TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL: DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO SAF NO BRASIL

Anna Erika Colares Macedo[1]

Cássio Garcia Ribeiro[2]

Resumo

O presente artigo analisa os desafios institucionais e as perspectivas para o desenvolvimento dos combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF) no Brasil, considerando o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) e seu alinhamento com iniciativas internacionais de descarbonização do setor aéreo. A pesquisa adota abordagem qualitativa e exploratória, combinando revisão bibliográfica, análise institucional e pesquisa de campo baseada em questionário estruturado com escala Likert aplicado a 53 participantes diretamente envolvidos na cadeia produtiva do SAF no Brasil. Os resultados indicam que, embora o país possua vantagens comparativas relevantes relacionadas à disponibilidade de biomassa e experiência em biocombustíveis, a consolidação do SAF depende da superação de gargalos regulatórios, econômicos e institucionais. A análise também evidencia assimetrias nas percepções entre produtores, reguladores e usuários estratégicos, sugerindo que os principais obstáculos à expansão do SAF estão associados à coordenação institucional, à previsibilidade regulatória e ao alinhamento de incentivos econômicos ao longo da cadeia produtiva.
Palavras-chave: Combustível sustentável de aviação; transição energética; descarbonização da aviação; políticas públicas; SAF.

Abstract

This article analyzes the institutional challenges and perspectives for the development of Sustainable Aviation Fuels (SAF) in Brazil, considering the National Sustainable Aviation Fuel Program (ProBioQAV) and its alignment with international aviation decarbonization initiatives. The research adopts a qualitative and exploratory approach, combining bibliographic review, institutional analysis, and field research based on a structured Likert-scale questionnaire applied to 53 participants directly involved in the Brazilian SAF production chain. The results indicate that, although Brazil holds important comparative advantages related to biomass availability and previous experience with biofuels, the consolidation of the SAF market depends on overcoming regulatory, economic, and institutional barriers. The analysis also reveals asymmetries in the perceptions of producers, regulators, and strategic users, suggesting that the main obstacles to SAF expansion are associated with institutional coordination, regulatory predictability, and the alignment of economic incentives throughout the production chain.
Keywords: Sustainable Aviation Fuel; energy transition; aviation decarbonization; public policy; Brazil.

Área 8 — Economia Ecológica, Mudança Climática e Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

[1] Universidade Federal de Uberlândia – UFU – Mestranda em Economia – e-mail:anna.macedo@ufu.br
[2] Universidade Federal de Uberlândia – UFU – Professor – e-mail: cassio.garcia@gmail.com

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado transformações significativas nas estratégias energéticas e produtivas em escala global. A necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem levado governos, organismos internacionais e setores produtivos a buscar alternativas energéticas capazes de compatibilizar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, a descarbonização do setor de transportes ocupa posição importante nas agendas de política climática, uma vez que o setor responde por parcela significativa das emissões globais de carbono.

Entre os diferentes modais de transporte, a aviação civil apresenta desafios particulares para o processo de transição energética. Diferentemente do transporte rodoviário, no qual a eletrificação tem avançado rapidamente, o transporte aéreo depende de combustíveis de alta densidade energética e enfrenta limitações tecnológicas relevantes para substituição do querosene de aviação de origem fóssil. Em função dessas restrições, os combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuels* – SAF) têm sido apontados como uma das principais alternativas para reduzir as emissões do setor aéreo nas próximas décadas.

Embora a literatura recente tenha avançado na discussão sobre descarbonização da aviação e desenvolvimento de combustíveis sustentáveis, ainda são limitadas as análises voltadas às percepções e assimetrias entre os diferentes atores diretamente envolvidos na cadeia produtiva do SAF, especialmente no contexto brasileiro. Grande parte dos estudos concentra-se em aspectos tecnológicos ou ambientais, dedicando menor atenção aos desafios institucionais, regulatórios e econômicos associados à implementação da transição energética no setor aéreo.

