltiplas interdependências institucionais envolvidas. O transporte aéreo global é viabilizado por uma cadeia altamente fragmentada, que inclui fabricantes de aeronaves, fornecedores de combustíveis, operadores aeroportuários, prestadores de serviços de tráfego aéreo e companhias aéreas. Nenhum desses agentes, isoladamente, possui o controle integral sobre os recursos e decisões necessários para reduzir as emissões do setor. Por esse motivo, a neutralidade de carbono até 2050 — compromisso assumido pela indústria da aviação em alinhamento com o Acordo de Paris — exige a articulação coordenada entre atores públicos e privados, em escala internacional (IATA, 2022).

As companhias aéreas, por exemplo, não produzem o combustível que consomem, nem constroem as aeronaves que operam, e tampouco são responsáveis pela gestão direta do tráfego aéreo ou da infraestrutura terrestre. Assim, a transição para uma aviação de baixo carbono não pode ser vista como responsabilidade exclusiva das empresas aéreas, mas sim como uma missão compartilhada por todos os participantes da cadeia produtiva do transporte aéreo.

Além disso, a descarbonização do setor aéreo não deve ser abordada apenas como uma questão de mobilidade ou transporte, mas como parte integrante da transição energética global. A produção em larga escala de combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuels* – SAF), por exemplo, será fundamental não apenas para o setor aéreo, mas também para outras indústrias que exigem fontes de energia renovável de alta densidade energética (IEA, 2024).

A concretização dessa transição envolve desafios financeiros, regulatórios e tecnológicos expressivos. A maior parte das tecnologias de baixo carbono aplicáveis ao setor aéreo ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento ou demonstração, e muitas delas requerem investimentos substanciais em pesquisa, infraestrutura e inovação. O desenvolvimento e a expansão de biorrefinarias capazes de produzir SAF em escala comercial implicam custos elevados, ao mesmo tempo em que dependem de marcos regulatórios claros, estímulos econômicos adequados e previsibilidade institucional para atrair investimentos privados.

Nesse sentido, a transformação do setor aéreo para um modelo compatível com a neutralidade climática reflete, em última instância, o sucesso – ou fracasso – da governança global frente à crise climática e sua capacidade de promover uma transição energética equitativa e sustentável (IATA, 2022).

Dessa forma, compreender a aviação no contexto da descarbonização global exige uma abordagem sistêmica, que considere a interdependência entre os agentes da cadeia de valor, a necessidade de investimentos coordenados em inovação e infraestrutura, e a construção de políticas públicas eficazes em nível internacional. A análise da transição energética no setor aéreo permite não apenas identificar os principais obstáculos à neutralidade de carbono, mas também destacar oportunidades para o desenvolvimento tecnológico, a reconfiguração da matriz energética e o fortalecimento de compromissos climáticos globais.

2.1 Particularidades das emissões do setor aéreo

O impacto ambiental total do transporte aéreo resulta de suas emissões de CO₂ e não CO₂ (por exemplo, NO_x e rastros ou trilhas de condensação), que são liberados diretamente na atmosfera em altitudes de cruzeiro de 8 a 13 km acima do nível médio do mar.

Os efeitos não relacionados ao CO₂ têm um impacto no aquecimento global que foi estimado em aproximadamente metade do impacto climático total da indústria (Lee et. al., 2020), embora com uma gama muito mais ampla de incertezas na quantificação precisa em comparação com a do CO₂. Os efeitos não relacionados ao CO₂ também são de curta duração (ou seja, acúmulo por horas ou décadas) em comparação com as emissões de CO₂ que se acumulam na atmosfera por centenas de anos. (IATA, 2025)

Segundo a IATA, numerosos estudos de medição mostraram que os motores a jato que queimam SAF ou combustíveis com menor teor aromático e de enxofre modificam as emissões dos motores de aeronaves em comparação com o combustível de aviação convencional de base fóssil (CAF). Especificamente, as emissões de carbono negro, ou "fuligem", e partículas menores, como as derivadas do dióxido de enxofre, são reduzidas. Com base nesses estudos, é amplamente aceito que o SAF e outros combustíveis com essas propriedades apresentam emissões de fuligem mais baixas em comparação com o CAF e que uma grande fração das emissões de fuligem é de compostos naftalenos (IATA, 2025).

As nuvens *cirros Contrail* têm um efeito de aquecimento significativo no clima. A maioria dos motores a jato atuais emite grandes quantidades de partículas de fuligem, que contribuem para a formação dos cristais de gelo que compõem os rastros e impactam o clima. Nesse regime de alto teor de fuligem, estudos de medição e modelagem mostraram que a redução das emissões de fuligem usando SAF com menor teor de naftalenos e enxofre pode ter um benefício climático positivo (IATA, 2025).

Por serem liberadas na troposfera superior e na estratosfera inferior, as emissões no setor aéreo favorecem a formação dessas trilhas de condensação (*contrails*) e cirros induzidos por aviões, aumentam o forçamento radiativo. (LEE et al., 2021).

Pesquisadores do Estudo de Emissão e Impacto Climático de Combustíveis Alternativos (ECLIF) estudaram o impacto da redução das emissões de fuligem nas propriedades microfísicas de um rastro de vapor. Um dos objetivos das campanhas ECLIF era investigar os efeitos do conteúdo de aromáticos, nomeadamente naftaleno, em misturas de SAF sobre emissões de fuligem e formação de partículas de gelo em rastros de vapor. Uma série de campanhas de voo realizadas ao longo de vários anos fornece fortes evidências experimentais de que o SAF pode reduzir tanto as emissões de fuligem quanto o número de cristais de gelo (Märkl et al., 2024).

As campanhas ECLIF1 e ECLIF2, que ocorreram em 2015 e 2018, respectivamente, avaliaram os impactos de quatro amostras de combustíveis do tipo Jet A1 (Combustível convencional fóssil) a 100% com amostras de Jet A1 misturado com SAF (Combustível Sustentável de Aviação) baseado em Fischer-Tropsch (FT) (SSF1) e duas variedades de SAF baseado em HEFA-SPK, levando em conta suas diferentes propriedades de combustíveis, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos combustíveis queimados durante os experimentos ECLIF1 e ECLIF2/ND-MAX.

Combustíveis ECLIF	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	SSF1	SAF1	SAF2
Composição do combustível	100% Jet A1	100% Jet A1	100% Jet A1	100% Jet A1	59% Ref1 + 41% FT-SPK	5% Ref4 + 95% HEFA-SPK	70% Ref4 + 30% HEFA-SPK
Aromáticos (ASTM D6379) SASOL/Petroba (% vol)	18,8 (±2,5)	17,2 (±2,5)	18,7 (±2,5)	17,1 (±2,5)	11,4 (±2,5)	8,5 (±1,5)	9,5 (±1,5)
Naftalenos (ASTM D1840) (% vol)	15,1 (±0,07)	18,3 (±0,08)	17,7 (±0,06)	0,3 (±0,02)	0,82 (±0,01)	0,61 (±0,04)	0,64 (±0,04)
Teor de hidrogênio (massa%) (NMR ASTM D7171)	13,6 (±0,03)	13,7 (±0,03)	13,6 (±0,03)	14,3 (±0,04)	14,0 (±0,04)	14,5 (±0,05)	14,5 (±0,05)
Razão HC (NMR ASTM D7171)	1,89 (±0,02)	1,90 (±0,02)	1,89 (±0,02)	1,96 (±0,02)	1,94 (±0,02)	2,00 (±0,02)	2,02 (±0,02)
Densidade (kg/m³) (ASTM D4052)	804,0 (±0,2)	809,0 (±0,2)	804,0 (±0,2)	781,0 (±0,2)	785,0 (±0,2)	768,0 (±0,2)	769,0 (±0,2)
Energia específica (MJ/kg) (ASTM D3338)	42,80 (±0,07)	42,70 (±0,07)	42,80 (±0,07)	43,30 (±0,07)	43,20 (±0,07)	43,60 (±0,07)	43,60 (±0,07)
Viscosidade (mm²/s) (ASTM D445)	1,32 (±0,01)	1,38 (±0,01)	1,32 (±0,01)	1,03 (±0,01)	1,05 (±0,01)	1,01 (±0,01)	1,02 (±0,01)
Enxofre total (massa%) (ASTM D2622)	0,037 (±0,003)	0,003 (±0,003)	0,032 (±0,003)	0,002 (±0,001)	0,002 (±0,001)	0,0007 (±0,0001)	0,0007 (±0,0001)

Obs.: Incertezas de acordo com os padrões de certificação ASTM. Os combustíveis de referência (Ref1 a Ref4), o combustível semissintético (SSF1) e os combustíveis sustentáveis para aviação (SAF1 e SAF2) foram utilizados nos experimentos ECLIF1 e ECLIF2/ND-MAX.

Fonte: Adaptado de Voigt et al. (2021).

Voigt et al. (2021) relataram que emissões de fuligem e número aparente de partículas de gelo significativamente mais baixas estavam associadas aos combustíveis sustentáveis (SAF). Os índices de emissões de fuligem para os blends SAF à base de HEFA eram 45–53% mais baixos do que o combustível Ref2 Jet A1, consistente com estudos anteriores (Moore et al., 2017). Além disso, Voigt et al. (2021) também relataram que o blend à base de FT resultou em uma redução de emissões de fuligem de aproximadamente 50%.

As reduções de partículas de fuligem associadas a todos os blends SAF levaram a concentrações de número de cristais de gelo de 45–74% mais baixas em comparação com o combustível Ref2 Jet A1. Mais especificamente, eles descobriram que o SAF2, que tinha o maior teor de hidrogênio no combustível e o menor teor de naftaleno, estava associado às menores emissões de fuligem e gelo.

As trilhas de condensação impactam o clima ao interagir tanto com a radiação solar quanto com a radiação terrestre, o que modifica o equilíbrio energético da Terra. Os cristais de gelo que compõem as trilhas de condensação refletem parte da radiação de onda curta que chega do Sol (efeito de albedo de nuvens de resfriamento) e absorvem e reemitem a radiação de onda longa que sai da Terra (efeito de estufa das nuvens de aquecimento). A quantidade de radiação refletida ou absorvida depende das propriedades microfísicas da trilha de condensação (ou seja, massa, concentração de cristais de gelo, forma e tamanho) e de sua duração.

As propriedades microfísicas de uma trilha de condensação determinam sua profundidade óptica ou espessura, que é uma medida de quanto de radiação é dispersa ou absorvida através da trilha de condensação. A força radiativa líquida, ou perturbação ao equilíbrio energético da Terra, de uma única trilha de condensação é calculada como a diferença do fluxo de radiação líquida (onda longa mais onda curta) no topo da atmosfera para uma situação com e sem a trilha de condensação. Essa diferença depende tanto das propriedades da trilha de condensação quanto das condições ambientais, incluindo albedo da superfície, presença de outras nuvens, ângulo do sol etc. (IATA, 2025b).

O artigo publicado na revista *Environmental Research Letters* por pesquisadores do Instituto de tecnologia de Massachusetts nos Estados Unidos em conjunto com pesquisadores da faculdade de Delft na Holanda, corrobora a afirmativa de que as emissões de alta altitude têm impactos climáticos diferentes devido ao potencial de formação de rastros. Os resultados obtidos pelos pesquisadores indicam que os maiores impactos climáticos por unidade de emissão ocorrem em cruzeiro, provavelmente devido ao aumento do tempo de residência atmosférica das emissões em altitude. Considera ainda que, como ~90% da queima de combustível ocorre em cruzeiros, as emissões de GEE nessas altitudes dominam os impactos na qualidade do ar. (Barrett et. al., 2019).

O impacto climático dos rastros de *contrail*, como mencionado, é de curta duração (se comparados aos CO₂) e depende da localização geográfica, altitude e do horário do dia e do ano em que se formam e persistem. Estudos descobriram que apenas um pequeno número de voos é responsável pela maior parte do aquecimento climático causado pelos rastros.

Dado que o aumento da produção de SAF é lento e que os suprimentos são limitados, priorizar o uso de SAF em rotas específicas que são mais propensas a formar

rastros que aquecem muito poderia ser uma estratégia eficiente para otimizar os co-benefícios climáticos do SAF a curto prazo. No entanto, existem questões logísticas e de infraestrutura significativas e caras que precisam ser abordadas para determinar a viabilidade de tais estratégias.

Alterar a composição do combustível, removendo ou reduzindo naftalenos e enxofre do CAF para reduzir as emissões de partículas, também está sendo considerado como uma estratégia para ajudar a reduzir os impactos não relacionados ao CO₂ do transporte aéreo. Embora existam tecnologias de refino atuais para otimizar a composição do combustível em benefício ambiental, produtores e os fornecedores têm pouco incentivo devido aos custos adicionais associados (IATA, 2025b).

Além disso, o processamento extra exigido levará a aumentos nas emissões do ciclo de vida, resultando em uma penalidade climática. Modificar os padrões de combustível pode ser uma forma de mitigar os efeitos não relacionados ao CO₂, mas avaliações abrangentes e detalhadas dos compromissos associados de segurança, econômicos, tecnológicos e ambientais são necessárias para determinar soluções ótimas e viáveis, incluindo incentivos políticos, antes que qualquer nova decisão seja tomada (IATA, 2025b)

Mitigar os efeitos não relacionados ao CO₂ é complicado por interdependências e compromissos complexos, assim como incertezas científicas associadas a alguns dos processos relacionados. Uma abordagem em toda a indústria, baseada na colaboração entre múltiplos stakeholders e científicos, é necessária para encontrar soluções inteligentes alcançáveis. Essas soluções também devem considerar as mudanças ambientais e tecnológicas nas próximas décadas. Mudanças no estado de fundo da atmosfera devido a reduções nas emissões superficiais de outros setores, assim como mudanças no clima, influenciarão os efeitos das emissões não relacionadas ao CO₂. Além disso, com a renovação da frota, motores com baixa produção de fuligem acabarão substituindo os benefícios não relacionados ao CO₂ de combustíveis com menor conteúdo aromático (IATA, 2025b).

O efeito cumulativo das emissões na aviação, também decorre da longevidade da infraestrutura aeronáutica e da lenta renovação tecnológica no setor, o que faz com que as emissões atuais se somem às anteriores, contribuindo de forma persistente para a concentração de GEE na atmosfera. Além disso, a demanda por transporte aéreo tem

crescido de maneira constante nas últimas décadas, impulsionada pela globalização econômica, turismo internacional e expansão das companhias aéreas de baixo custo.

Esse crescimento contínuo tende a anular os ganhos obtidos por meio de melhorias tecnológicas e operacionais, intensificando o impacto climático agregado da aviação. Assim, a combinação entre os efeitos específicos das emissões em altitude e a trajetória ascendente da demanda tornam o setor aéreo um vetor crítico nas estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma, alternativas como os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) emergem como uma estratégia viável e competente para reduzir as emissões sem comprometer a eficiência operacional das aeronaves (BOEING et al., 2013).

O setor apresenta elevada dependência de combustíveis líquidos devido às especificidades técnicas e operacionais do transporte aéreo, especialmente no que se refere à densidade energética necessária para a propulsão em voos de média e longa distância. Diferentemente de outros modos de transporte, como o terrestre, nos quais a eletrificação já se mostra viável em diversas aplicações, a aviação exige fontes de energia com alta densidade por unidade de peso e volume, condição que os combustíveis líquidos, como o querosene de aviação de origem fóssil (Jet A e Jet A-1), atendem com eficiência.

Além disso, a infraestrutura aeroportuária, os motores das aeronaves comerciais e os protocolos de segurança aeronáutica foram historicamente desenvolvidos com base no uso de derivados de petróleo, o que dificulta a substituição imediata por fontes alternativas. Mesmo tecnologias emergentes, como hidrogênio ou eletrificação parcial, ainda enfrentam sérios obstáculos de viabilidade técnica, econômica e regulatória. O setor aéreo, portanto, depende fortemente de combustíveis líquidos, tornando a eletrificação completa uma solução inviável no curto prazo.

A transição energética na aviação também envolve o desenvolvimento de novas tecnologias, como aeronaves movidas a hidrogênio e sistemas de propulsão elétrica. No entanto, essas soluções ainda enfrentam barreiras significativas, incluindo limitações na autonomia de voo e necessidade de infraestrutura específica para abastecimento (Repsol Open Room, 2024).

2.2 Soluções globais para descarbonizar a aviação

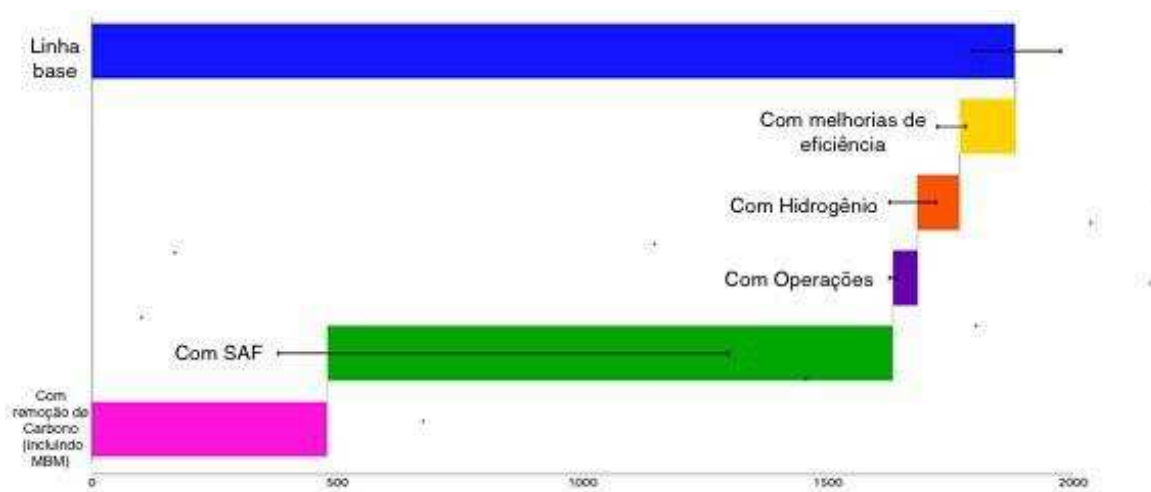
A busca por alternativas sustentáveis para o setor aéreo tem levado ao desenvolvimento de combustíveis sustentáveis de aviação, em inglês *sustainable aviation fuel* (SAF), que podem substituir parcialmente o querosene convencional sem necessidade de grandes modificações na infraestrutura existente.

O uso de combustíveis de aviação sustentáveis (SAF) pode reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) ao longo do ciclo de vida quando comparado ao uso de combustíveis de aviação convencionais (CAF). SAF é definido como combustível de jato derivado de biomassa ou resíduos não biológicos que foi produzido de forma certificável em conformidade com as especificações de qualidade de combustível de aviação e critérios de sustentabilidade, considerando tanto fatores de carbono quanto ambientais. (IATA, 2025)

Especificamente, SAF refere-se ao componente de mistura sintética (SBC) produzido a partir de matérias-primas sustentáveis que precisa ser misturado com CAF para atender às especificações de uso em uma aeronave. Dentre as várias soluções identificadas para apoiar o compromisso da indústria da aviação de alcançar emissões líquidas zero de CO₂ até 2050, o uso de SAF é a alavanca que mais contribuirá em termos de reduções nas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida. (IATA, 2025b)

Estima-se que aproximadamente 62% da redução das emissões de CO₂ em todo o setor da indústria seria alcançada com o uso de SAF, sustentando assim seu status como o principal impulsionador do compromisso do setor. A figura a seguir ilustra essas diferentes alavancas e sua potencial contribuição para reduzir as emissões de CO₂ da aviação, de acordo com os Mapas de Rota para a Neutralidade de Carbono da IATA: (IATA, 2025b)

Gráfico 8. Alavancas de ação para reduções das emissões de CO₂ da aviação até 2050. A barra sólida indica o caso central e as linhas pretas indicam reduções máximas e mínimas com base nos cenários modelados.



Fonte: adaptado de IATA Sustainability and Economics, ICAO LTAG SAF availability scenarios.

A certificação das rotas tecnológicas para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação é conduzida por meio de rigorosos padrões internacionais, sendo a principal referência normativa a *ASTM International*, anteriormente conhecida como *American Society for Testing and Materials*. A ASTM é uma organização global que desenvolve e publica normas técnicas consensuais, assegurando a qualidade, segurança e desempenho de produtos e processos. Especificamente no contexto da aviação, a certificação de SAF é regulada pelas normas ASTM D7566 e D1655, que definem os critérios para que combustíveis alternativos possam ser utilizados em combinação com o querosene de aviação convencional (Jet A-1), utilizando-as de maneira “*drop-in*”, isto é, sem a necessidade de modificações na infraestrutura aeroportuária ou nos motores das aeronaves (IATA, 2022; ICAO, 2024).

Atualmente, sete rotas tecnológicas encontram-se certificadas pela ASTM para produção de SAF. A primeira delas é a rota HEFA-SPK (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids – Synthetic Paraffinic Kerosene*), baseada na hidroprocessamento de óleos vegetais, gorduras animais e resíduos oleosos, como óleo de cozinha usado. Trata-se da via tecnológica mais consolidada e amplamente adotada comercialmente, sendo autorizada para mistura de até 50% com combustível fóssil de aviação. (IEA, 2024)

A segunda rota é a FT-SPK (*Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene*), que utiliza matérias-primas lignocelulósicas, resíduos urbanos ou gás de síntese, passando por um processo catalítico de conversão termoquímica. Essa rota também possui uma variante certificada, denominada FT-SPK/A, que incorpora hidrocarbonetos aromáticos essenciais para a performance do combustível (IEA, 2024).

A terceira rota certificada é a SIP (*Synthesized Iso-Paraffins*), ou HFS-SIP (*Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Iso-Paraffins*), que converte açúcares fermentados em hidrocarbonetos adequados à aviação, com limite de mistura de até 10%. A quarta via é a ATJ-SPK (*Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene*), proveniente da conversão de álcoois como etanol e isobutanol em parafinas sintéticas, com limite de mistura de 50%. Essa tecnologia se destaca pela flexibilidade na escolha das matérias-primas, incluindo biomassa de segunda geração. A quinta rota é a CHJ (*Catalytic Hydrothermolysis Jet*), também conhecida como CH-SK, que converte resíduos graxos (*FOG – fats, oils, and greases*) em querosene sintético por meio de craqueamento catalítico e hidrocessamento, sendo igualmente aprovada para mistura de até 50% (IATA, 2025; AVIATION BENEFITS, 2023).

As duas últimas rotas são o HC-HEFA-SPK, que emprega óleos derivados de microalgas para obtenção de hidrocarbonetos sintéticos com limite de mistura de até 10%, e o co-processamento em refinarias (FOG-CP e FT-CP), que permite a mistura direta de até 5% de insumos renováveis com o petróleo durante o processo de refino, sem necessidade de uma cadeia segregada. O co-processamento está regulamentado pela ASTM D1655, sendo uma opção interessante para aproveitar a infraestrutura de refino já existente e reduzir custos de transição (IEABIOENERGY, 2024).

A aprovação dessas rotas pela ASTM é fundamental para garantir a compatibilidade do SAF com as especificações técnicas, operacionais e de segurança da aviação civil internacional. Cada rota passa por um processo rigoroso de validação, incluindo testes laboratoriais, ensaios em motores de aeronaves e avaliação em voo, antes de sua inclusão como anexo da norma ASTM D7566.

A principal vantagem ambiental dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) em relação aos combustíveis fósseis convencionais reside em seu potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida. Esse conceito envolve a contabilização de todas as emissões associadas à produção, transporte, uso e descarte do combustível, permitindo avaliar de forma mais abrangente sua contribuição líquida para o aquecimento global.

Estudos conduzidos pela *International Air Transport Association* (IATA, 2025) e pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2024) indicam que os SAF podem reduzir as emissões de CO₂ em até 80% no ciclo de vida, dependendo da rota tecnológica

utilizada e da matéria-prima empregada. A utilização de resíduos orgânicos ou insumos de segunda geração (origem não alimentar), por exemplo, oferece um desempenho ambiental superior em comparação àquelas que utilizam culturas alimentares, além de mitigar os riscos de mudança indireta no uso da terra (ILUC – Indirect Land Use Change).

A análise de ciclo de vida é, portanto, um instrumento essencial para a validação da sustentabilidade ambiental dos SAF, sendo requisito obrigatório para que estes sejam elegíveis no âmbito de programas como o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). A ICAO (2024) estabeleceu critérios rigorosos para a certificação de combustíveis elegíveis ao CORSIA, os quais incluem além da redução líquida de emissões, a rastreabilidade da matéria-prima, práticas agrícolas sustentáveis e respeito a direitos trabalhistas e ambientais.

Adicionalmente, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024) destaca que a adoção de rotas tecnológicas com alta eficiência energética, associada ao uso de fontes renováveis para o processamento industrial, potencializa os ganhos ambientais dos SAF, aproximando-os dos objetivos de neutralidade climática estabelecidos pelo Acordo de Paris.