Diante desse contexto, o presente artigo busca analisar os desafios institucionais e as perspectivas para o desenvolvimento dos combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil, considerando o papel do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) e seu alinhamento com iniciativas internacionais de descarbonização do setor aéreo. Adicionalmente, o estudo examina as percepções de diferentes atores da cadeia produtiva do SAF quanto aos fatores que condicionam a implementação desses combustíveis no país.

O artigo contribui para esse debate ao integrar revisão teórica, análise institucional e evidência empírica obtida por meio de pesquisa de campo realizada com atores diretamente envolvidos no setor. A partir da comparação entre produtores, reguladores e usuários estratégicos, busca-se identificar convergências, divergências e gargalos

percebidos para a implementação do SAF no Brasil, enfatizando o papel da coordenação institucional e dos instrumentos econômicos no processo de transição energética. 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 artigo possui caráter exploratório e combina revisão bibliográfica, análise institucional e pesquisa de campo. A etapa empírica foi realizada por meio de questionário estruturado com escala Likert aplicado a 53 participantes diretamente envolvidos na cadeia produtiva do SAF no Brasil, incluindo produtores, reguladores e usuários estratégicos. Os resultados foram analisados comparativamente entre os diferentes grupos de respondentes, buscando identificar convergências, divergências e gargalos percebidos para a implementação do SAF no país.

Para alcançar os objetivos propostos, o artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta uma revisão da literatura sobre transição energética e combustíveis sustentáveis de aviação, discutindo o papel do SAF no processo de descarbonização do setor aéreo. A terceira seção examina o contexto institucional brasileiro e as principais políticas públicas voltadas ao desenvolvimento do combustível sustentável de aviação, com destaque para o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV). A quarta seção descreve os procedimentos metodológicos da pesquisa e apresenta os resultados da investigação empírica baseada em questionário aplicado a especialistas e profissionais da cadeia produtiva do SAF no Brasil. Por fim, a quinta seção apresenta as considerações finais do estudo, destacando os principais achados da pesquisa e suas implicações para o desenvolvimento do setor.

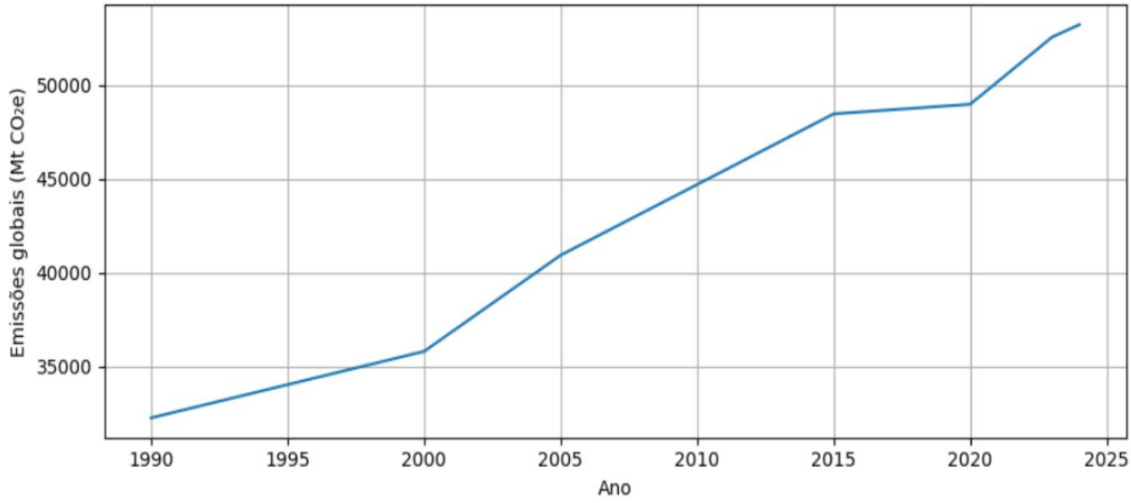
2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, LIMITES ECOLÓGICOS E DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas nas últimas décadas tem colocado a transição energética no centro das agendas econômicas e políticas em escala global. O aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa decorrente da queima de combustíveis fósseis tem sido identificado como principal vetor do aquecimento

global, o que tem impulsionado esforços internacionais voltados à transformação dos sistemas energéticos contemporâneos (IPCC, 2023). Nesse contexto, a transição energética pode ser entendida como um processo estrutural de substituição gradual das fontes fósseis por fontes de energia de menor intensidade de carbono, envolvendo transformações tecnológicas, institucionais e econômicas de larga escala (GEELS et al., 2017).