Outro ponto positivo para os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) é que eles aparecem como uma alternativa mais eficiente do que os créditos de carbono na descarbonização por meio da transição energética, na medida em que promovem uma redução direta das emissões ao substituir parcialmente o querosene convencional sem necessidade de grandes modificações na infraestrutura existente. Segundo a ICAO (2024), enquanto os SAFs podem proporcionar reduções significativas no ciclo de vida das emissões de gases de efeito estufa, os créditos de carbono atuam apenas como mecanismos compensatórios, sem alterar a matriz energética da aviação.

Os créditos de carbono ou compensações voluntárias de carbono constituem uma estratégia adotada por companhias aéreas para mitigar seu impacto climático, especialmente enquanto as tecnologias de baixa emissão ainda enfrentam restrições estruturais. Essas compensações, consistem na aquisição de créditos gerados por projetos ambientais que removem ou evitam emissões de GEE, como reflorestamento, conservação de áreas naturais ou energia renovável.

Apesar de seu papel relevante na neutralização das emissões residuais, o uso excessivo das compensações voluntárias tem sido alvo de críticas por parte da sociedade civil e de organismos reguladores, que apontam riscos de “greenwashing”, dupla

contagem e baixa adicionalidade (ICROA, 2022). Assim, cresce a demanda por mecanismos de verificação robustos e por uma maior transparência na origem e eficácia dos créditos adquiridos de maneira a tentar garantir o não comprometimento de sua eficácia na mitigação das emissões.

A ICAO (2024) destaca que a produção de SAF ainda enfrenta barreiras econômicas e estruturais, mas políticas públicas bem direcionadas podem estimular sua adoção em larga escala. Em contrapartida, como supramencionado, os créditos de carbono frequentemente são criticados por permitirem que grandes emissores continuem suas atividades sem implementar mudanças estruturais, o que tende a reduzir seu impacto real na descarbonização do setor aéreo.

Outro aspecto relevante é que os SAFs contribuem para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva sustentável, incentivando investimentos em pesquisa, infraestrutura e inovação tecnológica. A ICAO (2024) aponta que políticas de incentivo, como subsídios e redução de impostos para a produção de SAF, podem acelerar sua implementação e reduzir custos, tornando-os mais competitivos em relação ao querosene fóssil enquanto os créditos de carbono, por serem um mecanismo de compensação, não promovem diretamente o desenvolvimento de tecnologias limpas, limitando sua contribuição para a transição energética da aviação.

Com os esforços globais para descarbonizar a aviação civil, além dos combustíveis sustentáveis e da compensação voluntária de carbono, alternativas tecnológicas vêm sendo estudadas e desenvolvidas com potencial de reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Entre essas soluções, destacam-se os sistemas de propulsão baseados em hidrogênio e as aeronaves elétricas.

O uso do hidrogênio na aviação tem atraído crescente atenção como uma tecnologia com alto potencial de redução de emissões. O hidrogênio pode ser empregado de duas formas principais: como vetor energético em células a combustível, que geram eletricidade por meio de reações químicas, ou como combustível direto para turbinas modificadas. Estudos apontam que o hidrogênio verde — produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis — pode reduzir as emissões em até 75% em comparação aos combustíveis fósseis convencionais (IEA, 2024).

No entanto, desafios como a densidade energética inferior ao querosene de aviação, a necessidade de tanques criogênicos para armazenamento em baixa temperatura, e a ausência de infraestrutura aeroportuária compatível, impõem barreiras significativas à sua ampla adoção, especialmente em voos de longa distância.

Segundo o documento “*Report on the Feasibility of a Long-Term Aspirational Goal (LTAG) for International Civil Aviation CO₂ Emission Reductions*” da ICAO (2022), não se espera que o hidrogênio tenha uma contribuição significativa até 2050 (com apenas 1,9% de participação na energia em 2050), mas isso pode aumentar na década de 2050 e 2060 se tornar-se viável tecnicamente e comercialmente.

As aeronaves elétricas, por sua vez, vêm sendo desenvolvidas principalmente para rotas curtas e de baixa capacidade. Esses modelos utilizam baterias de íon-lítio ou tecnologias emergentes como baterias de estado sólido, permitindo voos com zero emissão local de carbono. Diversas startups e fabricantes consolidados, como a Airbus, têm investido em projetos-piloto e demonstradores de tecnologia.

Contudo, a baixa densidade energética das baterias atuais limita severamente a autonomia das aeronaves, restringindo seu uso a segmentos específicos da aviação regional ou urbana, como o chamado transporte aéreo urbano (UAM – *Urban Air Mobility*). Apesar das limitações, espera-se que o avanço na capacidade de armazenamento energético e na redução do peso das baterias viabilize ganhos operacionais nas próximas décadas.

De modo geral, a viabilidade dessas soluções depende de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, além de marcos regulatórios claros e incentivos públicos. Organismos como a União Europeia, a Agência Internacional de Energia (IEA) e o Fórum Econômico Mundial têm estimulado políticas de inovação para viabilizar o hidrogênio verde e a eletrificação na aviação, reconhecendo que essas tecnologias, embora incipientes, são essenciais para descarbonizar segmentos onde os combustíveis líquidos alternativos ainda não são plenamente eficazes ou disponíveis em escala.

Paralelamente, há um esforço internacional para harmonizar os padrões de certificação de emissões e garantir que os mecanismos de compensação sejam apenas um instrumento complementar às reduções diretas.

Em síntese, conquanto os combustíveis sustentáveis (SAF) sejam atualmente a solução mais viável para a redução das emissões de carbono no setor aéreo, as tecnologias emergentes baseadas em hidrogênio e eletrificação representam alternativas promissoras que poderão desempenhar papel relevante no médio e longo prazo. A complementaridade dessas soluções — aliada a um uso criterioso de compensações voluntárias — será essencial para garantir a transição energética do setor de forma efetiva, justa e ambientalmente íntegra.

O sucesso dessa transição dependerá da articulação entre governos, setor privado, organismos internacionais e sociedade civil, assegurando que os avanços tecnológicos estejam acompanhados de compromissos políticos e financiamento sustentável.

2.3 Iniciativas internacionais relevantes

A aviação civil internacional ocupa papel de destaque nas agendas multilaterais sobre mudanças climáticas e descarbonização da economia. A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), tem liderado os esforços regulatórios e técnicos voltados à mitigação das emissões do setor. Desde a década de 1990, a ICAO integra a pauta ambiental à sua governança, culminando em iniciativas como o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) e a adoção da Meta Aspiracional de Longo Prazo (LTAG) para emissões líquidas zero até 2050, aprovada durante a 41ª Assembleia da ICAO em 2022.

Os governos e a indústria da aviação tomaram essas medidas para garantir que a aviação internacional continue a se desenvolver de maneira sustentável, reconhecendo o papel vital que desempenha no desenvolvimento econômico e social global. A OACI ainda reconheceu a contribuição da aviação internacional para 14 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, incluindo o ODS 13: “Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.” (IATA – Roadmap)

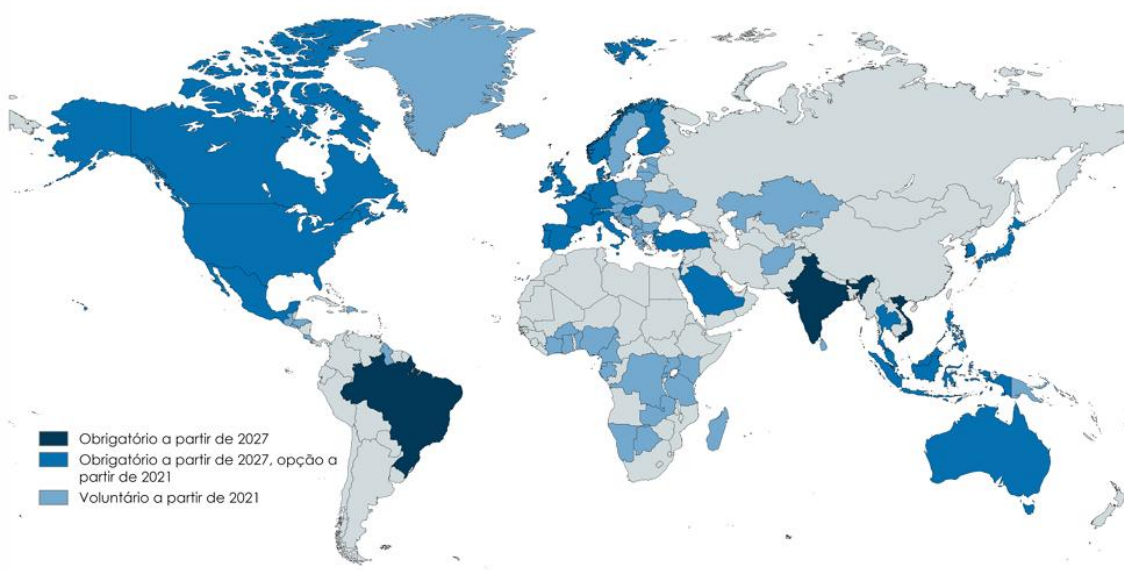
Esses compromissos estão inseridos em um contexto mais amplo de acordos internacionais. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), desde sua criação na ECO-92, tem orientado as ações globais para conter o aquecimento do planeta. A COP3, realizada em Kyoto em 1997, foi um marco inicial ao estabelecer metas de redução de emissões para países desenvolvidos. Posteriormente, a COP15 em Copenhague (2009) e a COP21 em Paris (2015) estabeleceram a estrutura de governança climática baseada no princípio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). A COP26 em Glasgow (2021) reforçou o papel da aviação na transição climática, enquanto a COP28 em Dubai (2023) destacou o SAF como eixo prioritário. Já a COP29, sediada em Bruxelas (2024), reafirmou a importância de

tecnologias de baixo carbono e da coordenação internacional para viabilizar a transição energética no setor aéreo.

No âmbito específico da aviação internacional, o CORSIA é o principal instrumento regulatório multilateral voltado à neutralização das emissões de CO₂. Lançado oficialmente em 2016, o CORSIA visa estabilizar as emissões do setor nos níveis de 2019 por meio de compensações de carbono. Essa decisão histórica marcou a primeira vez que uma indústria concordou com uma medida baseada no mercado global (MBM) para lidar com seu impacto climático.

O mecanismo foi estruturado em três fases distintas: a fase piloto (2021–2023), de caráter voluntário; a fase voluntária propriamente dita (2024–2026), que mantém a adesão facultativa dos Estados; e a fase obrigatória (2027–2035), na qual a maioria dos países – com exceção de nações de baixa renda e pequenas emissoras – deverá participar compulsoriamente.

Figura 1. Países participantes do CORSIA (2023)



Fonte: ICAO, 2023.

Em 2025, 129 Estados já aderiram voluntariamente, cobrindo aproximadamente 60% das emissões internacionais, com a expectativa de alcançar 85% até 2027 (ICAO, 2024). As metas do CORSIA não se estruturam em reduções absolutas ano a ano, mas sim na compensação do crescimento das emissões acima da linha de base, estabelecida inicialmente como a média de 2019–2020, posteriormente ajustada apenas para 2019 em decorrência dos efeitos da pandemia Covid-19.

As companhias aéreas participantes devem monitorar, relatar e verificar suas emissões de CO₂, adquirindo créditos de carbono certificados para compensar os excedentes. A ICAO estabelece critérios rigorosos de elegibilidade tanto para os projetos de compensação quanto para os combustíveis alternativos aceitos no escopo do programa. Em 2025, o número de Estados voluntários no CORSIA atingiu 129, representando cerca de 60% das emissões internacionais atualmente cobertas pelo mecanismo, com expectativa de expansão para 85% a partir de 2027 (ICAO, 2024).

O CORSIA também promove o uso de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) como forma de redução direta de emissões, e não apenas compensatória. A ICAO desenvolveu metodologias para mensuração das reduções líquidas de carbono associadas ao uso de SAF, considerando o ciclo de vida das emissões. Além disso, o esquema incentiva o uso de projetos certificados de compensação de carbono de alta integridade ambiental, estabelecendo critérios ambientais rigorosos, como adicionalidade, permanência e ausência de dupla contagem. Com isso, o CORSIA se consolida como o primeiro mecanismo de mercado global voltado a um setor específico da economia.

No âmbito da ICAO, há um grupo de trabalho chamado LTAG (*Long Term Aspiration Goal*), responsável por desenvolver relatórios de análise com “Objetivo de Aspiração Global de Longo Prazo” para aviação, trata-se, portanto, de uma gama de estudos de viabilidade, relatórios que apresentam os antecedentes, metodologias, resultados e interpretações desenvolvidos pelo CAEP (Comitê de Proteção do Ambiente da Aviação).

O LTAG não atribui obrigações ou compromissos específicos na forma de metas de redução de emissões a Estados individuais. Em vez disso, reconhece que as circunstâncias especiais de cada país e respectivas capacidades (por exemplo, o nível de desenvolvimento, maturidade dos mercados de aviação, crescimento sustentável de sua aviação internacional, transição justa e prioridades nacionais de desenvolvimento do transporte aéreo) informarão a capacidade de cada Estado de contribuir para o LTAG dentro de seu próprio prazo nacional. Cada país contribuirá para a consecução do objetivo de forma social, econômica e ambientalmente sustentável de acordo com as suas circunstâncias nacionais.

Complementarmente, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), que representa cerca de 290 companhias aéreas responsáveis por mais de 80% do tráfego

aéreo global, estabeleceu a iniciativa *Fly Net Zero*. Anunciada durante sua 77ª Assembleia Geral em 2021, essa iniciativa formaliza o compromisso da indústria em alcançar emissões líquidas zero até 2050, alinhando-se às metas do Acordo de Paris. A estratégia proposta baseia-se majoritariamente na ampliação do uso de SAF (65% da redução projetada), complementada por novas tecnologias de propulsão (13%), captura e armazenamento de carbono (11%) e melhorias operacionais (3%) (IATA, 2021).

A IATA atua como agente articulador entre o setor privado e as entidades reguladoras internacionais. Suas ações incluem a definição de metas técnicas, a proposição de diretrizes setoriais, a coordenação com fabricantes e operadores aeroportuários, e a defesa de políticas públicas que incentivem a pesquisa, produção e distribuição de SAF em escala competitiva.

Em parceria com a ICAO, a IATA busca harmonizar padrões regulatórios e garantir que os compromissos voluntários do setor se traduzam em avanços concretos. A atuação da organização também se estende aos fóruns do G20 e às negociações climáticas da UNFCCC, reiterando que a transformação ecológica da aviação requer esforço coordenado de todos os atores da cadeia global de valor.

Assim, a articulação conduzida pela IATA e suas parcerias internacionais reforça a viabilidade da transformação ecológica do setor aéreo, desde que acompanhada por ações concretas e suporte regulatório robusto.

2.4 O posicionamento das companhias aéreas com maior receita internacional e das companhias aéreas atuantes no Brasil frente a transição energética.

A discussão sobre as políticas de compensação ambiental no setor aéreo revela diferentes abordagens entre as principais companhias aéreas globais e brasileiras. A Delta Air Lines, por exemplo, embora tenha aderido ao compromisso global da IATA *Fly Net Zero* e ao esquema CORSIA, vem gradualmente reduzindo a dependência de compensações tradicionais, priorizando investimentos em renovação de frota, eficiência operacional e no uso de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).

Em seus relatórios recentes, a empresa reconhece a necessidade de alinhamento com o *Long-Term Aspirational Goal* (LTAG) estabelecido pela Organização da Aviação

Civil Internacional (OACI), de neutralidade até 2050, mas enfatiza que créditos de carbono devem ter integridade robusta e caráter complementar (DELTA AIR LINES, 2024).

A United Airlines adota postura semelhante ao afirmar explicitamente que pretende atingir a neutralidade em 2050 sem recorrer a compensações tradicionais, priorizando o uso de SAF e a remoção tecnológica de carbono, como captura direta do ar. Ainda assim, mantém adesão ao CORSIA e ao *Fly Net Zero*, reconhecendo a importância de mecanismos multilaterais. Essa ênfase em reduções reais conecta-se diretamente à preocupação com integridade ambiental, afastando a companhia da dependência de créditos de carbono de baixa qualidade (UNITED AIRLINES, 2024).

Já a American Airlines apresenta uma posição mais híbrida. A empresa destaca sua participação no CORSIA e sinaliza a intenção de adquirir créditos de carbono elegíveis durante a primeira fase de implementação. Simultaneamente, oferece programas voluntários de compensação ao cliente, por meio de parcerias com organizações como a *Cool Effect*, além de expandir o uso de SAF. Ao alinhar-se ao LTAG e ao *Fly Net Zero*, a companhia reforça sua estratégia de combinar instrumentos regulatórios e voluntários, evidenciando a coexistência entre compensação e investimentos em descarbonização direta (AMERICAN AIRLINES, 2024).

Na Europa, o Grupo Lufthansa adota política fortemente voltada para a integração de mecanismos de mercado com produtos voltados ao consumidor. O programa *Green Fares* combina o uso de SAF com a compensação via créditos de carbono provenientes de projetos de conservação e energia renovável. Além de cumprir as exigências do CORSIA, o grupo reforça seu alinhamento ao LTAG e ao *Fly Net Zero*, destacando a relevância de soluções de mercado de carbono para atender clientes corporativos e passageiros conscientes (LUFTHANSA GROUP, 2024).

De forma semelhante, o Grupo Air France-KLM utiliza uma combinação de SAF, precificação interna de carbono e compensação em projetos ambientais. Seus relatórios indicam a transição de programas puramente compensatórios para modelos mais baseados em SAF e “*book & claim*”, mantendo, entretanto, a utilização de créditos de carbono como instrumento complementar. A empresa demonstra comprometimento com o LTAG e participa ativamente das iniciativas coordenadas pela IATA, reforçando a relevância da adesão ao *Fly Net Zero* (AIR FRANCE-KLM, 2024).

Na América Latina, a LATAM Airlines estabelece metas ambiciosas, como a neutralidade em 2050 e a compensação de 50% das emissões domésticas até 2030. Seu programa “1+1: Compensar para Conservar” busca integrar clientes corporativos e de carga em estratégias de compensação, sempre ressaltando que essas medidas não substituem a redução direta. O grupo, alinhado ao CORSIA e ao LTAG, evidencia um papel de liderança regional ao combinar medidas regulatórias, voluntárias e compromissos de conservação (LATAM AIRLINES GROUP, 2024).

Entre as brasileiras, a Azul Linhas Aéreas aposta em um modelo de engajamento voluntário com clientes, através do programa “Jornada para a Neutralidade”, além de lançar em 2025 uma unidade de negócios para intermediação de créditos de carbono. Essa diversificação mostra alinhamento ao CORSIA e, em perspectiva, ao mercado regulado de carbono brasileiro, além de contribuir para os compromissos globais de neutralidade (AZUL, 2025).

Já a Gol Linhas Aéreas mantém iniciativas voluntárias de compensação de clientes, como o programa “Meu Voo Compensa”, e avança no uso do modelo “*book & claim*” de SAF, em parceria com fornecedores internacionais. A companhia integra o CORSIA e participa das discussões do *Fly Net Zero*, demonstrando que a compensação, embora ainda presente, tende a ser cada vez mais substituída por SAF e instrumentos inovadores (GOL, 2025).

Portanto, observa-se que todas as companhias analisadas compartilham adesão aos compromissos globais de neutralidade – *Fly Net Zero*, LTAG da OACI e CORSIA – mas divergem quanto à ênfase em compensações tradicionais. Enquanto empresas como Delta e United buscam se distanciar de offsets convencionais, outras, como Lufthansa, Air France-KLM e Gol, ainda os utilizam em combinação com SAF e programas de engajamento. LATAM e Azul, por sua vez, apresentam soluções regionais que combinam conservação ambiental e inovação no mercado voluntário de carbono. Abaixo segue uma tabela resumo de posicionamento dessas companhias aéreas frente aos desafios de descarbonização do setor.

Tabela 2. Tabela de resumo comparativo das companhias aéreas

Companhia	CORSIA	Fly Net Zero	LTAG (OACI)	Uso de SAF	Políticas compensatórias / offsets	Destaque regional
Delta Air Lines	Sim	Sim	Alinhada	Expansão progressiva	Reduz uso de offsets, foco em SAF e eficiência	EUA
United Airlines	Sim	Sim	Alinhada	Forte prioridade	Declara não usar offsets tradicionais; aposta em remoção e SAF	EUA
American Airlines	Sim	Sim	Alinhada	Contratos de SAF	Usa créditos CORSIA + offsets voluntários via Cool Effect	EUA
Lufthansa Group	Sim	Sim	Alinhada	Green Fares (com SAF)	Compensação + SAF em bilhetes, offsets para clientes	Europa
Air France-KLM	Sim	Sim	Alinhada	Book & claim SAF	Compensação em projetos ambientais + SAF	Europa
LATAM Airlines	Sim	Sim	Alinhada	Planos em expansão	Programa “1+1: Compensar para Conservar” + metas domésticas	América do Sul
Azul	Sim	Sim	Alinhada	Parcerias em desenvolvimento	Plataforma voluntária + unidade de negócios em créditos	Brasil
Gol	Sim	Sim	Alinhada	Book & claim SAF	Programa “Meu Voo Compensa” + offsets voluntários	Brasil

Fonte: Elaboração própria.

A análise comparativa demonstra que, embora exista convergência estratégica entre as companhias aéreas no que se refere aos compromissos internacionais de neutralidade climática, persistem diferenças relevantes quanto aos instrumentos utilizados para alcançar tais metas. Observa-se que empresas com maior capacidade financeira e

tecnológica tendem a priorizar soluções estruturais, como investimentos em combustíveis sustentáveis de aviação e tecnologias de remoção de carbono, reduzindo gradualmente a dependência de mecanismos compensatórios tradicionais.

Por outro lado, companhias que operam em mercados emergentes ou com menor disponibilidade de SAF frequentemente mantêm maior dependência de programas voluntários de compensação, evidenciando a influência das assimetrias regionais no ritmo da transição energética.

Além disso, a expansão do SAF como principal vetor de descarbonização do transporte aéreo enfrenta desafios logísticos e operacionais expressivos. A rastreabilidade da utilização do combustível, a padronização de certificações ambientais e a necessidade de comprovação detalhada das reduções de emissões tornam a implementação dessas soluções altamente complexa. Estudos recentes indicam que a fragmentação de dados entre fornecedores, operadores e reguladores pode comprometer a eficiência dos programas de descarbonização e elevar custos administrativos, exigindo o desenvolvimento de sistemas integrados de monitoramento e verificação ambiental. (SITA, 2025)

Outro fator crítico refere-se à crescente complexidade do ambiente regulatório internacional. A coexistência de instrumentos multilaterais, como o CORSIA, com políticas regionais de incentivo ao SAF e mecanismos nacionais de precificação de carbono, cria um cenário normativo dinâmico e, por vezes, fragmentado. Esse contexto exige das companhias aéreas elevado grau de capacidade adaptativa e planejamento estratégico global, uma vez que diferentes exigências regulatórias podem gerar impactos diretos na competitividade, na alocação de rotas e na estrutura de custos operacionais. (SITA, 2025)

Por fim, verifica-se que o avanço da transição energética no setor aéreo depende não apenas da adoção de tecnologias limpas, mas também de transformações organizacionais e institucionais profundas. A integração entre áreas operacionais, financeiras e estratégicas emerge como elemento essencial para garantir a viabilidade econômica e a credibilidade ambiental das metas climáticas corporativas. (SITA, 2025)

Nesse sentido, as companhias que conseguem estruturar modelos de governança voltados à sustentabilidade tendem a apresentar maior capacidade de adaptação às exigências regulatórias e às expectativas sociais, consolidando vantagem competitiva em

um cenário global de crescente pressão por descarbonização do transporte aéreo. (SITA, 2025)

3. O PROBIOQAV E AS PERSPECTIVAS BRASILEIRAS PARA O SAF

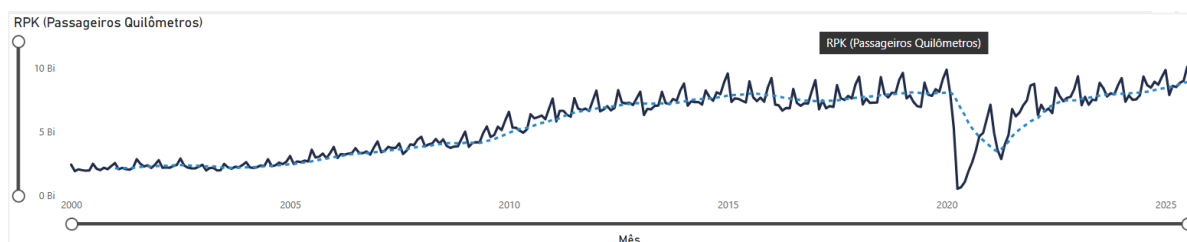
A aviação civil brasileira é um dos setores mais desafiadores para se descarbonizar, desempenhando um papel importante nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). O consumo de querosene de aviação (QAV) é um dos principais responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes do setor. De acordo com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil (ANAC, 2019), no Brasil, a maior parte do consumo de combustível ocorre durante a fase de cruzeiro dos voos, representando cerca de 85,7% do total, enquanto as operações de pouso e decolagem (o chamado ciclo LTO) contribuem com aproximadamente 12,5%.

A crescente demanda pelo transporte aéreo no Brasil, impulsionada pelo aumento do número de passageiros e pela expansão da malha aérea, tem resultado em uma elevação contínua das emissões, exigindo medidas de mitigação para minimizar os impactos ambientais.

A série histórica da demanda por voos domésticos no Brasil, medida em RPK (*Revenue Passenger-Kilometers*), representa o produto entre o número de passageiros pagantes e a respectiva distância percorrida. Esse indicador é fundamental para avaliar o desempenho do transporte aéreo doméstico, pois reflete diretamente o volume de tráfego efetivamente transportado. A ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) é responsável pelo cálculo e a divulgação mensal dessa métrica.

Desde o início da série histórica, que vem a partir do ano 2000, até o presente, observam-se ciclos de expansão e retração na demanda doméstica. O indicador RPK tem sido utilizado para identificar padrões sazonais e tendências de longa duração.

Segundo dados da ANAC (2025b), o RPK doméstico brasileiro aumentou quase quatro vezes, saindo de 25.206.753.665 bilhões em 2000 para 100.560.646.557 bilhões em 2024. O gráfico a seguir mostra essa evolução, a quebra apresentada no ano de 2020 é reflexo da retração causada pela pandemia Covid-19. É importante mencionar a rápida retomada com a recuperação do setor pós-pandemia.

Gráfico 9. Série histórica RPK doméstico.

Fonte: Relatório de Demanda e Oferta, ANAC (2025b).

Com esse aumento no RPK, há também um aumento das emissões de poluentes pela aviação civil brasileira na atmosfera.

Além do CO₂, são emitidos poluentes como óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV), que afetam diretamente as populações próximas aos aeroportos e contribuem para a degradação ambiental. No Brasil, aeroportos como os de Guarulhos (SP), Brasília (DF) e Galeão (RJ) figuram entre os principais emissores desses poluentes, refletindo o volume elevado de movimentações aéreas nesses locais (ANAC, 2019). A substituição de aeronaves antigas por modelos mais eficientes e a adoção de biocombustíveis são alternativas viáveis para reduzir essas emissões.

Entre as causas do aumento das emissões na aviação civil brasileira, destaca-se a expansão do setor e o crescimento do tráfego aéreo. Dados da ANAC (2019) indicam que, entre 2009 e 2018, o transporte de passageiros cresceu 69%, impulsionando o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de GEE. Apesar da melhora na eficiência operacional das companhias aéreas, como o aumento da taxa de aproveitamento de voos, a dependência do QAV ainda é um desafio para a redução das emissões. Estratégias como a implementação de políticas públicas voltadas para a regulação das emissões, o incentivo à pesquisa em combustíveis alternativos, como os SAF, e a adoção de tecnologias limpas são fundamentais para mitigar o impacto do setor no aquecimento global.

Diante desse cenário, iniciativas como a formulação de inventários de emissões e o compromisso com acordos internacionais, como o esquema de compensação e redução de carbono para a aviação internacional (CORSIA) e o *Fly Net Zero*, são essenciais para um desenvolvimento sustentável do setor (ICAO, 2019). O Brasil tem avançado na elaboração de estudos para avaliar e controlar as emissões do setor aéreo, porém ainda há desafios quanto à implementação efetiva de medidas mitigadoras.

A modernização da frota, o aprimoramento da gestão do tráfego aéreo e a redução do consumo de combustíveis fósseis podem contribuir significativamente para a redução das emissões da aviação civil e para a mitigação dos impactos climáticos no país. Os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) representam uma resposta estratégica à crise ambiental do setor aéreo, considerando a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) emitidas em toda a operação de voos.

Importante reafirmar que a aviação civil é um dos segmentos mais desafiadores no processo de descarbonização, devido à sua alta dependência de combustíveis líquidos, o risco que envolve a segurança da sua atividade e às dificuldades tecnológicas para eletrificação. Nesse contexto, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) surge como uma iniciativa essencial para fomentar a produção e o uso de SAF no país, alinhando-se às metas internacionais de redução de emissões (ProQR, 2021).

3.1 O Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV)

A intensificação das políticas globais de mitigação das mudanças climáticas tem impulsionado a formulação de instrumentos regulatórios voltados à redução das emissões de gases de efeito estufa em setores de difícil descarbonização, como a aviação civil. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF) emergem como uma das principais alternativas de médio e longo prazo para a redução das emissões do transporte aéreo, sendo amplamente reconhecidos por organismos internacionais como a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA).

No Brasil, a institucionalização dessa agenda ocorre com a promulgação da Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, que institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV). O programa estabelece as bases para o desenvolvimento de um mercado doméstico de SAF, com o objetivo de fomentar sua produção, comercialização e uso, ao mesmo tempo em que alinha o país às metas internacionais de descarbonização da aviação (BRASIL, 2024).

Do ponto de vista de seu desenho normativo, o ProBioQAV introduz um sistema de metas graduais obrigatórias de incorporação de SAF ao querosene de aviação (QAV),

aplicáveis às distribuidoras de combustível de aviação. A base de cálculo dessas obrigações corresponde ao volume total de combustível de aviação comercializado no mercado doméstico pelas distribuidoras, sobre o qual incidem os percentuais mínimos anuais de mistura, devendo o cumprimento das metas ser comprovado por meio de mecanismos de certificação e rastreabilidade definidos em regulamentação específica (BRASIL, 2024).

Essas metas são definidas em percentuais mínimos anuais de incorporação, estabelecendo uma trajetória progressiva de expansão da demanda ao longo do tempo. Conforme disposto na legislação, a obrigatoriedade tem início em 2027, com percentual mínimo de 1% de SAF, elevando-se para 2% em 2028, 3% em 2029, 4% em 2030 e 5% em 2031. O cronograma segue com 6% em 2032, 7% em 2033, 8% em 2034, 9% em 2035, até atingir 10% em 2037, consolidando um horizonte regulatório de longo prazo para o setor (BRASIL, 2024).

A definição dessas metas escalonadas está associada ao princípio da razoabilidade administrativa, na medida em que busca compatibilizar a progressividade da obrigação regulatória com a capacidade de adaptação dos agentes econômicos e o desenvolvimento gradual da cadeia produtiva. Ao evitar imposições abruptas, o escalonamento permite a internalização progressiva dos custos de transição, reduzindo riscos de descontinuidade no abastecimento e de impactos econômicos desproporcionais sobre o setor de aviação.

Além das metas de incorporação, o ProBioQAV estabelece diretrizes para a elegibilidade dos combustíveis considerados como SAF, exigindo que estes atendam a critérios de sustentabilidade e de redução de emissões ao longo de seu ciclo de vida. A lei prevê a adoção de metodologias de mensuração compatíveis com padrões internacionais, de forma a assegurar que o combustível utilizado contribua efetivamente para a mitigação das emissões e possa ser reconhecido em mercados externos (BRASIL, 2024).

Nesse contexto, destaca-se a previsão de implementação de sistemas de monitoramento, reporte e verificação (MRV), que deverão garantir a rastreabilidade do combustível desde sua produção até o consumo final. A metodologia de MRV, conforme estabelecida na lei, deverá considerar parâmetros de intensidade de carbono, origem das matérias-primas, processos produtivos e critérios de adicionalidade ambiental, sendo posteriormente detalhada por atos infralegais. Esses sistemas são fundamentais para

evitar dupla contagem de emissões e permitir a compatibilização do SAF brasileiro com mecanismos internacionais, como o CORSIA.

No que se refere à governança institucional, o ProBioQAV envolve múltiplos órgãos da administração pública federal. O Ministério de Minas e Energia (MME) exerce papel central na definição das diretrizes estratégicas do programa, enquanto a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável pela regulação da produção, especificação e comercialização dos combustíveis. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por sua vez, atua na definição dos requisitos operacionais e de segurança associados ao uso do SAF na aviação (ANAC, 2024; MME, 2025).

Adicionalmente, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) desempenha papel relevante na coordenação das diretrizes de política energética associadas ao programa, podendo estabelecer orientações estratégicas e revisar parâmetros relacionados à implementação das metas, à luz da evolução do mercado e das condições econômicas e tecnológicas do setor. A atuação do CNPE contribui para a articulação entre o ProBioQAV e outras políticas energéticas nacionais, reforçando a integração do SAF à agenda mais ampla de transição energética.

Do ponto de vista econômico, a implementação do ProBioQAV ocorre em um contexto em que o custo do SAF permanece superior ao do querosene de aviação fóssil (Jet A-1). Estimativas internacionais indicam que o SAF pode apresentar custo entre duas e três vezes superior ao combustível convencional, a depender da rota tecnológica e das condições de mercado. Esse diferencial de custo constitui um elemento relevante na estruturação do programa, justificando a adoção de metas progressivas e a previsão de instrumentos complementares de política pública ao longo do tempo.

A implementação do programa também se articula com outras iniciativas, como o RenovaBio, que estabelece metas de descarbonização no setor de combustíveis e cria instrumentos de mercado para valorização de combustíveis de menor intensidade de carbono. Embora possuam escopos distintos, essas políticas compartilham objetivos convergentes no que se refere à promoção da transição energética e à redução das emissões de gases de efeito estufa.

No âmbito da coordenação institucional e do desenvolvimento técnico do setor, destacam-se iniciativas como o programa Conexão SAF da ANAC, que reúne grupos de trabalho (GTs) compostos por representantes do governo, da indústria e da academia.

Esses grupos abordam temas estratégicos como rotas tecnológicas, certificação, logística, financiamento e inserção internacional, contribuindo para a consolidação de uma agenda técnica estruturada para o desenvolvimento do SAF no Brasil.

Os relatórios e discussões conduzidos nesses grupos evidenciam a complexidade do processo de implementação do SAF, que envolve múltiplas dimensões interdependentes e demanda articulação entre diferentes agentes ao longo da cadeia produtiva. Nesse sentido, o ProBioQAV pode ser compreendido como um marco institucional que estabelece diretrizes, metas e instrumentos iniciais para o desenvolvimento do mercado, ao mesmo tempo em que prevê a necessidade de regulamentações complementares e de aprimoramento contínuo dos mecanismos de governança.

Dessa forma, o programa não apenas introduz o SAF na matriz regulatória brasileira, mas também define as bases para a construção de uma nova cadeia produtiva, alinhada às exigências contemporâneas de sustentabilidade no setor de aviação. A compreensão do ProBioQAV como instrumento de política pública demanda, em complemento à análise normativa, a avaliação das condições tecnológicas que sustentam sua implementação.

A viabilidade das metas estabelecidas depende diretamente do estágio de desenvolvimento das rotas produtivas de SAF, bem como de sua capacidade de expansão em bases economicamente e ambientalmente sustentáveis. Assim, a seção seguinte examina, em maior detalhe, as bases tecnológicas atualmente disponíveis no país e, posteriormente, a forma como esses condicionantes são percebidos pelos atores diretamente envolvidos no setor.

3.2 As rotas tecnológicas de SAF desenvolvidas no Brasil e seus níveis de prontidão

A viabilidade do ProBioQAV depende não apenas da existência de metas legais, mas também da disponibilidade de rotas tecnológicas capazes de sustentar a expansão da oferta em bases economicamente e ambientalmente viáveis. Nesse sentido, a compreensão do estágio de maturidade das principais rotas de produção de SAF no Brasil é fundamental para avaliar em que medida o país está tecnicamente preparado para responder às exigências regulatórias já estabelecidas.

As rotas tecnológicas definidas até o momento para a produção de bioquerosene de aviação, aprovadas pela resolução 856/2021 da ANP, no plano nacional e pela ASTM D7566, internacionalmente, incluem:

Tabela 3. Tabela de rotas tecnológicas para SAF

Principais matérias-primas	Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM D7566 e ANP Res. 856/2021		Mistura máxima ¹
Triplícídeos Oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais	HEFA	Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados	50%
	HC-HEFA	Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados	10%
	CHJ	Querosene de hidrotermólise catalítica	50%
Biomassa lignocelulósica Eucalipto, pinheiro, capim elefante, bagaço de cana	SPK-FT	Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch	50%
	SPK-A	Querosene parafínico sintetizado com aromáticos	50%
	SIP	Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados	10%
Açúcares e amidos Cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca	ATJ	Querosene parafínico sintetizado por álcool	50%

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética. (2024)

As principais matérias-primas exploradas no Brasil são divididas em três grandes grupos: triglicérides, biomassa lignocelulósica e açúcares e amidos. Observa-se uma escala de nível de prontidão tecnológica (TRL) de 1 a 9, em inglês, *Technology Readiness Level*. Trata-se de um método que avalia o grau de maturidade de uma tecnologia ao longo das etapas de pesquisa, desenvolvimento, validação, produção e comercialização. Composta por nove níveis, a escala classifica a prontidão tecnológica desde a formulação dos princípios básicos até a comprovação em operações bem-sucedidas. (Biominas, 2021)

Os primeiros níveis (TRL 1 a TRL 3) correspondem à fase inicial de desenvolvimento, abrangendo desde a observação de princípios científicos até a validação conceitual experimental. Nos níveis intermediários (TRL 4 a TRL 6), ocorre a validação e demonstração da tecnologia em ambientes laboratoriais ou simulados. Já os níveis mais avançados (TRL 7 a TRL 9) envolvem a aplicação da tecnologia em condições reais, culminando na sua implementação e operação bem-sucedida. Esse modelo auxilia na gestão do desenvolvimento tecnológico, garantindo uma avaliação estruturada da evolução e aplicabilidade das inovações. (Biominas, 2021)

Atualmente, apenas o HEFA está no nível 9, sendo uma tecnologia madura e comercialmente disponível que pode ser misturada aos combustíveis fósseis em até 50%. O HC-HEFA, uma variação do HEFA que utiliza hidrocarbonetos bioderivados, está na fase 5, sendo testado em escala piloto, com percentual de mistura de 10% (EPE, 2024).

O CHJ, também da classe dos triglicerídeos e utilizando as mesmas matérias-primas que a rota HEFA, encontra-se na fase 6, demonstrada em ambiente relevante. Esta tecnologia consome menos hidrogênio comparada ao HEFA, mas necessita de maiores condições de pressão e temperatura para operar na faixa de querosene de aviação (EPE, 2024).

Os combustíveis provenientes da biomassa lignocelulósica, como SPK-FT e SPK/A, envolvem a conversão de biomassa vegetal em combustíveis, passando por fases de pré-tratamento que geram gás de síntese. Este gás é exposto a processos químicos que aumentam o rendimento da fração de querosene, adequando-os às especificações técnicas do SAF. O SPK-FT está no nível 7 de TRL, enquanto o SPK/A, que inclui a adição de aromáticos no processo, está no nível 5 (EPE, 2024).

A rota SIP, proveniente da fermentação de açúcares com leveduras modificadas, resulta em farnesano, um combustível que pode ser misturado em até 10% ao querosene fóssil. Esta rota encontra-se entre os níveis 5 e 7 de prontidão tecnológica, variando entre protótipo e demonstração em ambiente operacional, ou seja, a tecnologia é testada em escala próxima à real dentro do ambiente operacional previsto. Esse estágio busca validar o desempenho do sistema completo, reduzindo riscos antes da implementação definitiva. (EPE, 2024).

A rota tecnológica ATJ-SPK, derivada de açúcares e amidos, divide-se em produção de bio-álcool e síntese de hidrocarbonetos médios. Com 50% de mistura e nível de prontidão tecnológica 7, esta tecnologia já é demonstrada em ambiente operacional, portanto, significa dizer que ela é plenamente integrada e operante, sendo utilizada com sucesso em missões reais. Esse nível marca a conclusão do desenvolvimento tecnológico, permitindo eventuais otimizações para aprimoramento contínuo. (EPE, 2024).

Todas essas tecnologias apresentam oportunidades e desafios em seu desenvolvimento, implicando custos e esforço tecnológico. Tais custos podem variar conforme os ganhos de produtividade por economia de escala e escopo. Segundo a EPE: "A existência de um mercado de carbono consolidado pode fomentar a produção de SAF.

Caso o benefício ambiental possa ser quantificado, poderá haver aumento da competitividade do combustível renovável" (EPE, 2024).

Adicionalmente, uma conquista recente e importante no desenvolvimento do SAF brasileiro foi a aprovação, pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), da recomendação técnica que reconhece o etanol de milho-safrinha brasileiro como matéria-prima sustentável para a produção de combustível sustentável de aviação (SAF), que marca um avanço significativo para o Brasil. A decisão, tomada pelo Conselho da ICAO após a 13.^a reunião do Comitê de Proteção Ambiental da Aviação (CAEP), reconheceu a prática agrícola de múltiplas culturas — cultivo de duas ou mais safras por ano sobre a mesma área, sem expansão de fronteiras agrícolas nem conversão de uso da terra — como compatível com os requisitos de rastreabilidade e sustentabilidade exigidos para o SAF. (ANAC, 2025d)

Com esse reconhecimento, o Brasil reforça sua posição como potencial fornecedor global de matérias-primas certificadas para o SAF, fortalecendo sua cadeia produtiva de segunda safra de milho e a tecnologia de conversão “*Ethanol-to-Jet*”. Tal reconhecimento internacional valida os valores de intensidade de carbono daquela rota tecnológica e reduz barreiras comerciais e regulatórias para o mercado de exportação de SAF brasileiro — aspecto estratégico que alinha a política nacional à meta global de emissões líquidas zero até 2050 (LTAG) no setor aéreo. (ANAC, 2025d)

Não obstante, a identificação dessas rotas como tecnicamente promissoras no plano institucional e documental não implica, necessariamente, sua viabilização imediata em escala comercial. A concretização dessa trajetória depende da articulação de múltiplas dimensões — econômicas, regulatórias, logísticas e tecnológicas — cuja efetividade está diretamente relacionada à forma como são percebidas e operacionalizadas pelos diferentes atores envolvidos na cadeia do SAF.

Nesse sentido, torna-se fundamental avançar da análise normativa e tecnológica para a investigação empírica, de modo a compreender como produtores, reguladores e usuários estratégicos avaliam as condições reais de implementação dessas rotas no contexto brasileiro. É a partir dessa perspectiva que se justifica a análise apresentada na seção seguinte.

3.3 Evidência empírica: percepções da cadeia do SAF

As seções anteriores permitiram situar o leitor quanto ao marco regulatório do ProBioQAV e ao estágio de desenvolvimento das principais rotas tecnológicas de SAF no Brasil. A partir deste ponto, a análise desloca-se para a evidência empírica produzida pela pesquisa de campo, com o objetivo de identificar como os diferentes atores da cadeia produtiva percebem os condicionantes da implementação do SAF no país.

Mais do que medir concordâncias e discordâncias, a pesquisa permite observar convergências, assimetrias e restrições percebidas entre reguladores, produtores e usuários estratégicos. A análise documental e institucional anteriormente desenvolvida não desaparece; ela passa a ser mobilizada, ao longo desta seção e das subsequentes, como base explicativa para os padrões revelados pelos dados primários.

Importante frisar que o projeto/questionário usado na dissertação passou primeiramente por uma avaliação minuciosa do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP-UFU) da Universidade Federal de Uberlândia, cujo parecer completo se encontra em anexo.

3.3.1 Perfil da amostra e credibilidade da evidência empírica

A pesquisa de campo contou com 53 respostas válidas, distribuídas entre três grandes grupos da cadeia produtiva do SAF: 27 reguladores e formuladores de política (50,9%), 19 produtores/distribuidores de SAF (35,8%) e 7 usuários estratégicos, como companhias aéreas e fabricantes (13,2%). Essa composição garante diversidade de perspectivas e permite comparar percepções entre os principais elos envolvidos na formulação, oferta e demanda do combustível.

Tabela 4- Distribuição da amostra por elo de atores (n=53)

Grupo	N	%
Reguladores e formuladores de política	27	50.9
Produtores/distribuidores de SAF	19	35.8
Usuários estratégicos (companhias aéreas e fabricantes)	7	13.2

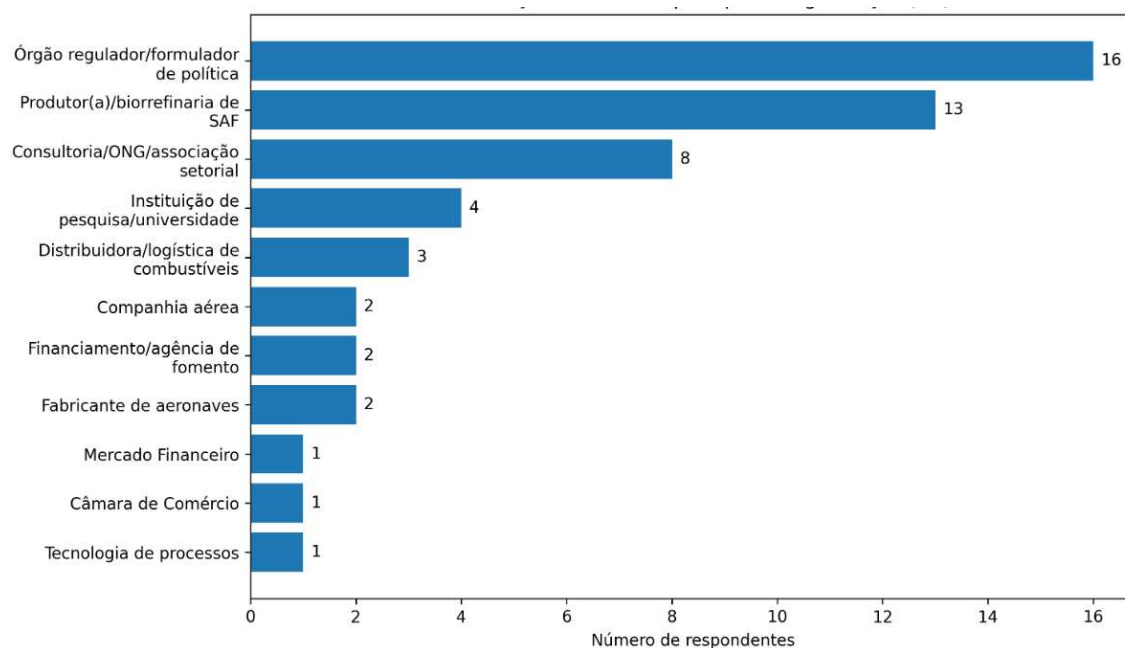
Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo

A composição da amostra mostra predominância de respondentes ligados ao setor público regulatório e à formulação de políticas, seguida por participação expressiva de produtores e distribuidores. Embora o grupo de usuários estratégicos seja numericamente menor, sua presença é analiticamente relevante, uma vez que ele representa o elo mais diretamente exposto aos custos operacionais, à segurança de abastecimento e aos impactos competitivos da adoção do SAF.

Para reforçar a credibilidade da evidência empírica, é importante qualificar também o perfil institucional dos participantes nas perguntas demográficas (D). Considerando a variável D1 – *tipo de organização em que o respondente atua*, observa-se que a amostra é composta por perfis inseridos em organizações diretamente relacionadas ao debate sobre o SAF.

Há predominância de respondentes vinculados a órgãos reguladores/formuladores de política (16) e produtores/biorrefinarias de SAF (13), mas também aparecem consultorias, ONGs e associações setoriais (8), instituições de pesquisa/universidades (4), distribuidoras/logística de combustíveis (3), além de representantes de companhias aéreas (2), fabricantes de aeronaves (2), agências de fomento/financiamento (2), entre outros segmentos.

Gráfico 10 - Distribuição da amostra segundo o tipo de organização em que atua (D1)



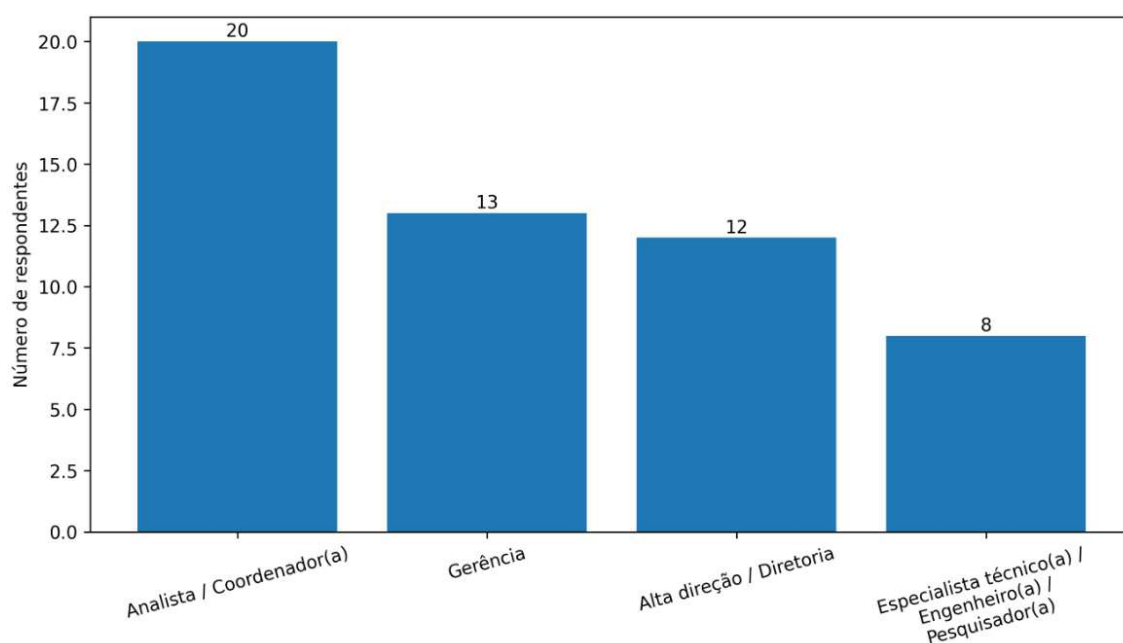
Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo

Esse recorte institucional é relevante porque mostra que a pesquisa não se restringe a um único ponto de vista. Ao contrário, ela incorpora percepções de atores posicionados em diferentes lugares da cadeia e do desenvolvimento da política pública além de abranger distintos graus de proximidade em relação ao problema — desde o desenho regulatório até a operação, o investimento, a pesquisa e a inserção comercial.

Embora a pesquisa seja de caráter sigiloso no que se refere a identificação do conteúdo das respostas, houve uma manifestação voluntária quanto à participação de atores com grande expertise na área, vindos de instituições centrais no tema, como ANP, MME, ANAC, MDIC, Petrobrás, Geo Biogás, Embraer entre outras.

A variável D2 – *função/cargo* também reforça a consistência da amostra. Observa-se predominância de Analistas/Coordenadores(as) (20), seguida por Gerência (13), Alta direção/Diretoria (12) e Especialistas técnicos, Engenheiros(as) ou Pesquisadores(as) (8).

Gráfico 11- Distribuição da amostra segundo função/cargo (D2)

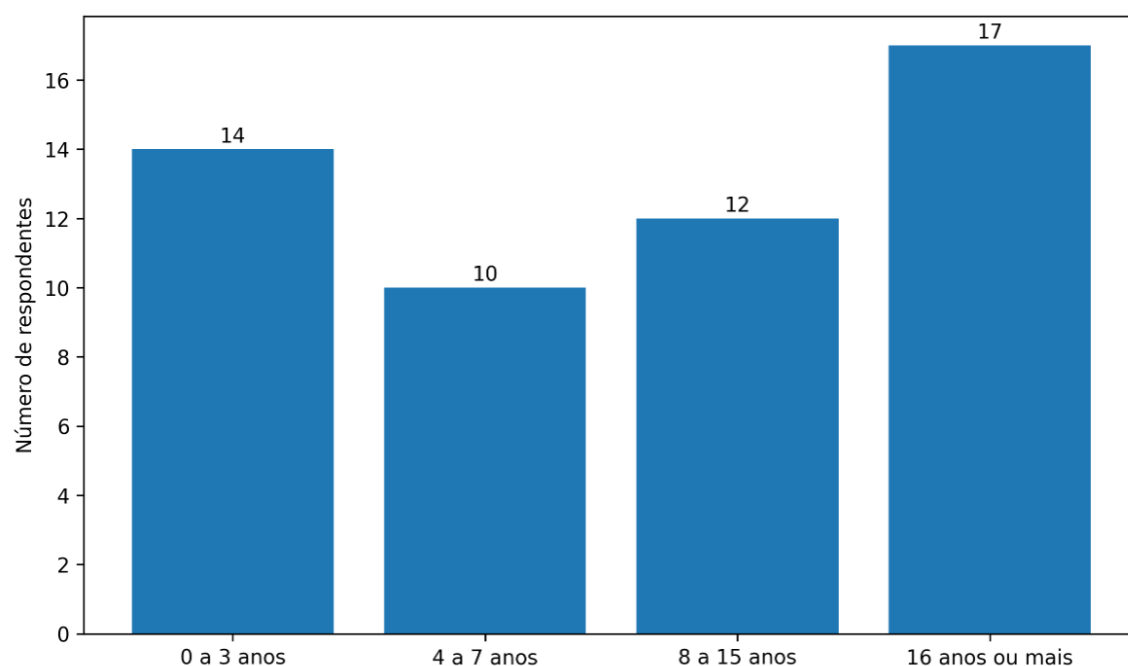


Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo

Esse perfil sugere que a pesquisa captou respostas de participantes inseridos em diferentes níveis decisórios e operacionais. A presença combinada de alta direção, gerência, coordenação e especialistas técnicos confere maior densidade às respostas, pois incorpora tanto visões estratégicas quanto percepções associadas à implementação e à operação.

No recorte de experiência setorial, observa-se distribuição heterogênea, com predominância de profissionais com 16 anos ou mais de experiência (32,1%), ao lado de uma participação expressiva de respondentes com até 3 anos de atuação (26,4%), além dos grupos intermediários (8–15 anos: 22,6%; 4–7 anos: 18,9%). Essa configuração sugere a coexistência de expertise consolidada e de perfis em início ou meio de trajetória, o que amplia a diversidade de perspectivas captadas pela pesquisa.

Gráfico 12 - Distribuição da amostra segundo tempo de experiência no setor (D3)



Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo

Em conjunto, esses dados indicam que a amostra é qualificada não apenas em termos quantitativos, mas também em termos posicionais. A diversidade de organizações, funções e níveis de experiência fortalece a interpretação dos resultados, pois reduz a probabilidade de que as respostas reflitam apenas a percepção de um único segmento ou nível hierárquico. A pesquisa de campo, portanto, não deve ser lida como mera ilustração da análise, mas como evidência empírica central do capítulo.

A partir dessa base, torna-se possível examinar como diferentes perfis institucionais — produtores, reguladores e usuários estratégicos — avaliam os principais condicionantes da implementação do SAF no Brasil, evidenciando convergências, tensões e assimetrias de percepção entre os grupos.

3.4 Resultados da pesquisa de campo

A presente seção analisa os resultados da pesquisa de campo realizada com atores diretamente envolvidos na cadeia do combustível sustentável de aviação (SAF), com o objetivo de compreender como produtores, reguladores e usuários estratégicos percebem as condições de implementação do ProBioQAV no Brasil. A análise privilegia a evidência empírica como elemento central do capítulo, buscando identificar padrões de percepção, convergências e divergências entre os grupos, bem como suas implicações para a viabilidade da transição.

Com o intuito de evitar uma leitura fragmentada por questões individuais, os resultados são organizados a partir de eixos analíticos que agrupam as afirmações do questionário segundo problemas substantivos comuns. Essa estratégia permite transformar a estrutura “pergunta–resposta” em uma análise orientada por argumentos, conferindo maior coesão e densidade interpretativa ao conjunto dos dados. Nesse sentido, a seção está estruturada em torno de quatro dimensões principais: (i) viabilidade regulatória e coordenação institucional; (ii) viabilidade econômica e condições de mercado; (iii) capacidade produtiva, logística e escala; e (iv) adoção operacional e posicionamento dos usuários estratégicos.

Essa forma de organização dialoga com o referencial teórico apresentado no Capítulo 1, no qual se argumenta que a transição energética no setor de aviação depende da articulação entre múltiplas dimensões — regulatórias, econômicas, tecnológicas e institucionais — que condicionam a difusão de combustíveis de baixo carbono. A pesquisa de campo permite, portanto, avaliar como esses fatores são percebidos pelos agentes diretamente envolvidos na cadeia, evidenciando pontos de alinhamento e, sobretudo, de tensão entre eles.

A dimensão ambiental, embora não constitua um eixo analítico autônomo nesta seção, aparece de forma transversal nas respostas dos participantes, especialmente em temas como sustentabilidade das matérias-primas, impactos indiretos do uso da terra e estratégias de mitigação de emissões. Esses elementos são incorporados à análise sempre que se articulam com as percepções sobre regulação, custos, produção e operação, refletindo o caráter integrado das decisões no contexto da transição energética.

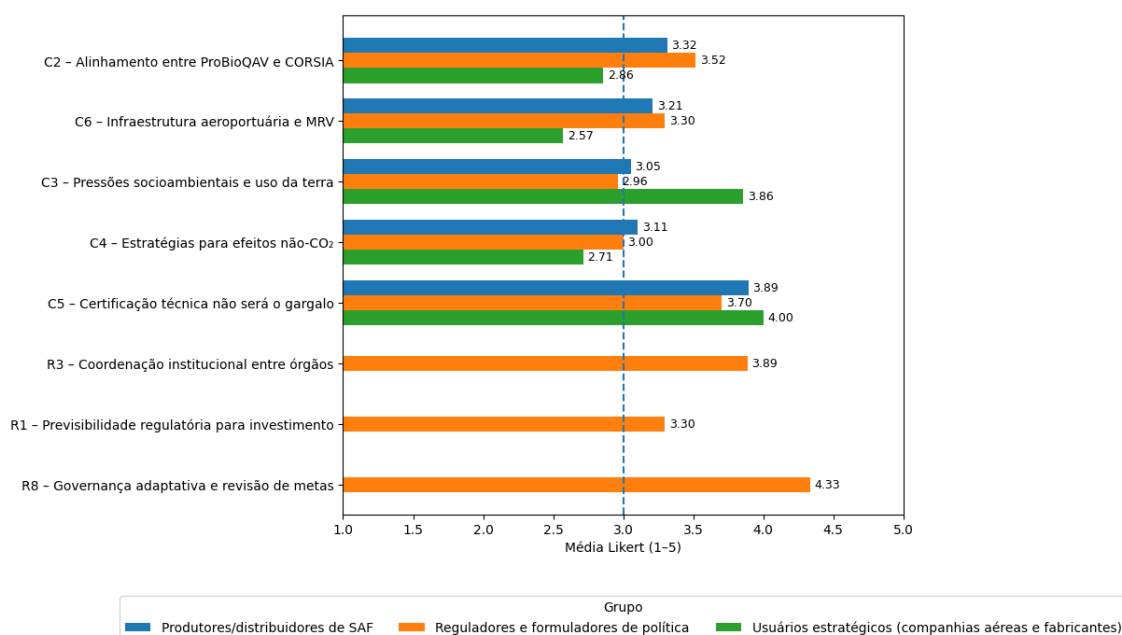
Por fim, cabe destacar que as diferenças entre os grupos de respondentes constituem um dos principais elementos analíticos desta seção. Ao operar sob restrições distintas — regulatórias, produtivas ou operacionais —, produtores, reguladores e usuários tendem a interpretar de forma diversa os mesmos desafios. A identificação dessas assimetrias permite não apenas qualificar a análise, mas também evidenciar potenciais desalinhamentos que podem afetar a coordenação da cadeia e a efetividade das políticas públicas.

3.4.1 Viabilidade regulatória e coordenação institucional

A análise da viabilidade regulatória e da coordenação institucional no desenvolvimento do mercado de combustível sustentável de aviação (SAF) no Brasil revela um padrão caracterizado por reconhecimento do avanço normativo combinado com percepção de fragilidades na implementação e articulação entre os agentes institucionais. Esse resultado emerge da leitura integrada das respostas às afirmações do bloco comum e do grupo de reguladores, que abordam tanto o alinhamento regulatório quanto a capacidade de execução das políticas públicas.

O gráfico a seguir mostra um recorte com as proposições resumidas, referente aos itens chave extraídos da pesquisa de campo para a análise do eixo de viabilidade regulatória. Os itens comuns, foram respondidos por todos os atores participantes da pesquisa, já os itens específicos foram respondidos apenas pelos atores que se identificaram como diretamente relacionados a aquele nicho de atuação.

Gráfico 13 - Percepções sobre a viabilidade regulatória do SAF no Brasil, por grupo de respondentes



Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo.

No que se refere ao alinhamento entre instrumentos nacionais e internacionais, observa-se uma convergência moderada em torno da afirmação C2 — “ProBioQAV e CORSIA estão suficientemente alinhados (regras de elegibilidade e sistemas de medição e verificação) para evitar dupla contagem e dar previsibilidade ao investimento.”. Os dados sugerem que os respondentes reconhecem a existência de um esforço institucional relevante de harmonização regulatória, especialmente no que diz respeito à compatibilização de critérios de elegibilidade e sistemas de monitoramento, reporte e verificação (MRV).

Essa percepção encontra respaldo no desenho do próprio ProBioQAV, que estabelece a necessidade de alinhamento com os critérios da Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO), particularmente no âmbito do CORSIA (ANP, 2024). No entanto, os debates conduzidos no âmbito dos Grupos de Trabalho da Conexão SAF indicam que essa convergência ainda se encontra em processo de consolidação, envolvendo a definição de critérios mínimos de compatibilização com instrumentos domésticos como o RenovaBio, bem como a incorporação de diferentes rotas tecnológicas (BRASIL, 2025). Assim, a pesquisa de campo evidencia que o alinhamento normativo é reconhecido, mas ainda não plenamente internalizado como fonte de previsibilidade para os agentes econômicos.

Essa tensão entre desenho regulatório e sua implementação torna-se mais evidente no caso da afirmação C6 — “A infraestrutura aeroportuária (processos de mistura, segregação operacional e rastreabilidade) e os sistemas de medição e verificação estarão prontos a tempo de atender a demanda.”. Os resultados indicam uma avaliação mais cautelosa, sugerindo que a prontidão operacional dos sistemas ainda é percebida como um ponto de incerteza.

Essa percepção é consistente com a complexidade técnica associada à implementação dos sistemas de MRV, que envolvem múltiplas camadas institucionais — incluindo certificadoras independentes, padrões internacionais e sistemas de rastreabilidade — conforme destacado nas discussões técnicas do setor (ANAC, 2025). Nesse sentido, a pesquisa de campo sugere que, embora o modelo regulatório esteja definido em termos conceituais, sua operacionalização em escala ainda não é percebida como plenamente assegurada.

Observa-se, ainda, uma diferença relevante entre os grupos de respondentes. Enquanto os reguladores tendem a avaliar de forma mais positiva o grau de alinhamento e coerência do arcabouço normativo, produtores e usuários estratégicos demonstram maior cautela, especialmente no que se refere à operacionalização das regras e à previsibilidade efetiva para investimento. Essa assimetria sugere que a percepção sobre a qualidade da regulação varia de acordo com a posição ocupada na cadeia, sendo mais favorável entre aqueles diretamente envolvidos na formulação das políticas.

A dimensão ambiental também emerge como elemento estruturante da viabilidade regulatória. No caso da afirmação C3 — “A expansão de SAF no Brasil conseguirá ocorrer sem pressões socioambientais relevantes (uso da terra/competição por biomassa), dadas as salvaguardas regulatórias e tecnológicas vigentes.” revela níveis relativamente baixos de concordância e elevada assimetria entre os grupos. Esse resultado indica que, embora o arcabouço regulatório contemple critérios de sustentabilidade, sua suficiência ainda é percebida com cautela, especialmente pelos atores mais próximos da implementação.

Essa percepção dialoga com o referencial teórico desse estudo, no qual se argumenta que a legitimidade dos biocombustíveis depende da capacidade de mitigar efeitos indiretos, como mudança indireta do uso da terra (ILUC) e competição com cadeias alimentares. Assim, a evidência empírica sugere que o desafio regulatório não se

limita à coordenação institucional, mas inclui a necessidade de garantir credibilidade ambiental às políticas adotadas.

Na sequência, observa-se que a afirmação C4 — “Estratégias para efeitos não-CO₂ (ex.: priorizar rotas com maior risco de trilhas de condensação; redução de aromáticos/naftalenos) devem ser incorporadas às políticas e planos corporativos no curto prazo.” amplia a compreensão da dimensão ambiental ao incorporar aspectos ainda pouco internalizados no debate nacional. Os níveis intermediários de concordância indicam que, embora o tema seja reconhecido, sua incorporação prática ainda é limitada.

Esse resultado é particularmente relevante à luz do referencial teórico discutido no Capítulo 1, no qual se destaca que os impactos climáticos da aviação não se restringem às emissões de CO₂. Estudos recentes apontam que efeitos como trilhas de condensação podem ter contribuição significativa para o aquecimento global, exigindo estratégias complementares à simples substituição de combustíveis. Nesse sentido, a evidência empírica sugere que a agenda de mitigação de efeitos não-CO₂ ainda se encontra em estágio inicial de internalização entre os agentes do setor, representando uma fronteira relevante para o avanço das políticas públicas e das estratégias corporativas.

No que se refere aos processos de certificação, os dados relativos à afirmação C5 — “O cronograma de certificações técnicas (padrões ASTM/ICAO e normas nacionais) não será o principal gargalo para escalar SAF no Brasil.” indica uma percepção relativamente positiva por parte dos respondentes. Esse resultado sugere que os padrões técnicos internacionais, já consolidados por instituições como ASTM e ICAO, não são vistos como entraves centrais à expansão do SAF.

Essa leitura desloca o foco da análise do domínio técnico para o institucional, indicando que os principais desafios não residem na definição de padrões, mas na capacidade de articulação entre os agentes responsáveis por sua implementação. Essa interpretação é reforçada pelos debates nos GTs da Conexão SAF, que evidenciam a necessidade de coordenação contínua entre órgãos como ANP, ANAC, MME e demais atores envolvidos na cadeia regulatória.

Essa dimensão se torna ainda mais evidente no caso da afirmação R3 — “Há coordenação efetiva entre os órgãos responsáveis por aviação e energia na implementação regulatória do SAF.”, que apresenta níveis apenas moderados de concordância. A

evidência aponta que, apesar da existência de instâncias formais de articulação, a coordenação interinstitucional ainda não é percebida como plenamente eficaz pelos agentes do setor.

Essa percepção encontra respaldo direto nos próprios registros dos GTs, nos quais se observa a multiplicidade de frentes de atuação — certificação, financiamento, tributação e infraestrutura — e a necessidade de integração entre elas para garantir coerência na implementação das políticas. A fragmentação institucional, nesse contexto, emerge como um dos principais fatores de risco para a consolidação do mercado de SAF, ao gerar sobreposição de competências, lacunas regulatórias e aumento da incerteza para investidores.

Adicionalmente, no que se refere ao grupo dos reguladores e formuladores de política, os resultados da afirmação R1 — “As metas e instrumentos do ProBioQAV (cronograma, critérios de elegibilidade, metas graduais) dão previsibilidade suficiente para investimento privado em SAF.” revela uma percepção ambivalente quanto à capacidade da política pública de fornecer sinais claros ao mercado. Embora o programa estabeleça metas escalonadas e diretrizes definidas, os resultados indicam que isso não é percebido como suficiente para garantir segurança regulatória no longo prazo.

Esse resultado pode ser interpretado à luz das características do próprio modelo adotado, que combina metas obrigatórias com flexibilidade quanto aos mecanismos de cumprimento — incluindo instrumentos como o *Book and Claim* e a utilização de créditos. Embora essa flexibilidade possa aumentar a eficiência econômica, ela também introduz incerteza quanto às regras efetivas de mercado, especialmente em fases iniciais de implementação.

Além disso, observa-se elevada concordância na afirmação R8 — “Avaliações periódicas de custo-benefício e efetividade climática devem ajustar metas e instrumentos de SAF ao longo do tempo.” sugerindo que os respondentes reconhecem a necessidade de um modelo regulatório dinâmico e adaptativo. Esse padrão sugere uma compreensão de que a política de SAF deve evoluir em resposta a mudanças tecnológicas, de mercado e regulatórias, reforçando a importância de mecanismos de governança capazes de ajustar o desenho da política ao longo do tempo.

Portanto, no que se refere a viabilidade regulatória, os resultados da pesquisa de campo indicam que o Brasil dispõe de um arcabouço regulatório estruturado e alinhado a

padrões internacionais, especialmente no que se refere à convergência entre o ProBioQAV e o CORSIA. No entanto, a efetividade desse sistema é percebida como condicionada por desafios relevantes de implementação e coordenação institucional.

Três elementos emergem como centrais: (i) a necessidade de fortalecimento da articulação entre os órgãos reguladores, reduzindo a fragmentação institucional; (ii) o avanço na operacionalização dos sistemas de certificação e MRV, garantindo sua funcionalidade em escala; e (iii) a ampliação da previsibilidade regulatória percebida pelos agentes econômicos, condição essencial para a viabilização de investimentos.

Em síntese, a evidência empírica sugere que o principal desafio regulatório do SAF no Brasil não reside na ausência de normas ou diretrizes, mas na sua implementação coordenada e na construção de confiança institucional ao longo do tempo — elementos fundamentais para a consolidação de um mercado doméstico robusto.

Ainda que os resultados indiquem avanços relevantes no desenho regulatório, a pesquisa de campo sugere que a efetividade desse arcabouço depende diretamente das condições econômicas que sustentam sua implementação. Nesse sentido, a análise da viabilidade do SAF não pode ser dissociada da estrutura de custos, dos instrumentos de mercado e dos incentivos disponíveis aos agentes, aspectos que são explorados na seção seguinte.

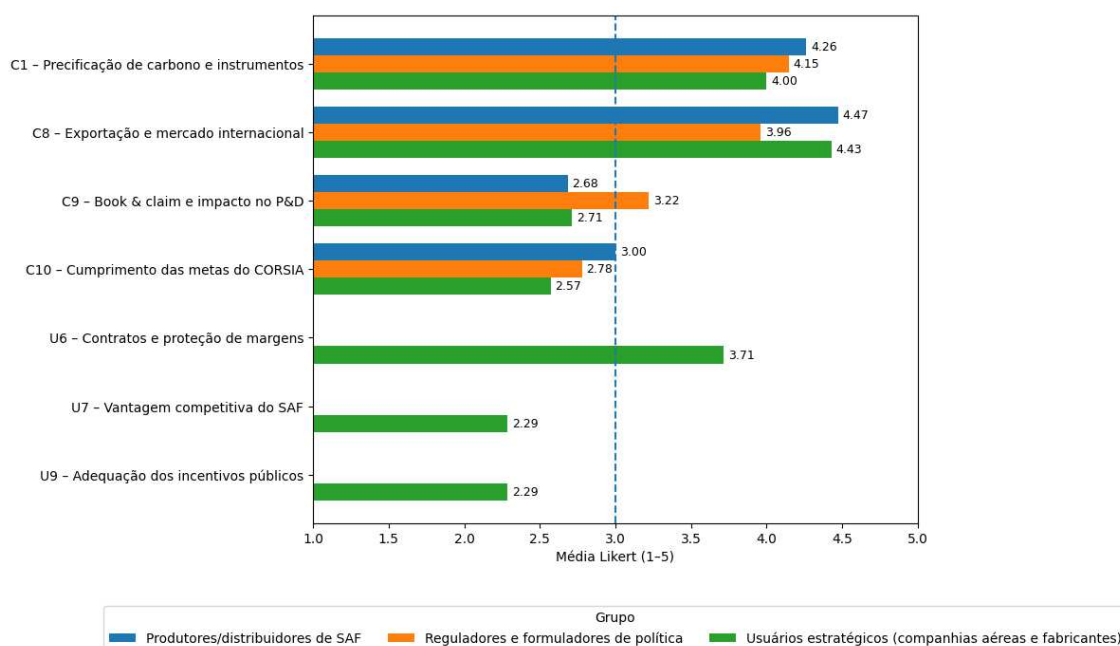
3.4.2 Viabilidade econômica e condições de mercado

A análise da viabilidade econômica do combustível sustentável de aviação (SAF) no Brasil revela um padrão consistente de percepção entre os respondentes da pesquisa de campo: há reconhecimento do potencial estrutural do país, mas forte ceticismo quanto às condições efetivas de mercado para viabilizar a expansão do setor no curto e médio prazo. Esse padrão emerge da articulação entre diferentes afirmações do bloco comum e do grupo de usuários estratégicos, que convergem para três dimensões centrais: custo, previsibilidade e instrumentos econômicos.

O gráfico a seguir revela um recorte com as proposições resumidas, referente aos itens chave extraídos da pesquisa de campo para a análise de viabilidade econômica e condições de mercado de SAF. Os itens comuns, foram respondidos por todos os atores

participantes da pesquisa, já os itens específicos foram respondidos apenas pelos atores que se identificaram como diretamente relacionados a aquele nicho de atuação.

Gráfico 14 - Percepções sobre a viabilidade econômica do SAF no Brasil, por grupo de respondentes



Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo.

No plano dos instrumentos de política, observa-se elevada convergência em torno da afirmação C1 — “Sem mecanismos robustos de precificação de carbono e instrumentos complementares, a adoção de SAF em escala no Brasil ficará aquém das metas 2030 2050.”. O elevado nível de concordância com essa proposição indica que os respondentes identificam, de forma clara, a insuficiência dos mecanismos atualmente disponíveis para viabilizar economicamente o SAF.

Essa percepção é consistente com o debate internacional sobre descarbonização da aviação, no qual se reconhece que o diferencial de custo entre SAF e querosene fóssil constitui o principal entrave à transição energética. De fato, estimativas indicam que o SAF pode apresentar custos entre duas e cinco vezes superiores aos combustíveis convencionais, dependendo da rota tecnológica e da escala produtiva (BID, 2025). Nesse contexto, a concordância com C1 não apenas confirma a literatura, mas revela que os agentes do setor internalizam a necessidade de instrumentos econômicos robustos —

como precificação de carbono, incentivos fiscais e mecanismos de garantia de demanda — para reduzir esse diferencial.

As assimetrias entre os grupos tornam-se ainda mais evidentes na dimensão econômica. Os usuários estratégicos — particularmente companhias aéreas — apresentam maior grau de ceticismo em relação à adequação dos incentivos e à viabilidade de custos, enquanto reguladores tendem a enfatizar o papel dos instrumentos existentes e produtores ocupam uma posição intermediária. Esse padrão é consistente com a posição de cada grupo na cadeia: enquanto a demanda internaliza diretamente os custos do SAF, os demais atores operam com horizontes distintos de risco e investimento.

Essa leitura é reforçada pelas discussões no âmbito do Grupo de Trabalho de Tributação do Conexão SAF, nas quais se destaca que políticas eficazes para o setor devem combinar previsibilidade, horizonte de longo prazo e estabilidade regulatória, de modo a viabilizar investimentos intensivos em capital (TOPSOE, 2025). Assim, a evidência empírica não apenas corrobora a literatura, mas a qualifica ao demonstrar que essa percepção está disseminada entre diferentes elos da cadeia.

Ainda no plano econômico, a importância da demanda internacional aparece de forma contundente na afirmação C8 — “A possibilidade de venda para mercados internacionais é determinante para a viabilidade econômica da cadeia doméstica de SAF.”, que apresenta elevados níveis de concordância entre os respondentes. Esse resultado sugere que o mercado doméstico, isoladamente, não é percebido como suficiente para sustentar a expansão do setor, sendo necessário o acesso a mercados externos para viabilizar ganhos de escala.

Essa percepção encontra respaldo nos estudos setoriais, que indicam que o Brasil possui vantagens comparativas relevantes — como disponibilidade de biomassa e experiência em biocombustíveis —, mas depende da inserção em cadeias globais para capturar valor econômico (MDIC, 2025). Ao mesmo tempo, a dependência do mercado externo introduz novos riscos, relacionados a padrões de certificação, barreiras comerciais e volatilidade da demanda internacional.

No que se refere aos riscos de política, a afirmação C9 — “A adoção de meios alternativos como o *Book and Claim* de SAF produzidos em outro país ou créditos de carbono pode desacelerar o desenvolvimento de tecnologia e desencorajar o investimento em P&D no Brasil.” revela uma percepção ambivalente entre os respondentes.

Por um lado, esses mecanismos são reconhecidos como instrumentos de flexibilidade regulatória, conforme previsto na legislação. Por outro, a pesquisa de campo sugere preocupação quanto ao seu potencial de reduzir incentivos ao desenvolvimento da produção doméstica. Essa tensão reflete o dilema clássico das transições energéticas, discutido no Capítulo 1, entre eficiência de curto prazo e construção de capacidades tecnológicas de longo prazo.

Essa preocupação é particularmente relevante à luz das experiências recentes no Brasil, como a implementação de operações de Book and Claim que reduziram custos logísticos e operacionais, mas deslocaram a produção para o exterior (VIBRA, 2025) . Nesse sentido, os dados da pesquisa de campo evidenciam uma tensão estrutural entre flexibilidade regulatória e desenvolvimento industrial, reforçando o argumento de que instrumentos de mercado devem ser cuidadosamente calibrados para evitar efeitos adversos sobre a cadeia produtiva nacional.

No plano da viabilidade prática, os resultados relativos à afirmação C10— “As metas do CORSIA são viáveis para serem cumpridas pelas companhias aéreas até 2035, considerando o atual estágio da cadeia de suprimento de SAF no Brasil.” apresentam a menor média do bloco comum, indicando ceticismo significativo quanto à capacidade de cumprimento das metas no horizonte de curto e médio prazo. Os dados indicam que, apesar do reconhecimento do potencial do país, persistem dúvidas quanto à capacidade de articulação entre oferta, demanda e infraestrutura.

Essa percepção é coerente com análises que apontam que a expansão do SAF requer investimentos massivos em capacidade produtiva, infraestrutura logística e financiamento, estimados em dezenas de bilhões de dólares globalmente (BID, 2025) . No caso brasileiro, a dificuldade de mobilizar esses investimentos está associada, sobretudo, à combinação de custos elevados e incertezas regulatórias.

A perspectiva dos usuários estratégicos aprofunda essa análise ao evidenciar uma percepção ainda mais restritiva das condições de mercado. A elevada concordância com a afirmação U6 — “Contratos de fornecimento de longo prazo e mecanismos de proteção contra volatilidade de preços serão necessários para mitigar oscilações do custo do SAF e proteger margens.” indica que as companhias aéreas reconhecem a necessidade de instrumentos contratuais para reduzir riscos.

Esse resultado dialoga diretamente com as contribuições apresentadas no âmbito do Conexão SAF, nas quais companhias aéreas como LATAM e GOL destacaram a importância de mecanismos que evitem a transferência integral dos custos do SAF para as tarifas aéreas, sugerindo incentivos fiscais e regimes tributários harmonizados (LATAM, 2025; GOL, 2025). Assim, a pesquisa de campo confirma que a demanda é altamente sensível à volatilidade de preços e depende de instrumentos de estabilização para viabilizar a adoção do combustível.

Por outro lado, observa-se baixa concordância na afirmação U7 — “O uso de SAF gerará vantagem competitiva (acesso a mercados/slots, preferência de clientes com exigências de sustentabilidade, condições de financiamento), além do cumprimento regulatório.” revela que os usuários não percebem, no curto prazo, ganhos econômicos ou estratégicos associados ao uso do SAF. Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que a adoção do combustível tende a ser motivada mais por exigências regulatórias do que por incentivos de mercado.

Essa percepção é reforçada pelos resultados da afirmação U9 — “Os incentivos regulatórios e financeiros oferecidos pelo governo brasileiro são adequados para estimular o consumo e o uso de SAF.”, que apresenta baixos níveis de concordância. Tal resultado evidencia uma avaliação crítica quanto à efetividade das políticas públicas existentes, indicando que, do ponto de vista dos usuários, os instrumentos disponíveis ainda não são suficientes para alterar a lógica econômica do setor.

Essa avaliação encontra respaldo nos estudos tributários analisados, que apontam a existência de distorções relevantes na estrutura fiscal aplicada ao SAF. Em alguns casos, a carga tributária sobre o combustível sustentável pode ser significativamente superior à do querosene convencional, especialmente em operações de importação e comercialização (EMBRAER, 2025). Além disso, a incidência de tributos ao longo da cadeia produtiva pode gerar cumulatividade e reduzir a competitividade do produto final (UNEM, 2025).

Em síntese, os resultados da pesquisa de campo indicam que a viabilidade econômica do SAF no Brasil é percebida como condicionada por um conjunto de fatores interdependentes: elevado diferencial de custo, ausência de instrumentos econômicos robustos, fragilidade na previsibilidade regulatória e limitações na estrutura tributária. Embora o país apresente vantagens estruturais relevantes, como disponibilidade de

matérias-primas e potencial de inserção internacional, a consolidação do mercado de SAF depende, fundamentalmente, da capacidade de coordenação entre políticas públicas, instrumentos econômicos e decisões de investimento.

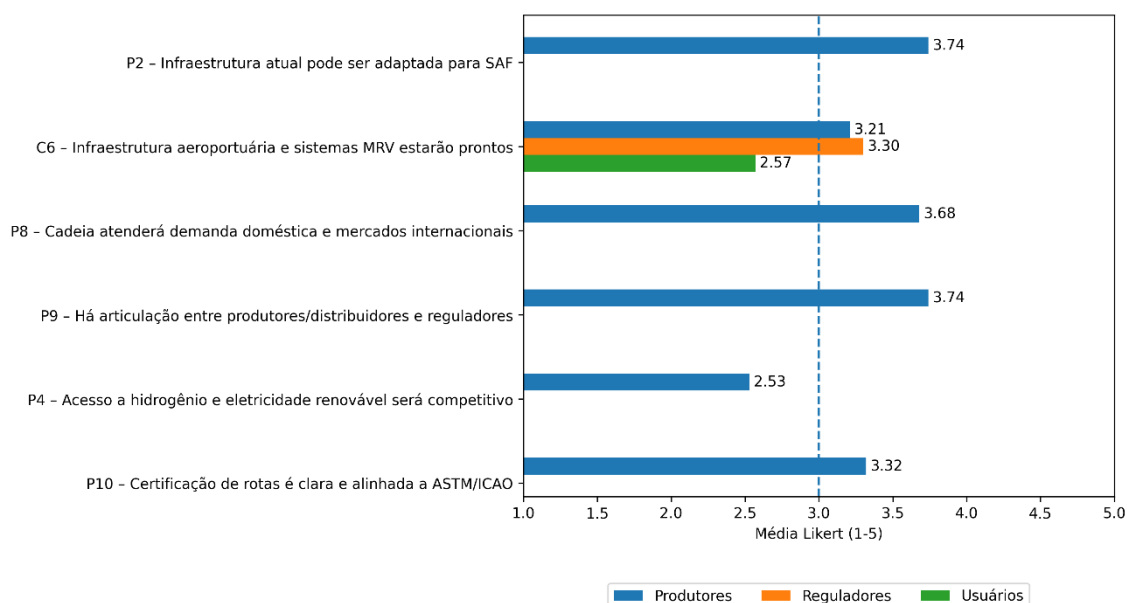
As limitações econômicas identificadas não se manifestam de forma isolada, mas se articulam diretamente com as condições produtivas e logísticas da cadeia. O diferencial de custo, a incerteza de demanda e a dependência de mercados internacionais estão intrinsecamente ligados à capacidade de expansão da oferta e à adaptação da infraestrutura existente, temas que são aprofundados na seção a seguir.

3.4.3 Capacidade produtiva, logística e escala

A análise da capacidade produtiva, da infraestrutura logística e das condições de escala para o desenvolvimento do mercado de SAF no Brasil revela um padrão consistente: os agentes reconhecem a existência de uma base estrutural relevante, mas apontam limites claros quanto à sua adaptação, integração e expansão em tempo compatível com as metas regulatórias. Esse resultado emerge da articulação entre as respostas do grupo de produtores e das questões do bloco comum relacionadas à infraestrutura e oferta.

O gráfico a seguir mostra um recorte com as proposições resumidas, referente aos itens chave extraídos da pesquisa de campo para a análise de capacidade produtiva. O item comum, foi respondido por todos os atores participantes da pesquisa, já os itens específicos foram respondidos apenas pelos atores que se identificaram como diretamente relacionados a aquele nicho de atuação.

Gráfico 15 - Percepções sobre a capacidade produtiva e expansão da oferta de SAF no Brasil



Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo.

Um primeiro eixo relevante diz respeito à possibilidade de adaptação da infraestrutura existente. Nesse sentido, observa-se concordância moderada em relação à afirmação P2 — “A infraestrutura atual (refino/biorrefino, terminais, dutos, armazenagem) pode ser adaptada para SAF com investimento inicial e prazos factíveis.”. Os dados mostram que os agentes do setor produtivo reconhecem a existência de ativos relevantes já instalados no país, que poderiam ser parcialmente utilizados para viabilizar a inserção do SAF.

Essa percepção encontra respaldo direto nas discussões do Grupo de Trabalho (GT) de Infraestrutura e Distribuição do programa Conexão SAF, nas quais se estabeleceu como diretriz central a priorização do uso da infraestrutura existente, com minimização de investimentos de capital (CAPEX — *capital expenditure*, isto é, gastos destinados à aquisição, modernização ou ampliação de ativos físicos de longo prazo) e busca por competitividade logística (IBP; SAC/MPOR, 2024). Conforme destacado nas apresentações iniciais do GT, o modelo brasileiro de distribuição de combustíveis líquidos já apresenta elevada capilaridade e complexidade, o que permitiria, ao menos em uma fase inicial, a incorporação do SAF sem necessidade de reconfiguração estrutural profunda.

No entanto, essa leitura positiva é imediatamente qualificada quando se observa a natureza mais complexa da cadeia de suprimentos com a introdução de combustíveis renováveis. No caso da afirmação C6 — “A infraestrutura aeroportuária (processos de mistura, segregação operacional e rastreabilidade) e os sistemas de medição e verificação estarão prontos a tempo de atender a demanda.” revela níveis mais cautelosos de concordância, indicando que a adaptação não é percebida como trivial.

Os dados revelam neste ponto uma distribuição assimétrica das percepções. Produtores demonstram maior confiança na possibilidade de adaptação da infraestrutura e expansão da oferta, enquanto usuários permanecem mais cautelosos quanto à disponibilidade efetiva de combustível e aos impactos operacionais. Reguladores, por sua vez, tendem a adotar uma posição intermediária, reconhecendo o potencial estrutural do país, mas também os desafios de implementação.

Essa tensão é amplamente discutida nos materiais do GT, nos quais se evidencia que a inserção do SAF aumenta significativamente a complexidade logística, especialmente em função de exigências adicionais de rastreabilidade, certificação e segregação operacional (IBP; SAC/MPOR, 2025a). Conforme ilustrado nas apresentações técnicas, a cadeia de suprimentos deixa de ser predominantemente linear — como no caso do querosene de aviação fóssil — para incorporar múltiplas rotas tecnológicas, diferentes origens de matéria-prima e sistemas de certificação paralelos, o que amplia os pontos de controle e potencialmente os custos operacionais.

Outro elemento central refere-se à escala de produção e à capacidade de atendimento da demanda. Nesse sentido, os resultados relativos à afirmação P8 — “O setor produtivo brasileiro conseguirá atender a demanda doméstica e acessar mercados internacionais com padrões de qualidade e sustentabilidade.” indica uma percepção moderadamente positiva, mas não plenamente consolidada. Os produtores reconhecem o potencial do país, mas não expressam confiança irrestrita quanto à sua materialização no curto prazo.

Essa percepção é consistente com os dados apresentados no relatório consolidado do GT, que indicam que, nos primeiros anos de implementação do mandato — especialmente a partir de 2027 —, a oferta doméstica de SAF tende a ser insuficiente para atender integralmente a demanda, à exceção de rotas específicas como o coprocessamento (CONEXÃO SAF, 2025). Esse descompasso inicial entre oferta e demanda reforça a ideia

de que a expansão da produção dependerá não apenas de capacidade instalada, mas de condições econômicas, tecnológicas e logísticas ainda em construção.

Além disso, observa-se que a afirmação P9 — “Existe articulação eficaz entre produtores/distribuidores de SAF e órgãos reguladores como ANP, ANAC, MME e MAPA.” revela níveis apenas intermediários de concordância, indicando que a coordenação entre os elos da cadeia produtiva ainda não é percebida como plenamente eficaz. Esse resultado reforça a ideia de que a questão logística não se resume à infraestrutura física, mas envolve também a governança da cadeia de suprimentos, incluindo a articulação entre produtores, distribuidores e reguladores.

Essa dimensão institucional da logística é explicitamente abordada nos debates do GT, nos quais se discute o papel dos diferentes agentes na cadeia — produtores, refinarias, distribuidores e operadores aeroportuários — e a necessidade de definição clara de responsabilidades, especialmente no que se refere ao processo de mistura (*blending*) e certificação do produto (IBP; SAC/MPOR, 2025a). A ausência de consenso pleno sobre esses arranjos operacionais contribui para a percepção de incerteza identificada na

Outro ponto crítico emerge no caso da afirmação P4 — “O acesso a hidrogênio e eletricidade renovável a custos competitivos permitirá o avanço de rotas sintéticas de baixo carbono no médio prazo.”, que apresenta baixos níveis de concordância. Emerge a percepção de que, embora as rotas sintéticas sejam reconhecidas como estratégicas no longo prazo, sua viabilidade no contexto brasileiro ainda é vista com ceticismo, sobretudo em função de limitações de infraestrutura energética e custos elevados.

Essa leitura reforça a dependência, no curto e médio prazo, de rotas mais maduras — como HEFA e coprocessamento — que apresentam maior compatibilidade com a infraestrutura existente. Conforme discutido no âmbito do GT, o coprocessamento surge como alternativa relevante por permitir a utilização de refinarias já instaladas, reduzindo a necessidade de novos investimentos logísticos e industriais (CONEXÃO SAF, 2025).

Por fim, a análise da afirmação P10 — “O processo de certificação de rotas tecnológicas para SAF no Brasil é claro, acessível e alinhado com os critérios internacionais da ASTM e da ICAO.” revela uma percepção intermediária, indicando que, embora exista alinhamento técnico com padrões internacionais, ainda há desafios na sua operacionalização prática. Esse resultado se conecta diretamente à dimensão logística, na medida em que os processos de certificação influenciam o fluxo físico do produto,

exigindo segregação por rota tecnológica, controle de mistura e rastreabilidade ao longo de toda a cadeia.

De fato, conforme destacado nas discussões do GT, a impossibilidade de mistura de combustíveis sustentáveis de diferentes rotas tecnológicas em um mesmo tanque e a necessidade de observância rigorosa dos limites de mistura definidos pela ASTM introduzem restrições operacionais relevantes, exigindo adaptações logísticas específicas (IBP; SAC/MPOR, 2025b). Esses requisitos técnicos reforçam a complexidade da cadeia e ajudam a explicar a cautela observada nas respostas dos participantes da pesquisa.

Emerge, a partir das respostas, a percepção de que o Brasil dispõe de uma base logística e produtiva relevante, capaz de sustentar a inserção inicial do SAF, especialmente por meio do aproveitamento da infraestrutura existente. No entanto, essa capacidade é percebida como condicionada por três limitações principais: (i) o aumento da complexidade operacional da cadeia de suprimentos, associado à certificação, rastreabilidade e multiplicidade de rotas tecnológicas; (ii) a existência de um descompasso inicial entre oferta e demanda; e (iii) a necessidade de coordenação mais eficaz entre os agentes da cadeia.

Dessa forma, a pesquisa de campo evidencia que o desafio logístico do SAF no Brasil não se resume à disponibilidade de infraestrutura, mas envolve sua adaptação, integração e governança em um ambiente de maior complexidade técnica e regulatória, elementos essenciais para viabilizar a transição em escala.

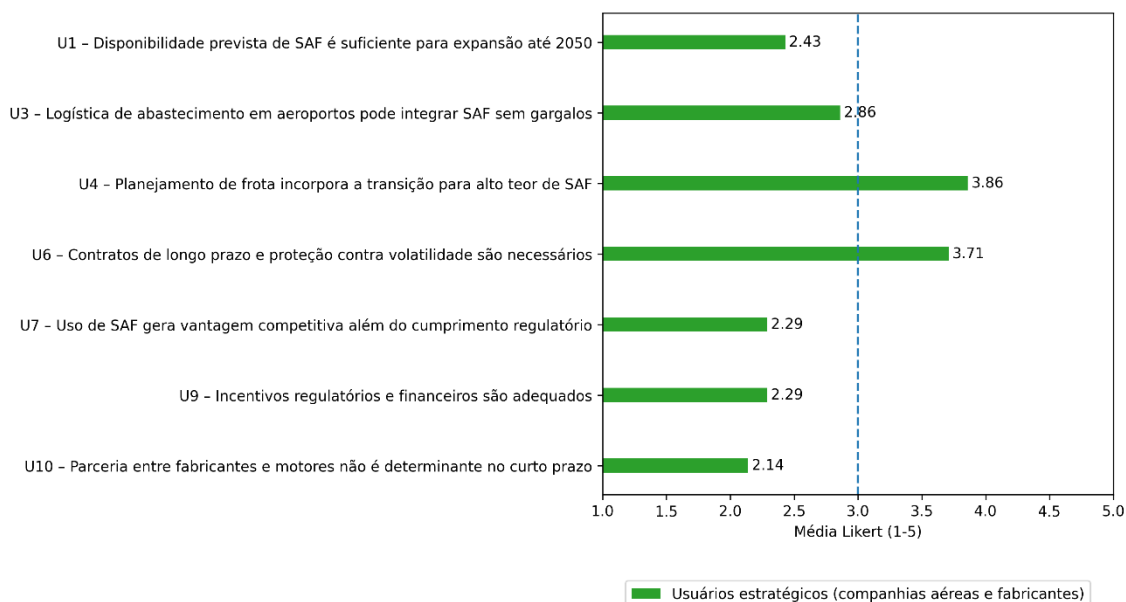
As restrições associadas à capacidade produtiva e à infraestrutura logística se refletem diretamente nas decisões dos agentes que operam no elo final da cadeia. Para os usuários estratégicos, essas limitações se traduzem em riscos operacionais, incertezas de abastecimento e pressões de custo, condicionando a forma como o SAF é incorporado às estratégias empresariais, conforme analisado na seção seguinte.

3.4.4 Adoção operacional e posicionamento dos usuários estratégicos

A análise da adoção operacional do SAF e do posicionamento dos usuários estratégicos — especialmente companhias aéreas e fabricantes — em evidência no gráfico a seguir, revela um padrão marcado por reconhecimento da inevitabilidade da

transição energética, combinado com forte ceticismo quanto à sua viabilidade econômica e operacional no curto prazo. Esse resultado emerge da leitura integrada das respostas do grupo U, que expressam de forma consistente as restrições enfrentadas pelo elo demandante da cadeia.

Gráfico 16 - Percepções dos usuários estratégicos sobre a adoção operacional do SAF



Fonte: Elaboração própria com dados da pesquisa de campo.

Um primeiro eixo relevante refere-se à disponibilidade de combustível e à segurança de abastecimento. Nesse sentido, os resultados da afirmação U1 — “A disponibilidade prevista de SAF no Brasil é suficiente para os planos de expansão das companhias até 2050, sem risco sistêmico de ruptura de abastecimento.” revela baixos níveis de concordância, indicando que os usuários não percebem, nas condições atuais, garantia de oferta suficiente para sustentar suas estratégias de crescimento.

Essa percepção encontra respaldo direto nas discussões do Grupo de Trabalho de Regulação do Mandato, nas quais se reconhece a necessidade de desenvolvimento de mecanismos específicos de monitoramento da disponibilidade de SAF. Conforme apresentado pelo Ministério de Minas e Energia, o modelo proposto envolve o levantamento anual da oferta potencial, a consolidação de contratos de produção e a projeção da demanda do setor aéreo (MME, 2025). A própria existência desse módulo

regulatório indica que a disponibilidade do combustível não é tratada como condição dada, mas como variável crítica a ser continuamente monitorada.

Essa incerteza quanto à oferta se articula diretamente com a percepção sobre logística operacional. A afirmação U3 — “A logística de abastecimento em aeroportos brasileiros poderá integrar SAF sem gerar gargalos operacionais ou aumentos expressivos no custo unitário.” apresenta níveis intermediários de concordância, sugerindo que os usuários reconhecem a viabilidade técnica da integração, mas não descartam impactos operacionais e econômicos relevantes.

Essa cautela é consistente com o desenho institucional apresentado nos GTs, nos quais se discute a necessidade de adaptação dos processos de abastecimento, bem como a integração entre sistemas físicos e mecanismos de contabilização de emissões. Além disso, a possibilidade de utilização de mecanismos como o Book and Claim para cumprimento de metas em aeroportos sem acesso físico ao combustível reforça a percepção de que a logística ainda constitui um ponto sensível da implementação (VIBRA, 2025).

No plano operacional, a análise da afirmação U4 — “O planejamento de renovação/adaptação de frota incorpora, de forma material, a transição para alto teor de SAF.” revela níveis moderados de concordância, indicando que, embora a transição esteja presente no planejamento estratégico das empresas, ela ainda não se traduz em decisões plenamente consolidadas no curto prazo. A evidência empírica revela o caráter incremental da adoção do SAF, que depende da evolução simultânea de fatores tecnológicos, regulatórios e econômicos.

Outro eixo central refere-se à gestão de risco e à necessidade de instrumentos contratuais. Há elevada convergência em torno da afirmação U6 — “Contratos de fornecimento de longo prazo e mecanismos de proteção contra volatilidade de preços serão necessários para mitigar oscilações do custo do SAF e proteger margens.” que evidencia que os usuários percebem o SAF como um insumo de alto risco econômico, cuja adoção depende de mecanismos de estabilização.

Essa percepção é diretamente corroborada pelas contribuições apresentadas no âmbito do GT, nas quais operadores aéreos destacaram a necessidade de previsibilidade contratual e de instrumentos que reduzam a exposição à volatilidade de preços. Conforme discutido nas reuniões, o modelo de contratação entre distribuidores e companhias aéreas,

com contratos de médio e longo prazo, surge como alternativa central para viabilizar a demanda (VIBRA, 2025) .

Por outro lado, a análise da afirmação U7 — “O uso de SAF gerará vantagem competitiva (acesso a mercados/slots, preferência de clientes com exigências de sustentabilidade, condições de financiamento), além do cumprimento regulatório.” revela baixos níveis de concordância, indicando que os usuários não percebem ganhos competitivos imediatos associados ao uso do combustível. Esse resultado é particularmente relevante, pois sugere que a adoção do SAF tende a ser impulsionada predominantemente por exigências regulatórias, e não por incentivos de mercado.

Essa leitura é consistente com o contexto internacional apresentado nas discussões da IATA, nas quais o SAF é identificado como principal vetor de descarbonização da aviação até 2050, mas ainda dependente de políticas públicas para viabilização econômica (IATA, 2025). Assim, a pesquisa de campo evidencia que os usuários internalizam a necessidade da transição, mas não identificam, no curto prazo, benefícios econômicos diretos.

Além disso, a dimensão ambiental também se manifesta como vetor de pressão externa sobre os usuários. Embora essa afirmação apresente baixa concordância, isso não implica ausência de pressão por sustentabilidade. Ao contrário, sugere que os incentivos ainda não são internalizados como vantagem econômica direta, mas como exigência regulatória e reputacional, especialmente em mercados internacionais.

Essa percepção crítica se intensifica na análise da afirmação U9 — “Os incentivos regulatórios e financeiros oferecidos pelo governo brasileiro são adequados para estimular o consumo e o uso de SAF.”, que revela um alto nível de ceticismo. Esse resultado indica uma avaliação negativa quanto à efetividade dos instrumentos de política pública, reforçando a ideia de que o arcabouço atual ainda não altera de forma significativa a lógica econômica do setor.

Além disso, observa-se que a afirmação U10 — “A parceria entre fabricantes de aeronaves e fornecedores de motores não é determinante para viabilizar o uso crescente de combustíveis sustentáveis no curto e médio prazo.” revela uma percepção relevante quanto ao papel da indústria aeronáutica. A baixa concordância com essa proposição sugere que os respondentes reconhecem a importância dessas parcerias para a

viabilização técnica e operacional do SAF, especialmente no que se refere à certificação, compatibilidade de motores e evolução tecnológica.

Por fim, destaca-se a dimensão regulatória associada ao cumprimento das metas. Nos debates do GT, evidencia-se que o modelo brasileiro atribui aos operadores aéreos a responsabilidade direta pela redução de emissões, com base em uma metodologia de cálculo definida pela ANAC e estruturada em ciclos de monitoramento, reporte e verificação (MRV) (ANAC, 2025) . Esse modelo implica não apenas obrigações ambientais, mas também custos operacionais e administrativos adicionais, que são internalizados pelas empresas.

Os resultados da pesquisa de campo indicam que os usuários estratégicos constituem o elo mais sensível às restrições econômicas e operacionais da transição para o SAF. Embora reconheçam a necessidade do combustível para o cumprimento de metas climáticas, sua adoção é percebida como condicionada por quatro fatores principais: (i) disponibilidade incerta de oferta; (ii) custos elevados e voláteis; (iii) ausência de incentivos econômicos suficientes; e (iv) desafios operacionais e logísticos.

Dessa forma, a evidência empírica sugere que a consolidação do mercado de SAF no Brasil depende, de forma decisiva, da capacidade de reduzir riscos para a demanda, por meio de instrumentos contratuais, incentivos econômicos e coordenação regulatória. Sem esses elementos, há o risco de que a adoção do combustível permaneça restrita ao cumprimento mínimo de obrigações regulatórias, sem se traduzir em transformação estrutural do setor.

Identifica-se a partir desses resultados que os usuários estratégicos constituem o grupo mais sensível às restrições práticas da transição. Em comparação com produtores e reguladores, suas respostas revelam maior grau de cautela — ou mesmo ceticismo — em relação à disponibilidade de oferta, aos custos e à efetividade dos instrumentos de política pública. Essa assimetria é particularmente relevante, uma vez que o sucesso da política depende, em última instância, da capacidade de induzir demanda efetiva pelo combustível.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado transformações profundas nas estruturas produtivas globais. No setor de transporte, e particularmente na aviação civil, o desafio da descarbonização apresenta complexidade adicional em razão das limitações tecnológicas associadas à substituição dos combustíveis fósseis por alternativas de menor intensidade de carbono. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF) têm sido apontados como uma das principais soluções de médio e longo prazo para reduzir as emissões do setor aéreo.

Diante desse cenário, esta dissertação analisou os avanços, desafios e perspectivas para a implementação do SAF no Brasil, considerando o desenvolvimento do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), seu alinhamento com as metas internacionais de descarbonização e, sobretudo, as percepções dos diferentes atores envolvidos na cadeia produtiva do combustível.

A análise realizada ao longo do trabalho evidenciou que o Brasil reúne condições estruturais favoráveis para participar de forma relevante no processo global de transição energética na aviação. A disponibilidade de biomassa, a experiência acumulada na produção de biocombustíveis e a existência de uma infraestrutura agroindustrial consolidada configuram vantagens comparativas importantes, capazes de posicionar o país como potencial fornecedor estratégico de matérias-primas e combustíveis sustentáveis no mercado internacional, especialmente na América do Sul.

Entretanto, a principal contribuição desta dissertação reside na análise da pesquisa de campo, que permitiu qualificar esse diagnóstico a partir das percepções dos agentes diretamente envolvidos na implementação do SAF. Os resultados indicam que, embora haja reconhecimento generalizado do potencial brasileiro, a viabilidade da cadeia não é percebida como garantida nas condições atuais.

A pesquisa evidenciou um padrão consistente ao longo dos diferentes grupos analisados. De forma geral, há elevada concordância quanto à importância de instrumentos econômicos — especialmente mecanismos de precificação de carbono, incentivos fiscais e políticas públicas de estímulo — como condição necessária para viabilizar a expansão do SAF em escala. Esse resultado reforça o entendimento de que o

principal desafio da transição não é tecnológico, mas econômico, estando diretamente relacionado ao diferencial de custo em relação ao querosene fóssil.

Ao mesmo tempo, os dados revelam a existência de assimetrias relevantes entre os elos da cadeia produtiva. Reguladores e formuladores de política tendem a avaliar de forma mais positiva o desenho institucional e os instrumentos em construção, destacando a importância de marcos regulatórios e mecanismos de governança. Produtores, por sua vez, reconhecem a viabilidade técnica das rotas produtivas, mas expressam preocupação com previsibilidade regulatória, custos e acesso a insumos estratégicos. Já os usuários estratégicos — especialmente companhias aéreas — apresentam uma posição mais crítica, evidenciando preocupações com disponibilidade de oferta, competitividade econômica e risco de abastecimento.

Essas diferenças de percepção são particularmente relevantes, pois indicam que o principal desafio para o desenvolvimento do SAF no Brasil não reside apenas na formulação de políticas ou na disponibilidade de recursos, mas na capacidade de coordenação entre os diferentes agentes. A evidência empírica sugere a existência de um desalinhamento entre oferta, demanda e regulação, no qual decisões de investimento, produção e consumo não se encontram plenamente sincronizadas.

Além disso, a pesquisa de campo reforça a centralidade de fatores institucionais e econômicos previamente identificados na análise documental. A ausência de previsibilidade regulatória, a percepção de insuficiência de incentivos e as dúvidas quanto à capacidade de adaptação da infraestrutura e dos sistemas de certificação aparecem como elementos recorrentes nas respostas dos participantes. Esses fatores não apenas limitam a atratividade de investimentos, mas também aumentam a percepção de risco ao longo da cadeia produtiva.

Do ponto de vista das políticas públicas, os resultados indicam que a consolidação de um mercado de SAF no Brasil dependerá da implementação de um conjunto integrado de instrumentos capazes de atuar simultaneamente sobre diferentes dimensões. Entre essas, destacam-se: (i) a redução do diferencial de custo por meio de incentivos econômicos e mecanismos de financiamento; (ii) o aumento da previsibilidade regulatória, especialmente no que se refere a metas, certificação e integração com mecanismos internacionais; (iii) o fortalecimento da coordenação institucional entre os

órgãos responsáveis; e (iv) a ampliação da infraestrutura logística e dos sistemas de monitoramento, reporte e verificação.

A análise comparativa internacional reforça esse diagnóstico ao demonstrar que países que avançaram mais rapidamente na adoção do SAF o fizeram por meio de políticas consistentes de incentivo econômico, regulação clara e coordenação institucional. Nesse sentido, os desafios identificados no Brasil não são isolados, mas assumem maior intensidade em função do estágio ainda inicial de consolidação de seu arcabouço institucional.

Apesar das contribuições apresentadas, esta pesquisa possui limitações que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. Em primeiro lugar, o Programa ProBioQAV ainda se encontra em fase inicial de implementação, o que limita a possibilidade de avaliação completa de seus impactos econômicos e institucionais no setor de aviação. Em segundo lugar, a pesquisa de campo realizada, embora tenha permitido captar percepções relevantes de especialistas e profissionais da cadeia do SAF, apresentou limitações associadas à composição da amostra. Em particular, observou-se uma participação relativamente reduzida de usuários estratégicos do combustível, como companhias aéreas e fabricantes de aeronaves, o que se deve, em grande medida, às dificuldades de acesso a esses atores e às barreiras institucionais para obtenção de respostas em pesquisas acadêmicas.

Diante dessas limitações, pesquisas futuras poderão aprofundar a análise da evolução institucional e econômica do mercado de SAF no Brasil à medida que novas políticas públicas e projetos industriais forem implementados. Estudos posteriores também poderão explorar com maior detalhamento os impactos econômicos da expansão da produção de combustíveis sustentáveis de aviação sobre diferentes setores da economia brasileira, bem como os efeitos socioeconômicos associados ao desenvolvimento de novas cadeias produtivas baseadas em biomassa e biocombustíveis avançados, além de comparar impactos sociais, segurança energética ou mesmo realizar uma comparação em competitividade de *feed-stock* com outros setores como o marítimo e o terrestre.

Em síntese, os resultados desta dissertação indicam que o Brasil possui condições estruturais favoráveis para desempenhar papel relevante na descarbonização da aviação. No entanto, a transformação desse potencial em realidade dependerá, fundamentalmente,

da capacidade de alinhar instrumentos econômicos, estabilidade regulatória e coordenação institucional. Sem esse alinhamento, há o risco de que o país permaneça apenas como fornecedor potencial de recursos, sem consolidar uma cadeia produtiva competitiva e integrada ao mercado global de combustíveis sustentáveis de aviação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). OACI reconhece a sustentabilidade do etanol de milho brasileiro para produção de SAF. Brasília, 04 jul. 2025d. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2025/oaci-reconhece-a-sustentabilidade-do-etanol-de-milho-brasileiro-para-producao-de-saf>. Acesso em: 24 out. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). *Relatórios e apresentações do GT Regulação do Mandato e Certificação do SAF*. Brasília: ANAC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac>. Acesso em: 23 out. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Relatório técnico sobre rotas de SAF e certificação*. Rio de Janeiro: ANP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp>. Acesso em: 23 out. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Relatório técnico sobre o ProBioQAV*. Rio de Janeiro, 2025.
- AGROICONE. *Apresentação na 4ª Reunião do GT Certificação e Qualidade – Conexão SAF*. Brasília, 2025.
- AIR FRANCE-KLM. *Sustainability Statement 2024*. Paris: Air France-KLM, 2024. Disponível em: <https://www.airfranceklm.com>. Acesso em: 18 set. 2025.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Conexão SAF. Brasília: ANAC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/conexao-saf>. Acesso em: 10 jun 2025.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil – 2019. Brasília: ANAC, 2019.
- ANAC. Brazil's Action Plan on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Aviation. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 2023.
- ANAC. Painel interativo Power BI sobre demanda doméstica em RPK. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDI3ZjQxZDI0MjY2MC00NzNhLTk1ZjUtN2MwNmZmZmNiNGE1IiwidCI6ImI1NzQ4ZjZlLW10YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiJ9>. Acesso em: 28 ago. 2025b.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Produção e uso de combustível sustentável de aviação (SAF) vai à sanção presidencial. 18 set. 2024. Disponível em: <Produção e uso de combustível sustentável de aviação (SAF) vai à sanção presidencial — Agência Nacional de Aviação Civil (Anac)> acesso em 4 out. 2025.
- ANAC. *OACI reconhece a sustentabilidade do etanol de milho brasileiro para produção de SAF*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2025/oaci-reconhece-a-sustentabilidade-do-etanol-de-milho-brasileiro-para-producao-de-saf>. Acesso em: 22 out. 2025.
- ANP. *Resolução nº 935, de 22 de dezembro de 2023*. Dispõe sobre a especificação do querosene de aviação (QAV). Rio de Janeiro: ANP, 2023.

AMERICAN AIRLINES. *Sustainability Report 2024*. Dallas: American Airlines Group, 2024. Disponível em: <<https://www.aa.com>>. Acesso em: 18 set. 2025.

AVIATION BENEFITS. Producing sustainable aviation fuel. Air Transport Action Group, 2023. Disponível em: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel/producing-sustainable-aviation-fuel/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

AZUL. *ESG e Relatório de Sustentabilidade 2025*. Barueri: Azul Linhas Aéreas Brasileiras, 2025. Disponível em: <<https://ri.voeazul.com.br>>. Acesso em: 18 set. 2025.

BAIN & COMPANY. Quais são os principais desafios da descarbonização na aviação?. Exame, 2023. Disponível em: <<https://exame.com/inovacao/quais-sao-os-principais-desafios-da-descarbonizacao-na-aviacao-estudo-da-bain-company-explica/>>. Acesso em: 11 jun 2025.

BANCO MUNDIAL. Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o Brasil - 2023. Washington, D.C.: Grupo Banco Mundial, 2023.

BANCO MUNDIAL. *World Energy Outlook and Biofuels Markets*. Washington, D.C.: The World Bank, 2024. Disponível em: <https://www.worldbank.org>. Acesso em: 23 out. 2025.

BARANZINI, Andrea; VAN DEN BERGH, Jeroen C. J. M.; CARATTINI, Stefano; HOWARTH, Richard B.; PADILLA, Emilio; ROCA, Jordi. Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *WIREs Climate Change*, Hoboken, v. 8, n. 4, 2017. DOI: 10.1002/wcc.462.

BARANZINI, Andrea; CARATTINI, Stefano; PIGLIARU, Francesco. Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, [S.l.], v. 8, n. 4, p. e462, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.462>

BARRETT, Steven R. H. et al. Impact of aircraft cruise altitude on climate forcing and air quality. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 6, 064012, 2019. DOI: 10.1088/1748-9326/ab1e3a.

BID. *Descarbonización sostenible de la aviación en América Latina*. Washington: BID, 2024.

BNDES. *Apresentação da Chamada Pública BNDES/FINEP – SAF e Combustíveis Marítimos Sustentáveis*. Rio de Janeiro: BNDES, 2025.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Fundo Clima: financiamento a projetos de mitigação das mudanças climáticas. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima>. Acesso em: 10 mar. 2026.

BOEING; EMBRAER; FAPESP; UNICAMP. Plano de Voo para Biocombustíveis de Aviação no Brasil: Plano de Ação. São Paulo, 2013.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 2024. Institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProbioQAV). Brasília, 2024.

BRASIL. Presidente sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável. Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República, 8 out. 2024. Disponível em: < <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/10/presidente-lula-sanciona-lei-do-combustivel-do-futuro-para-promover-a-mobilidade-sustentavel> > Acesso em 4 out. 2025.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projeto aprovado prevê incentivo a combustível sustentável na aviação. 13 mar. 2024. Disponível em:< <https://www.camara.leg.br/noticias/1043435-PROJETO-APROVADO-PELA-CAMARA-PREVE-INCENTIVO-A-COMBUSTIVEL-SUSTENTAVEL-NA-AVIACAO>> > Acesso em 4 out. 2025.

CAMEX. *7ª Reunião GT Incentivos e Financiamento – Janela Única de Investimentos*. Brasília: CAMEX, 2025.

CLIMATE WATCH. Greenhouse Gas (GHG) Emissions – Brazil, China, India, Russia, United States. Washington, DC: World Resources Institute, 2025. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 19 jul. 2025.

COSTANZA, Robert; D'ARGE, Ralph; DE GROOT, Rudolf et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, Londres, v. 387, n. 6630, p. 253-260, 1997.

CRAMTON, Peter; OCKENFELS, Axel; STOTZ, Christian. An international carbon-price commitment promotes cooperation. *Economics of Energy & Environmental Policy*, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 51-64, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5547/2160-5890.6.2.pera>.

CZPE/MDIC. *Zonas de Processamento de Exportação e Investimentos Sustentáveis*. Brasília: MDIC, 2025.

DALY, Herman E. *Beyond growth: The economics of sustainable development*. Boston: Beacon Press, 1996.

DALY, Herman E. *Uneconomic Growth: in Theory, in Fact, in History, and in Relation to Globalization*. Saint John's University, 1999. Clemens Lecture Series.

DALY, Herman E.; COBB, John B.; COBB, Clifford W. *For the Common Good: Redirecting the Economy toward Community, the Environment, and a Sustainable Future*. 2. ed. Boston: Beacon Press, 1994.

DELTA AIR LINES. *Delta Difference Report 2024*. Atlanta: Delta Air Lines, 2024. Disponível em: <<https://esghub.delta.com>>. Acesso em: 18 set. 2025.

DIETZ, Thomas; SHWOM, Rachael L.; WHITLEY, Cameron T. Climate Change and Society. *Annual Review of Sociology*, Palo Alto, v. 46, p. 135-158, 2020. DOI: 10.1146/annurev-soc-121919-054614.

DIETZ, S.; STERN, N. Endogenous growth, convexity of damage and climate risk. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2015.

DIETZ, S. et al. *Climate change and economic policy*. 2020.

DIESENDORF, Mark. *Sustainable energy solutions for climate change*. 2. ed. London: Routledge, 2024.

DRUPP, M. et al. *Discounting and climate policy*. 2023.

EDGAR. Global Greenhouse Gas Emissions Report 2025.

EMBRAER. *Análise Tributária sobre Importação e Produção de SAFs no Brasil*. São José dos Campos: Embraer, 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Projeções de matérias-primas para biocombustíveis avançados e SAF*. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agroenergia>. Acesso em: 23 out. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Sustainable Aviation Fuels in Brazil. 2024. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_SUSTAINABLE%20AVIATION%20FUELS%20_EPE.pdf > Acesso em 4 out. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota de Esclarecimentos – Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024). 10 fev. 2025. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-873/topico-745/Nota%20de%20Esclarecimentos%20-%20EPE_Combust%C3%ADvel%20do%20Futuro.pdf > Acesso em 4 out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Notas técnicas sobre metas de SAF no âmbito do ProBioQAV*. Brasília, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2033 e Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 23 out. 2025.

FAZENDA (Ministério da). *Plano de Transformação Ecológica*. Brasília: Ministério da Fazenda, 2025.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. The entropy law and the economic process. Cambridge: Harvard University Press, 1971.

GIERENS K., SAUSEN, R., BAUDER, U., ECKEL, G. et al. (2024). “Influence of aviation fuel composition on the formation and lifetime of contrails – a literature review.” Report prepared for Concawe Special Task Force on Aviation Fuels (FE/STF-28). Report number 1/24, https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_24-1-1-Copy-2.pdf. Acesso: 12 jun, 2025.

GILLENWATER, M. What is additionality? Part 1: A long standing problem. *Greenhouse Gas Management Institute Discussion Paper*, n. 001, 2012.

GLOBAL CARBON ATLAS. Carbon Emissions. Paris: Global Carbon Project, 2024. Disponível em: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions>. Acesso em: 19 jul. 2025.

GOL LINHAS AÉREAS. *Apresentação na 6ª Reunião do GT de Regulação do Mandato para Operadores Aéreos*. Brasília, 10 abr. 2025.

GOL LINHAS AÉREAS. *Relatório ESG 2025*. São Paulo: GOL Linhas Aéreas Inteligentes, 2025. Disponível em: <<https://ri.voegol.com.br>>. Acesso em: 18 set. 2025.

GOULDER, Lawrence H.; SCHEIN, Andrew R. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. *Climate Change Economics*, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 1350020, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1142/S2010007813500203>.

HEAL, G.; MILLNER, A. Uncertainty and decision making in climate change economics. *Review of Environmental Economics and Policy*, Oxford, v. 8, n. 1, p. 120–137, 2014.

HOWARD, A.; HOOD, C. *Tracking progress towards net zero: The role of carbon markets and Article 6*. OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers, Paris: OECD, 2020.

IATA – International Air Transport Association. Zero emissão líquida de carbono até 2050. Boston: IATA, 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/2021-10-04-03-pt.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2025.

IATA. Resolution on the Industry's Commitment to Reach Net Zero Carbon Emissions by 2050. 77th Annual General Meeting, Boston, 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

ICAO – International Civil Aviation Organization. CORSIA Implementation. Montreal: ICAO, 2019.

ICAO – International Civil Aviation Organization. Guidance on SAF policies - Version 3. ICAO Committee on Aviation Environmental Protection, outubro de 2024.

ICROA – INTERNATIONAL CARBON REDUCTION AND OFFSET ALLIANCE. Unlocking the Voluntary Carbon Market to Support Aviation's Net-Zero Ambition. Londres: ICROA, 2022. Disponível em: <https://www.icroa.org>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IEABIOENERGY. Sustainable Aviation Fuel: Status, Challenges and Outlook. Task 39, 2024. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (INPI). *Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF): pedidos de patente no Brasil e no mundo (Radar Tecnológico)*. Rio de Janeiro: INPI, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/radares-tecnologicos>. Acesso em: 19 mar. 2026

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). *Fueling Net Zero: SAF Outlook 2024–2025*. Montreal: IATA, 2025. Disponível em: <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>. Acesso em: 23 out. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *Long-Term Aspirational Goal (LTAG) for Net-Zero Aviation*. Montreal: ICAO, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>. Acesso em: 23 out. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Net Zero CO₂ Emissions by 2050: A global roadmap. Montreal: IATA, 2022. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/2ffb87c8fcf740f1ae2b631cf3eb8e3f/net-zero-roadmap.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Net Zero CO₂ Emissions by 2050: Roadmap. 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/en/programs/environment/net-zero/> Acesso: 27 mar 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Net Zero CO₂ Emissions by 2050: Roadmap. 2025. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/2ffb87c8fcf740f1ae2b631cf3eb8e3f/net-zero-roadmap.pdf>. Acesso em: jul. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Sustainable Aviation Fuels: Technical Certifications. 2022. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. The non-CO₂ climate co-benefit of SAF and other fuels with low aromatic and sulfur content: current scientific knowledge and challenges. Montreal: IATA, maio 2025b. Disponível em: <https://www.iata.org/>. Acesso em: 18 set. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). CORSIA Eligible Fuels. 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>. Acesso em: 05 jul. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). CORSIA Implementation Elements. 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/>. Acesso em: 05 jul. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Environmental Protection – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Montreal: ICAO, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *Report on the Feasibility of a Long-Term Aspirational Goal (LTAG) for International Civil Aviation CO₂ Emission Reductions*. Montreal: ICAO, 2022. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/default.aspx>. Acesso em: 23 out. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Sustainable Aviation Fuels Guide. Montreal: ICAO, 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Why and how to bring down the cost of sustainable aviation fuels. Washington, DC, 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy efficiency. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency> . Acesso em: 20 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Hydrogen in Aviation: Cutting carbon emissions while enabling air mobility. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-aviation>. Acesso em: 22 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Tracking Clean Energy Progress – Sustainable Aviation Fuels. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-sustainable-aviation-fuels-2024>. Acesso em: 10 jul.

2025. IBP. *Relatório Final – GT Infraestrutura e Distribuição*. Rio de Janeiro: IBP, 2025.
- IATA. *Sustainable Aviation Fuel: Global Outlook 2025*. Montreal: IATA, 2025.
- ICAO. *CORSIA Implementation Plan 2024–2035*. Montreal: ICAO, 2024.
- JACKSON, R. B. et al. Drivers of Declining CO₂ Emissions in 18 Developed Economies. *Nature Climate Change*, v. 9, p. 213–217, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0419-7>. Acesso 05 jul. 2025.
- JACKSON, R. B. et al. Global Energy Growth Is Outpacing Decarbonization. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9468>. Acesso em: 19 jul. 2025.
- JAKOB, M. et al. Feasible mitigation actions in developing countries. *Nature Climate Change*, London, v. 4, n. 11, p. 961–968, 2014.
- JET A-1 FUEL. Jet fuel price overview and global aviation fuel data. 2024. Disponível em: <https://jet-a1-fuel.com>. Acesso em: 6 mar. 2026.
- KEMP, Luke et al. Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *PNAS*, v. 119, n. 34, e2108146119, 2022. DOI: 10.1073/pnas.2108146119.
- KOLBERT, E. *The Sixth Extinction: An Unnatural History*. New York: Henry Holt, 2014.
- KOLBERT, E. *Under a White Sky: The Nature of the Future*. New York: Crown Publishing Group, 2021.
- LATAM AIRLINES BRASIL. *Análise e recomendações sobre a Lei dos Combustíveis do Futuro*. Apresentação na 6ª Reunião do GT, Brasília, 10 abr. 2025.
- LATAM AIRLINES GROUP. *Relatório Anual Integrado 2024*. Santiago: LATAM Airlines, 2024. Disponível em: <<https://www.latamairlines.com>>. Acesso em: 18 set. 2025.
- LEE, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, v. 244, 117834, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>. Acesso em: 05 nov 2025.
- LUFTHANSA GROUP. *Sustainability Fact Sheet 2024/2025*. Frankfurt: Deutsche Lufthansa AG, 2024. Disponível em: <<https://www.lufthansagroup.com>>. Acesso em: 18 set. 2025.
- MACEDO, Anna Erika Colares. Pesquisa de campo sobre a implementação de SAF no Brasil: questionário estruturado com escala Likert aplicado a especialistas (n=53). Uberlândia: PPGE/UFU, 2025. Dados primários.
- MANN, M. E. *The New Climate War: The Fight to Take Back Our Planet*. New York: PublicAffairs, 2021. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/the-new-climate-war-the-fight-to-take-back-our-planet/>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- MANN, M. E. et al. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, v. 392, p. 779–787, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/33859>. Acesso 13. Jun. 2025.

MÄRKLE, R. S. et al. Powering aircraft with 100% sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 24, p. 3813–3837, 2024. DOI: 10.5194/acp-24-3813-2024.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT). *Paths to net-zero aviation: opportunities for Brazil*. Cambridge, 2025.

MAY, Peter H. *Economia ambiental e sustentabilidade: desafios para o século XXI*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

MERCOSUL. Secretaria de Energia Sustentável. *Relatório regional sobre biocombustíveis de aviação*. Montevideo: Mercosul, 2025. Disponível em: <https://www.mercosur.int>. Acesso em: 23 out. 2025

MDIC. *Estratégias para SAF no Brasil*. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Relatórios e atas do Grupo de Trabalho de Regulação do Mandato para Operadores Aéreos*. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 23 out. 2025.

MOORE, R. H. et al. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature* 543, 411–415 10oi.1038/nature21420. (2017).

NORDHAUS, W. D. To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect. *The Economic Journal*, London, v. 101, n. 407, p. 920–937, 1991.

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. *Políticas climáticas e precificação do carbono*. Paris: OCDE, 2024. Disponível em: <<https://www.oecd.org/environment/climate-change/>> Acesso em: 10 mai 2025.

OECD. *Fast-tracking Net Zero by Building Climate and Economic Resilience: A Summary for Policymakers*. Paris: OECD Publishing, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/f2c22c96-en>. Acesso em: 19 jul. 2025.

OECD. *Taxing Energy Use 2019: Using Taxes for Climate Action*. Paris: OECD Publishing, 2019. https://www.oecd.org/en/publications/taxing-energy-use-2019_058ca239-en.html.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Bioeconomy and Sustainable Aviation Fuel Report*. Paris: OECD Publishing, 2024. Disponível em: <https://www.oecd.org>. Acesso em: 23 out. 2025.

OCDE. *Aviation Decarbonisation and Policy Instruments in Emerging Economies*. Paris: OECD, 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *UNFCCC – Climate Finance Mechanisms and Low Carbon Fuels*. Nova York: United Nations, 2024. Disponível em: <https://unfccc.int>. Acesso em: 23 out. 2025

ONU. *Net-Zero Aviation Transition Report*. Nova York: United Nations, 2024.

PETROBRAS. *Apresentação Conexão SAF – 26 mar. 2025*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2025.

ÖZKAYNAK, Begüm; ADAMAN, Fikret; DEVINE, Pat. The identity of ecological economics: retrospects and prospects. *Cambridge Journal of Economics*, v. 36, n. 6, p. 1123–1142, 2012. Acesso em: 25 mai 2025..

PETROBRAS. Apresentação na 5ª Reunião do GT de Regulação do Mandato para Operadores Aéreos. Brasília, 26 mar. 2025

PINDYCK, R. S. Climate change policy: What do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, Pittsburgh, v. 51, n. 3, p. 860–872, 2013.

PIZER, William A.; ALDY, Joseph E. Comparing emissions taxes and cap-and-trade under imperfect enforcement. *Journal of Environmental Economics and Management*, [S.l.], v. 71, p. 27-45, 2016.

PRIDDAT, B. Ecological economics and sustainability. 2025

PROQR. Estudo sobre Governança e Políticas Públicas de Incentivo à Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação. Brasília: ProQR, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-giz-lancam-estudo-201cgovernanca-e-politicas-publicas-de-incentivo-a-producao-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao201d>> . Acesso em: 10 jun 2025.

RAMOS M. SANTOS, Marilene. Instrumentos econômicos para a mitigação das mudanças climáticas. São Paulo: Editora Atlas, 2019.

REFINABRASIL. *Desafios e Oportunidades do SAF no Brasil*. São Paulo: RefinaBrasil, 2025.

REPSOL OPEN ROOM. Desafios tecnológicos para a descarbonização do transporte aéreo. 2024. Disponível em:<
<https://openroom.fundacionrepsol.com/pt/conteudos/retos-tecnologicos-para-la-descarbonizacion-del-transporte-aereo/>>. Acesso em 11 de jun de 2025.

ROCKSTRÖM, Johan; STEFFEN, Will; NOONE, Kevin et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, Londres, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009. DOI: 10.1038/461472a.

SACHS, Jeffrey D. et al. Implementing the Paris Agreement: issues for developing countries. *Climate Policy*, [S.l.], v. 19, n. 5, p. 571-586, 2019.

SANTOS, R. Créditos de carbono e regulação ambiental. 2019.

SCHNEIDER, L.; LA HOZ THEUER, S. Environmental integrity of international carbon market mechanisms under the Paris Agreement. *Climate Policy*, v. 19, n. 3, p. 386–400, 2019.

SITA. *Solving the Sustainable Aviation Fuel Puzzle: A Field Report for Airline Sustainability Leaders*. Bruxelas: SITA, 2025.

STAVINS, Robert N. The future of US carbon-pricing policy. *Environmental and Energy Policy and the Economy*, [S.l.], v. 1, p. 8-64, 2019.

STERN, Nicholas. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

STIGLITZ, J. E.; STERN, N. Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. Carbon Pricing Leadership Coalition, Washington, D.C., 2017.

TOPSOE. *Viabilizando Projetos de SAF via Otimização Tributária*. São Paulo: Topsoe, 2025.

UNEM. *Estudo Tributário sobre SAF no Brasil*. Brasília: UNEM, 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. Acordo de Paris. Paris: UNFCCC, 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.> Acesso em: 10 mai 2025.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. Protocolo de Quioto. Quioto: UNFCCC, 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/kyoto_protocol.> Acesso em: 10 mai 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Conference of the Parties (COP) Reports. 1997–2024. Disponível em: <https://unfccc.int/>. Acesso em 05 jul. 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). The Paris Agreement. Bonn: UNFCCC Secretariat, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. . Acesso em: 20 jul. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. European Green Deal: Estratégia para a neutralidade climática até 2050. Bruxelas: União Europeia, 2024. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en.> Acesso em: 10 mai 2025.

UNITED AIRLINES. Corporate Impact Report 2024. Chicago: United Airlines, 2024. Disponível em: <<https://corporateimpact.united.com>>. Acesso em: 18 set. 2025.

VEIGA NETO, Fernando César da. Políticas públicas e mercado de carbono: limites e possibilidades. Brasília: Ipea, 2018.

VIBRA ENERGIA. Apresentação na 3ª Reunião do GT de Regulação do Mandato para Operadores Aéreos. Brasília, 31 jan. 2025.

VIBRA ENERGIA. Operação SAF e Modelo Book & Claim. Rio de Janeiro: Vibra Energia, 2025.

VOIGT, Christiane et al. Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. *Communications Earth & Environment*, v. 2, n. 114, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00174-y>. Acesso em: 11 nov 2025.

WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing 2020. Washington, DC: World Bank, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33809>. Acesso em: 15 set. 2025.

APÊNDICES

Apêndice A – Questionário aplicado a pesquisa de campo.

Segue uma reprodução do questionário utilizado durante a pesquisa de campo. O questionário foi formulado utilizando a ferramenta *Google Forms* e enviado aos especialistas dos setores identificados no mapeamento do estudo:

A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do seguimento de aviação civil brasileiro.

Esta é uma pesquisa acadêmica vinculada à dissertação de mestrado de Anna Erika Colares Macedo (PPG Economia/UFU), orientada por Prof. Dr. Cássio Garcia Ribeiro de S. Silva.

O objetivo é compreender percepções de reguladores, produtores/distribuidores e usuários estratégicos (companhias aéreas e fabricantes) sobre desafios e caminhos para a adoção de SAF no Brasil.

- Tempo de resposta: ~7–10 minutos.
- Participação voluntária e anônima.
- Não coletamos dados pessoais sensíveis; as respostas serão analisadas em conjunto, apenas para fins acadêmicos.
- Em caso de dúvidas ou desistência a qualquer tempo entre em contato pelo e-mail: anna.macedo@ufu.br.

Agradecemos sua colaboração — sua experiência é essencial para qualificar este estudo.

* Indica uma pergunta obrigatória

1 TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada: “A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do seguimento de aviação civil brasileiro”. A pesquisa está sob a orientação do professor Dr. Cássio Garcia Ribeiro de S. Silva e realizada pela discente do Curso de Mestrado em Economia, Anna Erika Colares Macedo. Nesta pesquisa nós estamos buscando analisar as perspectivas e os caminhos para a implementação de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) no Brasil, considerando o programa nacional ProbioQAV e seu alinhamento com as metas de organizações internacionais nos esforços de descarbonização no setor aeronáutico global. Termo/Registro de Consentimento Livre e Esclarecido está sendo obtido de forma virtual antes do início da sua participação na pesquisa e coleta de dados pela pesquisadora Anna Erika Colares Macedo, através de avaliação do projeto nos meses de agosto a novembro de 2025 pelo Comitê de Ética e Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Antes de concordar em participar da pesquisa, você pode entrar em contato com os(as) pesquisadores(as), em tempo real, pelo e-mail anna.macedo@ufu.br, para discutir as informações do estudo. Você tem o tempo que

for necessário para decidir se quer ou não participar da pesquisa (conforme item IV da Resolução nº 466/2012 ou Capítulo. III da Resolução nº 510/2016). A sua participação, consiste na resposta do questionário (este validado pelo comitê de ética) que será enviado através do email dos especialistas do setor aéreo, energético e ambiental, com o link de acesso do Google Forms, para que assim possa fornecer elementos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa empírica. O questionário é composto dos seguintes blocos: I- Perguntas Demográficas; II- Bloco Comum de perguntas gerais; III- Blocos específicos para cada um dos atores conforme resposta inicial nas perguntas demográficas. É importante ressaltar que o questionário é aplicado utilizando a escala Likert como instrumento de coleta de dados. Essa escala permite a você, participante, expressar seu grau de concordância em relação a diferentes afirmações, por meio de uma pontuação que irá variar de 1 a 5, sendo: 1 = Discordo totalmente, 2 = Discordo parcialmente, 3 = Neutro, 4 = Concordo parcialmente e 5 = Concordo totalmente, com um tempo estimado para responder o questionário em torno de 7 a 10 minutos. Você tem o direito de não responder a qualquer questão, sem necessidade de explicação ou justificativa para tal. As perguntas obrigatórias terão uma opção de resposta escrito “prefiro não responder”. Você não terá nenhum gasto nem ganho financeiro por participar na pesquisa. Em nenhum momento você será identificado. Os resultados da pesquisa serão publicados e ainda assim a sua identidade será preservada. É compromisso do pesquisador responsável a divulgação dos resultados da pesquisa, em formato acessível ao grupo ou população que foi pesquisada (Resolução CNS nº 510 de 2016, Artigo 3º, inciso IV). Nós, pesquisadores, atenderemos às orientações das Resoluções nº 466/2012, Capítulo XI, Item XI.2:

f e nº 510/2016, Capítulo VI, Art. 28: IV - manter os dados da pesquisa em arquivo, físico ou digital, sob nossa guarda e responsabilidade, por um período mínimo de 5 (cinco) anos após o término da pesquisa. Os riscos físicos são mínimos ao participar da pesquisa, podendo haver riscos da seguinte natureza: medo de não saber, de ser identificado ou relacionado a possibilidade de constrangimento reputacional, considerando o teor profissional das respostas e a eventual identificação indireta pela categoria ocupacional dos participantes. Para mitigar Rubrica do(a) Participante Rubrica do(a) Pesquisador(a) 1/3 Página 2 de 3 esses riscos, todos os dados serão apresentados de forma agregada, sem qualquer identificação individual direta ou indireta. É importante salientar que a elaboração do questionário passou por rigorosas avaliações por membros da academia, para que os termos utilizados fossem passíveis de resposta, reduzindo a possibilidade de dúvidas. Quanto ao anonimato do indivíduo e da empresa são resguardados por lei, passando antes também por uma rigorosa avaliação do conselho de ética. Adicionalmente, por se tratar de uma pesquisa realizada em ambiente virtual, reconhecem-se os riscos inerentes às limitações tecnológicas, como vulnerabilidades de sistemas, interceptação de dados ou acesso não autorizado às informações. Para minimizar esses riscos, os dados serão armazenados em ambiente seguro e criptografado, com acesso restrito à pesquisadora responsável e uso exclusivo para fins científicos. Além disso, é importante que você tenha todo o cuidado com a segurança e privacidade do local quando realizar o acesso às etapas virtuais da pesquisa para que sejam garantidos o sigilo e a confidencialidade necessários. Antes, durante ou após o consentimento ou a coleta de dados, informe ao(à) pesquisador(a) quaisquer condições adversas, como entradas inesperadas de pessoas no ambiente. Os benefícios serão: diretamente, a contribuição com o avanço do conhecimento científico sobre políticas públicas e sustentabilidade no setor

aeronáutico. Indiretamente, a pesquisa pode influenciar estratégias nacionais e fomentar discussões sobre a inserção do Brasil como produtor de SAF, promovendo inovação e desenvolvimento regional sustentável. Também se espera que com a aplicação dessa pesquisa possa gerar Network, elos entre setor privado e público para possíveis parcerias. Você é livre para deixar de participar da pesquisa a qualquer momento sem qualquer prejuízo ou coação. Até o momento da divulgação dos resultados, você também é livre para solicitar a retirada dos seus dados da pesquisa enviando e-mail para o endereço eletrônico anna.macedo@ufu.br. Uma via original deste Termo de Consentimento Livre e

Esclarecido ficará com você, assinada e rubricada pelos(as) pesquisadores(as). Termo de Consentimento Livre e Esclarecido deve ser salvo nos seus arquivos clicando no link [Insira aqui o link]. Este Termo está assinado pelo(a) pesquisador(a) responsável e contém seu telefone e endereço de contato para que você possa tirar dúvidas sobre o projeto e sua participação. Em qualquer momento, caso tenha qualquer dúvida ou reclamação a respeito da pesquisa, você poderá entrar em contato o pesquisador responsável: Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva que está vinculado a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), endereçada na Av. João Naves de Ávila, nº2121, bloco J, Campus Santa Mônica – Uberlândia – Minas Gerais- MG. Fone: (34) 3230-9560, e-mail:

cassiogarcia@ufu.br ou ainda, a pesquisadora assistente Anna Erika Colares Macedo, mesma instituição, por meio do e-mail: anna.macedo@ufu.br. Havendo algum dano decorrente da pesquisa, você tem direito a solicitar indenização através das vias judiciais (Código Civil, Lei 10.406/2002, Artigos 927 a 954 e Resolução CNS nº 510 de 2016, Artigo 19). Para obter orientações quanto aos direitos dos(as) participantes de pesquisa, acesse a cartilha disponível no link: https://propp.ufu.br/sites/propp.ufu.br/files/media/documento/cartilha_dos_direitos_dos_participantes_de_pesquisa.pdf Você poderá também entrar em contato com o Comitê de Ética na Pesquisa com Seres Humanos – CEP, da Universidade Federal de Uberlândia, localizado na Av. João Naves de Ávila, nº 2121, bloco A, sala 224, campus Santa Mônica – Uberlândia/MG, Rubrica do(a) Participante Rubrica do(a) Pesquisador(a) 2/3 Página 3 de 3 38408-100; pelo telefone (34) 3239-4131; ou pelo e-mail cep@propp.ufu.br. O CEP/UFU é um colegiado independente criado para defender os interesses dos(as) participantes das pesquisas em sua integridade e dignidade e para contribuir para o desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos conforme resoluções do Conselho Nacional de Saúde.

Exemplo: 7 de janeiro de 2019

Pergunta de consentimento (obrigatória) *

Você declara ter recebido o TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E

ESCLARECIDO (TCLE) previamente, bem como ter lido as informações acima e concorda em participar desta pesquisa? *Marcar apenas uma oval.*

☐

Sim, concordo em participar.

Não

☐

concordo em participar.

Seção sem título

Perguntas demográficas *

D1. Tipo de organização em que você atua (obrigatória) *Marcar apenas uma oval.*

- ☐ Órgão regulador/formulador de política Produtor(a)/biorrefinaria de SAF
- ☐ Distribuidora/logística de combustíveis
- ☐ Companhia aérea
- ☐ Fabricante de aeronaves
- ☐ Operador/aeroporto
- ☐ Consultoria/ONG/associação setorial
- ☐ Instituição de pesquisa/universidade
- ☐ Financiamento/agência de fomento
- ☐ Prefiro não responder Outro:
- ☐ _____

D2. ☐ Sua função/cargo (obrigatória) * *Marcar apenas uma oval.*

- Alta ☒ direção / Diretoria
- ☐ Gerência
- ☐ Especialista técnico(a) / Engenheiro(a) / Pesquisador(a)
- ☐ Analista / Coordenador(a)
- ☐ Operacional / Campo Prefiro não responder
- ☐ Outro:
- ☐ _____

D3. ☐ Tempo de experiência no setor de aviação/energia (obrigatória) *

Marcar apenas uma oval.

- 0-3 ☐ anos
- 4-7 ☐ anos
- 8- ☐ 15 anos
- 16 ☐ anos ou mais
- ☐ Prefiro não responder

Responda as perguntas do questionário a seguir usando a escala Likert (para todas as afirmativas):

1= Discordo totalmente

2= Discordo parcialmente

3= Neutro

4= Concordo parcialmente

5= Concordo totalmente

Bloco comum (todos)

10 itens

C1) Sem mecanismos robustos de precificação de carbono e instrumentos* complementares, a adoção de SAF em escala no Brasil ficará aquém das metas 2030 2050.

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C2) ProBioQAV e CORSIA estão suficientemente alinhados (regras de elegibilidade e sistemas de medição e verificação) para evitar dupla contagem e dar previsibilidade ao investimento. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C3) A expansão de SAF no Brasil conseguirá ocorrer sem pressões * socioambientais relevantes (uso da terra/competição por biomassa), dadas as salvaguardas regulatórias e tecnológicas vigentes. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C4) Estratégias para efeitos não-CO₂ (ex.: priorizar rotas com maior risco de * trilhas de condensação; redução de aromáticos/naftalenos) devem ser incorporadas às políticas e planos corporativos no curto prazo. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C5) O cronograma de certificações técnicas (padrões ASTM/ICAO e normas * nacionais) não será o principal gargalo para escalar SAF no Brasil. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C6) A infraestrutura aeroportuária (processos de mistura, segregação operacional e rastreabilidade) e os sistemas de medição e verificação estarão prontos a tempo de atender a demanda. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C7) Mesmo com crescimento da demanda aérea, SAF somado a ganhos de *

eficiência operacional/tecnológica será suficiente para reduzir as emissões totais do setor até 2050. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C8) A possibilidade de venda para mercados internacionais é determinante * para a viabilidade econômica da cadeia doméstica de SAF. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C9) A adoção de meios alternativos como o *Book and Climb* de SAF produzidos em outro país ou créditos de carbono pode desacelerar o desenvolvimento de tecnologia e desencorajar o investimento em P&D no

Brasil.

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

C10) As metas do CORSIA são viáveis para serem cumpridas pelas *

companhias aéreas até 2035, considerando o atual estágio da cadeia de suprimento de SAF no Brasil. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

Q0) Com qual grupo você se identifica? *

(Atenção: Responda apenas as perguntas bloco específico conforme escolha abaixo)

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Reguladores e formuladores de política *Pular para a pergunta 17*
- ☐ Produtores/distribuidores de SAF *Pular para a pergunta 27*
- ☐ Usuários estratégicos (companhias aéreas e fabricantes) *Pular para a pergunta 37*

Bloco específico — Reguladores e formuladores de política

10 itens

R1) As metas e instrumentos do ProBioQAV (cronograma, critérios de elegibilidade, metas graduais) dão previsibilidade suficiente para investimento privado em SAF.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R2) É necessária uma combinação de instrumentos (exigências de teor de mistura, mecanismos que garantam demanda como compromissos de compra, incentivos tributários, mecanismos de estabilização de preço) para reduzir a diferença de custo do SAF. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R3) Há coordenação efetiva entre os órgãos responsáveis por aviação e energia na implementação regulatória do SAF. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R4) Critérios de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida devem condicionar incentivos públicos, para evitar apoio a soluções de baixo impacto líquido e dependência tecnológica de longo prazo. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R5) A política pública deve prever medidas de curto prazo para mitigar trilhas de condensação (ajustes de rota/altitude; combustíveis com menor teor de aromáticos), enquanto a oferta de SAF escala. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R6) O desenho da política de SAF contribui para uma transição justa (emprego regional, qualificação, inserção de MPMEs da bioeconomia). *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R7) O país está preparado para convergir com padrões internacionais de certificação/elegibilidade e, assim, acessar mercados externos. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

R8) Avaliações periódicas de custo-benefício e efetividade climática devem ajustar metas e instrumentos de SAF ao longo do tempo. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

R9) A política brasileira para SAF está suficientemente estruturada para acompanhar as mudanças nas exigências internacionais até 2050. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

R10) O alinhamento do Brasil às metas voluntárias globais da iniciativa Fly Net Zero fortalece a credibilidade do país perante o mercado internacional de aviação.

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

Bloco específico — Produtores/distribuidores de SAF

10 itens

P1) A segurança de suprimento de matérias-primas sustentáveis no Brasil é suficiente para contratos de longo prazo, sem riscos materiais de mudança indireta de uso da terra (ILUC) ou pressão sobre alimentos. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

P2) A infraestrutura atual (refino/biorrefino, terminais, dutos, armazenagem) pode ser adaptada para SAF com investimento inicial e prazos factíveis. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

P3) Há previsibilidade regulatória e de demanda (contratos de fornecimento de longo prazo) suficiente para viabilizar novos projetos/rotas (HEFA, FT, ATJ). *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

P4) O acesso a hidrogênio e eletricidade renovável a custos competitivos permitirá o avanço de rotas sintéticas de baixo carbono no médio prazo. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P5) A cadeia atende (ou atenderá) requisitos de rastreabilidade e sistemas de medição e verificação compatíveis com CORSIA e com exigências de mercados externos.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P6) Parcerias internacionais e projetos-piloto reduzem risco tecnológico e aceleram a curva de aprendizado. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P7) O custo do SAF no Brasil tem trajetória clara de redução (economias de escala/escopo, aprendizado). *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P8) O setor produtivo brasileiro conseguirá atender a demanda doméstica e acessar mercados internacionais com padrões de qualidade e sustentabilidade.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P9) Existe articulação eficaz entre produtores/distribuidores de SAF e órgãos reguladores como ANP, ANAC, MME e MAPA. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

P10) O processo de certificação de rotas tecnológicas para SAF no Brasil é claro, acessível e alinhado com os critérios internacionais da ASTM e da ICAO. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Bloco específico — Usuários estratégicos (companhias aéreas e fabricantes)

10 itens

U1) A disponibilidade prevista de SAF no Brasil é suficiente para os planos de expansão das companhias até 2050, sem risco sistêmico de ruptura de abastecimento.

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

U2) A certificação para uso de SAF (Embraer e fabricantes internacionais cujos modelos operam no Brasil) evolui em ritmo compatível com as metas setoriais.

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

U3) A logística de abastecimento em aeroportos brasileiros poderá integrar SAF sem gerar gargalos operacionais ou aumentos expressivos no custo unitário. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

U4) O planejamento de renovação/adaptação de frota incorpora, de forma material, a transição para alto teor de SAF. *Marcar apenas uma oval.*

2	3	4	5
☐	☐	☐	☐

U5) Estratégias de mitigação de trilhas de condensação (ajustes de rota/altitude; combustíveis com menor teor de aromáticos) serão adotadas por motivos climáticos e econômicos (gestão de risco). *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

U6) Contratos de fornecimento de longo prazo e mecanismos de proteção contra volatilidade de preços serão necessários para mitigar oscilações do custo do SAF e proteger margens. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
☐	☐	☐	☐	☐

U7) O uso de SAF gerará vantagem competitiva (acesso a mercados/slots, preferência de clientes com exigências de sustentabilidade, condições de financiamento), além do cumprimento regulatório. *Marcar apenas uma oval.*

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

☐	☐	☐	☐	☐
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

U8) A incorporação de rastreabilidade e sistemas de medição e verificação na operação (do fornecimento ao consumo) é viável sem onerar desproporcionalmente processos de linha/manutenção. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐	☐	☐	☐	☐
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

U9) Os incentivos regulatórios e financeiros oferecidos pelo governo brasileiro são adequados para estimular o consumo e o uso de SAF. *Marcar apenas uma oval.*

1 2 3 4 5

☐	☐	☐	☐	☐
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

U10) A parceria entre fabricantes de aeronaves e fornecedores de motores não é determinante para viabilizar o uso crescente de combustíveis sustentáveis no curto e médio prazo.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

☐	☐	☐	☐	☐
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Apêndice B – Modelo genérico de convite à participação da pesquisa.

Título do e-mail: Convite para participação em pesquisa sobre Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF)

Corpo do e-mail:

Prezado(a),

Espero que esta mensagem o(a) encontre bem.

Gostaria de convidá-lo(a) a participar da pesquisa intitulada “A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do segmento de aviação civil brasileiro”, conduzida por mim, Anna Erika Colares Macedo, como mestranda sob orientação do Prof. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva, no Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A pesquisa analisa a transição energética no setor aeronáutico, com foco na implementação dos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) no Brasil. Sua experiência profissional é essencial para aprimorar a qualidade e a profundidade dos resultados.

O questionário pode ser acessado no link abaixo:

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdwlHWfn85zs-ZQ36V81AcRsjo1btcAqrNOIqN2DqabsUUH0g/viewform>

O preenchimento leva aproximadamente 7 a 10 minutos e a participação é voluntária, anônima e fundamental para o avanço deste estudo.

Para garantir total transparência, seguem anexos a esta mensagem:

- Parecer consubstanciado do Comitê de Ética em Pesquisa da UFU, referente à aprovação do projeto;
- Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
- Carta de apresentação do orientador, contendo informações gerais sobre o estudo.

Agradecemos desde já sua atenção e contribuição. Permanecemos à disposição para quaisquer esclarecimentos.

Atenciosamente,

Anna Erika Colares Macedo

Pesquisadora – Mestrado em Economia (UFU)

Prof. Cássio Garcia Ribeiro Soares da Silva

Orientador da Pesquisa – IERI/UFU

ANEXOS

Anexo 1. Parecer do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP/UFU)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA 																
PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP																
DADOS DO PROJETO DE PESQUISA Título da Pesquisa: A descarbonização do setor aéreo: desafios e perspectivas do seguimento de aviação civil brasileiro Pesquisador: CASSIO GARCIA RIBEIRO SOARES DA SILVA Área Temática: Versão: 2 CAAE: 91495925.0.0000.5152 Instituição Proponente: Instituto de Economia e Relações Internacionais Patrocinador Principal: Financiamento Próprio DADOS DO PARECER Número do Parecer: 8.013.085 Apresentação do Projeto: Este parecer trata-se da análise das respostas às pendências do referido projeto de pesquisa. As informações elencadas nos campos "Apresentação do Projeto", "Objetivo da Pesquisa" e "Avaliação dos Riscos e Benefícios" foram retiradas dos documentos Informações Básicas da Pesquisa nº 2621749 e Projeto Detalhado (projeto_para_CEP_adequado_Pendencias.pdf), postados, respectivamente, em 03/11/2025. INTRODUÇÃO A presente pesquisa aborda a transição energética no setor aeronáutico, com foco na implementação dos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (Sustainable Aviation Fuel - SAF) no Brasil. Em contexto de intensificação das políticas globais de enfrentamento às mudanças climáticas, programas como o Acordo de Paris, o CORSIA (OACI) e o Fly Net Zero (IATA) estabelecem metas e instrumentos para descarbonização do transporte aéreo internacional. No âmbito nacional, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), instituído pela Lei nº 14.993/2024, estabelece diretrizes para inserção gradativa de SAF no																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="4">Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica</td> </tr> <tr> <td>Bairro: Santa Mônica</td> <td>CEP: 38.408-144</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>UF: MG</td> <td>Município: UBERLÂNDIA</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Telefone: (34)3239-4131</td> <td>Fax: (34)3239-4131</td> <td>E-: cep@propp.ufu.br</td> <td></td> </tr> </table>	Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica				Bairro: Santa Mônica	CEP: 38.408-144			UF: MG	Município: UBERLÂNDIA			Telefone: (34)3239-4131	Fax: (34)3239-4131	E-: cep@propp.ufu.br	
Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica																
Bairro: Santa Mônica	CEP: 38.408-144															
UF: MG	Município: UBERLÂNDIA															
Telefone: (34)3239-4131	Fax: (34)3239-4131	E-: cep@propp.ufu.br														

Continuação do Parecer: B.013.085

mercado.

METODOLOGIA

(A) Pesquisa/Estudo - Pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, com abordagem empírica por meio de questionário estruturado com escala Likert aplicada a especialistas do setor aéreo, energético e ambiental.

(B) Tamanho da amostra - A amostra será composta por aproximadamente 20 participantes, selecionados por amostragem intencional, considerando atuação comprovada e relevância expertise no tema. A definição da amostra justifica-se pela natureza especializada do objeto de estudo e pelo perfil estratégico dos respondentes. A definição da amostra envolve uma seleção de perfis altamente especializados e participativos na formulação da política pública.

(C) Recrutamento e abordagem dos participantes - Os participantes serão convidados via e-mail institucional ou profissional, com base em indicação, currículo e atuação comprovada no tema. A comunicação inicial informará objetivos, caráter voluntário, anonimato e procedimentos da pesquisa.

(D) Processo de consentimento - O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) será disponibilizado previamente, assinado de forma eletrônica. O participante poderá esclarecer dúvidas antes da adesão e terá liberdade para recusar ou se retirar da pesquisa a qualquer momento, sem prejuízo ou justificativa. A coleta só terá início após o aceite formal.

(E) Local e instrumento de coleta de dados / Experimento - A coleta será realizada de forma remota, por meio de formulário eletrônico (Google Forms). O questionário terá duração estimada de 7 a 10 minutos e conterá perguntas fechadas e afirmações em escala Likert sobre certificação, infraestrutura, políticas públicas, estratégias corporativas e desafios regulatórios do SAF no Brasil.

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E: cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: B.013.085

(F) Metodologia de análise dos dados - Os dados serão analisados por meio de análise descritiva, buscando padrões e tendências de percepção. Serão utilizadas métricas como frequência, média e desvio padrão, com auxílio de softwares como Excel, Eviews ou STATA. A análise será realizada em três etapas: pré-análise, exploração do material e interpretação à luz do referencial teórico.

(G) Desfecho Primário - O desfecho primário é analisar e compreender os desafios do programa nacional ProBioQAV, sob a ótica dos reguladores e formuladores da política, dos produtores e distribuidores do SAF, bem como dos seus usuários estratégicos. Em geral, é perceber como essas mudanças de transição energética ocorrerão e quais as perspectivas para o setor aeronáutico civil nacional no alcance das metas de sustentabilidade, que estão alinhadas, aos acordos internacionais e, sobretudo, aos objetivos do Acordo de Paris em que o Brasil é país signatário.

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO - Profissionais com atuação comprovada nos setores aeronáutico, energético, ambiental ou regulatório; Idade igual ou superior a 18 anos e Participação voluntária e aceite do TCLE.

CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO - Profissionais sem relação com a temática; Indivíduos menores de 18 anos e Falta de aceite formal do TCLE.

CRONOGRAMA - Etapa de coleta de dados de 16/11/2025 a 15/12/2025.

ORÇAMENTO - Financiamento próprio R\$ 179,00.

Objetivo da Pesquisa:

OBJETIVO PRIMÁRIO - Analisar as perspectivas e caminhos para implementação de SAF no Brasil, considerando o ProBioQAV e compromissos internacionais de descarbonização do setor aéreo.

OBJETIVO SECUNDÁRIO - Investigar tecnologias emergentes para produção de SAF;

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município: UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E-: cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: 0.013.085

Avaliar políticas públicas e investimentos necessários; Examinar o posicionamento do Brasil no cenário global; Identificar principais desafios regulatórios, logísticos e operacionais.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

RISCOS - Os riscos envolvidos nesta pesquisa são mínimos e relacionam-se principalmente à possibilidade de constrangimento reputacional, considerando o teor profissional das respostas e a eventual identificação indireta pela categoria ocupacional dos participantes. Para mitigar esses riscos, todos os dados serão apresentados de forma agregada, sem qualquer identificação individual direta ou indireta.

Adicionalmente, por se tratar de uma pesquisa realizada em ambiente virtual, reconhecem-se os riscos inerentes às limitações tecnológicas, como vulnerabilidades de sistemas, interceptação de dados ou acesso não autorizado às informações. Para minimizar esses riscos, os dados serão armazenados em ambiente seguro e criptografado, com acesso restrito à pesquisadora responsável e uso exclusivo para fins científicos.

BENEFÍCIOS - O benefício direto será a contribuição com o avanço do conhecimento científico sobre políticas públicas e sustentabilidade no setor aeronáutico. Indiretamente, a pesquisa pode influenciar estratégias nacionais e fomentar discussões sobre a inserção do Brasil como produtor de SAF, promovendo inovação e desenvolvimento regional sustentável.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

As pendências listadas no Parecer Consubstanciado nº 7.942.337, de 02 de novembro de 2025, e atendidas, seguem abaixo, bem como a resposta da equipe de pesquisa e a análise feita pelo CEP/UFU.

Pendência 1 - Procedimentos Metodológicos

Quanto aos procedimentos metodológicos descritos rever a coerência do método

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
 Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
 UF: MG Município: UBERLÂNDIA
 Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E- cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: 0.013.085

proposto e do instrumento. O projeto de pesquisa menciona “entrevista” e “transcrição”, porém o instrumento apresentado é um questionário estruturado com as respostas sendo através da escala de Likert. Informar no Formulário Plataforma Brasil e no Projeto Detalhado.

RESPOSTA - Item 2.4: O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) será enviado digitalmente aos participantes previamente à realização do preenchimento do formulário estruturado em escala Likert. A assinatura será coletada por meio eletrônico (PDF assinado ou formulário com aceite), conforme a Resolução CNS nº 674/2022. Os pesquisadores responsáveis esclarecerão dúvidas e confirmarão o aceite antes do início da coleta, garantindo a liberdade de recusa ou desistência a qualquer momento.

Item 2.5: A aplicação do formulário estruturado em escala Likert será realizada de forma remota, por meio de questionários em ambiente virtual, com duração estimada entre 7 e 10 minutos. O instrumento de coleta será um roteiro estruturado, usando a escala Likert, em que os participantes irão expressar seu nível de concordância ou discordância com uma afirmação, abordando tópicos como certificação e qualidade, infraestrutura e distribuição, regulação do mandato para operadores aéreos, políticas públicas, governança, tributação, desafios tecnológicos, estratégias empresariais e projeções sobre SAF no Brasil.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 2 “Riscos da Pesquisa”

Quanto a avaliação do risco da pesquisa especificar riscos potenciais de constrangimento reputacional pela natureza profissional das respostas. A categorização profissional pode gerar identificação indireta, inserir que os dados serão apresentados de forma agregada, sem identificação individual direta ou indireta. Além dos riscos e benefícios relacionados com a participação na pesquisa, adicionar aqueles riscos característicos do ambiente virtual, juntamente com medidas mitigadoras. Esses riscos estão, em sua maioria, relacionados com as limitações das tecnologias utilizadas. Informar no TCLE, no Formulário Plataforma Brasil e no Projeto Detalhado.

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco “JA”, sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica **CEP:** 38.408-144
UF: MG **Município:** UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 **Fax:** (34)3239-4131 **E-:** cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: 0.013.035

RESPOSTA - Informado no TCLE os trechos em destaque: Os riscos físicos são mínimos ao participar da pesquisa, podendo haver riscos da seguinte natureza: medo de não saber, de ser identificado ou relacionado a possibilidade de constrangimento reputacional, considerando o teor profissional das respostas e a eventual identificação indireta pela categoria ocupacional dos participantes. Para mitigar esses riscos, todos os dados serão apresentados de forma agregada, sem qualquer identificação individual direta ou indireta.

É importante salientar que a elaboração do questionário passou por rigorosas avaliações por membros da academia, para que os termos utilizados fossem passíveis de resposta, reduzindo a possibilidade de dúvidas. Quanto ao anonimato do indivíduo e da empresa são resguardados por lei, passando antes também por uma rigorosa avaliação do conselho de ética.

Adicionalmente, por se tratar de uma pesquisa realizada em ambiente virtual, reconhecem-se os riscos inerentes às limitações tecnológicas, como vulnerabilidades de sistemas, interceptação de dados ou acesso não autorizado às informações. Para minimizar esses riscos, os dados serão armazenados em ambiente seguro e criptografado, com acesso restrito à pesquisadora responsável e uso exclusivo para fins científicos. Além disso, é importante que você tenha todo o cuidado com a segurança e privacidade do local quando realizar o acesso às etapas virtuais da pesquisa para que sejam garantidos o sigilo e a confidencialidade necessários. Antes, durante ou após o consentimento ou a coleta de dados, informe ao(a) pesquisador(a) quaisquer condições adversas, como entradas inesperadas de pessoas no ambiente.

Informado na Plataforma Brasil e no Projeto Detalhado os trechos em destaque:

Os riscos envolvidos nesta pesquisa são mínimos e relacionam-se principalmente à possibilidade de constrangimento reputacional, considerando o teor profissional das respostas e a eventual identificação indireta pela categoria ocupacional dos participantes. Para mitigar esses riscos, todos os dados serão apresentados de forma agregada, sem qualquer identificação individual direta ou indireta.

Adicionalmente, por se tratar de uma pesquisa realizada em ambiente virtual, reconhecem-se os riscos inerentes às limitações tecnológicas, como vulnerabilidades de sistemas, interceptação de dados ou acesso não autorizado às

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica **CEP:** 38.408-144
UF: MG **Município:** UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 **Fax:** (34)3239-4131 **E-:** cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: 0.013.085

informações. Para minimizar esses riscos, os dados serão armazenados em ambiente seguro e criptografado, com acesso restrito à pesquisadora responsável e uso exclusivo para fins científicos.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 3 Recrutamento/abordagem dos participantes

Com relação a voluntariedade e recusa informar a retirada após a submissão dos dados, acrescentar o mecanismo de exclusão posterior caso o participante solicite.

RESPOSTA Adequação do item realizada inserido trecho em destaque:

Os participantes serão recrutados por amostragem intencional por conveniência, selecionados com base em indicação, análise curricular e comprovação de atuação profissional relacionada ao tema da pesquisa. A abordagem será realizada por meio de contato profissional ou institucional via e-mail, no qual serão explicitados a natureza e os objetivos do estudo, bem como o caráter totalmente voluntário da participação. Todos os participantes serão maiores de 18 anos e terão plena liberdade para recusar o convite, interromper sua participação ou solicitar a retirada de seus dados a qualquer momento, sem qualquer tipo de prejuízo, penalidade ou necessidade de justificativa.

Caso algum participante solicite a retirada de suas respostas após o envio, o procedimento de exclusão será realizado manualmente pela pesquisadora responsável. O registro será localizado no banco de dados do Google Forms, por meio do horário de submissão ou identificação voluntária fornecida no formulário, e em seguida excluído permanentemente da base de respostas e das planilhas vinculadas do Google Drive.

Após a exclusão, o sistema não mantém cópias em cache acessíveis e a pesquisadora registrará internamente o cumprimento da solicitação, sem preservar qualquer dado pessoal ou conteúdo das respostas.

O armazenamento temporário das informações será feito em conta institucional protegida por autenticação de dois fatores, e os arquivos exportados serão mantidos em ambiente criptografado e de acesso restrito.

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "IA", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município: UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E- cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: R.013.085

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 4 $\hookrightarrow$ Análise dos dados

Sobre o armazenamento dos dados, indicar o prazo de guarda e local digital.

RESPOSTA $\hookrightarrow$ Os dados serão analisados por meio da técnica de análise descritiva, buscando padrões de resposta por item como frequência, média, desvio padrão etc. com apoio de softwares como Excel, Eviews ou STATA para agregar, organizar e categorizar as respostas. A análise será conduzida em três etapas: pré-análise, exploração do material e interpretação dos resultados à luz do referencial teórico.

Todos os dados serão armazenados em ambiente digital seguro, vinculado à conta institucional dos pesquisadores no Google Drive, com acesso restrito e protegido por autenticação de dois fatores. O material será mantido pelo prazo de cinco anos após a conclusão da pesquisa, conforme as boas práticas recomendadas pela Resolução CNS nº 510/2016, sendo posteriormente eliminado de forma definitiva, mediante exclusão permanente dos arquivos e das cópias de segurança.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 5 $\hookrightarrow$ Instrumento de Pesquisa

Apresentar ao CEP/UFU o instrumento de coleta de dados no mesmo formato e formatação de acesso pelos participantes da pesquisa.

RESPOSTA $\hookrightarrow$ Inserido instrumento no texto, conforme trecho em destaque:

O acesso ao questionário será encaminhado individualmente, através do link: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdwIHWfn85zs-ZQ36VB1AcRsj01btCqRNOIqN2DqabsUUH0g/viewform?usp=header>, por e-mail profissional ou institucional, utilizando um remetente identificado da pesquisadora responsável e destinatários específicos, de forma a evitar o compartilhamento público do instrumento. Quando necessário, o envio poderá ser realizado em cópia oculta (Cco), garantindo que os endereços de e-mail dos participantes não sejam visíveis entre si, preservando, assim, a privacidade e a confidencialidade dos contatos.

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica **CEP:** 38.408-144
UF: MG **Município:** UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 **Fax:** (34)3239-4131 **E-:** cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: R.013.085

Essa medida visa assegurar que a comunicação entre pesquisadores e participantes ocorra em ambiente controlado e ético.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 6 ☒ Local e instrumento de coleta de dados

Assegurar que o documento e/ou a mensagem sejam enviados por e-mail contendo um remetente e um destinatário, ou na forma de cópia oculta (Cco). Informar no Formulário Plataforma Brasil e no Projeto Detalhado.

RESPOSTA ☒ Adequado item conforme trecho em destaque:

O acesso ao questionário será encaminhado individualmente, através do link: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdwIHWfn85zs-ZQ36VB1AcRsj01btCAqrNOIqN2DqabsUUH0g/viewform?usp=header>, por e-mail profissional ou institucional, utilizando um remetente identificado da pesquisadora responsável e destinatários específicos, de forma a evitar o compartilhamento público do instrumento. Quando necessário, o envio poderá ser realizado em cópia oculta (Cco), garantindo que os endereços de e-mail dos participantes não sejam visíveis entre si, preservando, assim, a privacidade e a confidencialidade dos contatos.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Pendência 7 ☒ Cronograma

Ajustar o cronograma da pesquisa.

RESPOSTA - A adequado do item na plataforma Brasil e no Projeto detalhado, inserido novas datas.

ANÁLISE DO CEP/UFU - Pendência atendida.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Vide campo "Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações".

Recomendações:

Vide campo "Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações".

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município: UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E-: cap@propp.ufu.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA



Continuação do Parecer: 0.013.085

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

As pendências apontadas no Parecer Consubstanciado nº nº 7.942.337, de 02 de novembro de 2025, foram atendidas. Portanto, nessa versão o CEP/UFU não encontrou nenhum óbice ético.

Prazo para a entrega do Relatório Final ao CEP/UFU: 03/2026

Considerações Finais a critério do CEP:

O CEP/UFU ALERTA QUE QUALQUER MUDANÇA NO PROTOCOLO DE PESQUISA DEVE SER INFORMADA, IMEDIATAMENTE, AO CEP PARA FINS DE ANÁLISE ÉTICA.

O CEP/UFU alerta que:

- a) Segundo as Resoluções CNS nº 466/12 e nº 510/16, o pesquisador deve manter os dados da pesquisa em arquivo, físico ou digital, sob sua guarda e responsabilidade, por um período mínimo de 5 (cinco) anos após o término da pesquisa;
- b) O CEP/UFU poderá, por escolha aleatória, visitar o pesquisador para conferência do relatório e documentação pertinente ao projeto;
- c) A aprovação do protocolo de pesquisa pelo CEP/UFU dá-se em decorrência do atendimento às Resoluções CNS nº 466/12 e nº 510/16 e suas complementares, não implicando na qualidade científica da pesquisa.

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus São Mônica
Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município: UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E-: cep@propp.ufu.br

Continuação do Parecer: R 013.085

27

ORIENTAÇÕES AO PESQUISADOR:

- O participante da pesquisa tem a liberdade de recusar-se a participar ou retirar seu consentimento em qualquer fase da pesquisa, sem penalização e sem prejuízo (Resoluções CNS nº 466/12 e nº 510/16) e deve receber uma via original do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, TCLE, na íntegra, por ele assinado.
- O pesquisador deve desenvolver a pesquisa conforme delineada no protocolo aprovado pelo CEP/UFU e descontinuar o estudo após a análise, pelo CEP que aprovou o protocolo (Resolução CNS nº 466/12), das razões e dos motivos para a descontinuidade, aguardando a emissão do parecer, exceto quando perceber risco ou dano não previsto ao participante ou quando constatar a superioridade de regime oferecido a um dos grupos da pesquisa que requeiram ação imediata.
- O CEP deve ser informado de todos os efeitos adversos ou fatos relevantes que alterem o curso normal do estudo (Resolução CNS nº 466/12). É papel do pesquisador assegurar medidas imediatas e adequadas frente a evento adverso grave ocorrido (mesmo que tenha sido em outro centro); e enviar a notificação ao CEP e à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) apresentando o seu posicionamento.
- Eventuais modificações ou emendas ao protocolo devem ser apresentadas ao CEP de forma clara e sucinta, destacando a parte do protocolo a ser modificada e suas justificativas. No caso de projetos do Grupo I ou II, apresentados à

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica **CEP:** 38.408-144
UF: MG **Município:** UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 **Fax:** (34)3239-4131 **E-:** cep@propp.ufu.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA**



Continuação do Parecer: 8.013.085

ANVISA, o pesquisador ou patrocinador também deve informá-la, enviando o parecer aprobatório do CEP, para ser anexado ao protocolo inicial (Resolução nº 251/97, item III.2.e).

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMACOES_BASICAS_DO_PROJETO_2621749.pdf	04/11/2025 12:50:40		Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_adequado_pendenciaassinado.pdf	04/11/2025 12:46:17	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	Respostas_as_pendencias_CEP.docx	03/11/2025 01:08:45	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	projeto_para_CEP_adequado_Pendencias.pdf	03/11/2025 01:03:41	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	Convite_a_participacao.pdf	18/08/2025 16:22:26	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Declaração de Pesquisadores	Termo_Equipe_assinado.pdf	18/08/2025 16:21:50	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_saf_assinado.pdf	18/08/2025 16:21:17	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Folha de Rosto	folha_de_rosto_CEPassinada.pdf	18/08/2025 16:09:27	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	QUESTIONARIO_estruturado_SAF.pdf	18/08/2025 16:00:53	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Pesquisa_CEP.pdf	18/08/2025 14:16:13	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	Lattes_Anna_Erika.pdf	18/08/2025 14:15:51	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito
Outros	Lattes_Orientador_Cassio.pdf	18/08/2025 14:12:22	ANNA ERIKA COLARES MACEDO	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "IA", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica **CEP:** 38.408-144
UF: MG **Município:** UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 **Fax:** (34)3239-4131 **E-:** cap@propp.ufu.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA



Continuação do Parecer: 8.013.085

Não

UBERLÂNDIA, 28 de Novembro de 2025

Assinado por:
Eduardo Henrique Rosa Santos
(Coordenador(a))

Endereço: Av. João Naves de Ávila 2121- Bloco "1A", sala 224 - Campus Sta. Mônica
Bairro: Santa Mônica CEP: 38.408-144
UF: MG Município: UBERLÂNDIA
Telefone: (34)3239-4131 Fax: (34)3239-4131 E-: cep@propp.ufu.br