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.

Os dados apresentados reforçam a interpretação da economia ecológica que parte do reconhecimento – e preocupação – de que a atividade econômica está inserida em um sistema biofísico finito, sendo limitada pela disponibilidade de recursos naturais e pela capacidade de absorção de resíduos do planeta.

Autores como Georgescu-Roegen (2005) e Daly (1999) argumentam que modelos tradicionais de crescimento econômico tendem a negligenciar essas restrições ecológicas, tornando insuficientes abordagens que tratam os impactos ambientais apenas como externalidades passíveis de correção via mercado. Nesse contexto, a descarbonização de setores intensivos em combustíveis fósseis, como a aviação, passa a representar não apenas uma questão tecnológica, mas uma necessidade estrutural associada aos limites ambientais do crescimento econômico.

A literatura sobre transições sociotécnicas destaca que mudanças estruturais dessa natureza não ocorrem de maneira espontânea ou exclusivamente orientadas pelos mecanismos de mercado. Processos de transição energética envolvem disputas institucionais, dependência de trajetória tecnológica, coordenação entre setores econômicos e atuação ativa do Estado na criação de ambientes favoráveis à inovação e à difusão de tecnologias de baixo carbono. Nesse contexto, a construção de novos mercados energéticos depende não apenas da viabilidade técnica das tecnologias emergentes, mas também da existência de instrumentos regulatórios, financeiros e industriais capazes de reduzir incertezas e coordenar investimentos de longo prazo.

O setor de transportes ocupa posição central nesse processo, uma vez que responde por parcela significativa das emissões globais associadas ao consumo de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia, o transporte representa aproximadamente um quarto das emissões globais de dióxido de carbono relacionadas ao uso de energia (IEA, 2023). Dentro desse setor, a aviação civil apresenta desafios particulares para a descarbonização devido à elevada densidade energética requerida pelos combustíveis utilizados em aeronaves e às limitações tecnológicas que ainda restringem a eletrificação ou o uso de combustíveis alternativos em larga escala (SCHÄFER et al., 2019).

Diante dessas restrições, os combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuels – SAF*) têm sido apontados como uma das principais alternativas para reduzir a intensidade de carbono do transporte aéreo no curto e médio prazo. Diferentemente de outras tecnologias emergentes, como aeronaves elétricas ou movidas a hidrogênio, o SAF apresenta a vantagem de ser um combustível *drop-in*, ou seja, compatível com a infraestrutura existente de aeronaves e sistemas de abastecimento, permitindo sua utilização sem modificações significativas na frota atual (IEA, 2023). Estudos recentes indicam que o uso de SAF pode reduzir as emissões do ciclo de vida do combustível em até 80% em comparação ao querosene de aviação convencional, dependendo da matéria-prima utilizada e da rota tecnológica empregada (ICAO, 2019).

Embora instrumentos de mercado, como mecanismos de precificação de carbono, desempenhem papel relevante na indução de tecnologias de baixo carbono, diversos autores apontam que esses mecanismos, isoladamente, tendem a ser insuficientes para promover transformações estruturais em setores de elevada complexidade tecnológica e forte dependência de infraestrutura, como a aviação. A consolidação de mercados emergentes de SAF demanda coordenação institucional, estabilidade regulatória e

políticas públicas capazes de reduzir riscos associados aos elevados custos iniciais de investimento.

A implementação do SAF também deve ser analisada no contexto mais amplo das transformações tecnológicas associadas à transição energética. De acordo com Geels et al. (2017), processos de transição tecnológica em sistemas sociotécnicos complexos — como os sistemas energéticos e de transporte — dependem da interação entre inovação tecnológica, mudanças institucionais e pressões ambientais. Nesse sentido, o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis de aviação não depende apenas de avanços científicos ou tecnológicos, mas também da construção de marcos regulatórios e incentivos econômicos capazes de estimular investimentos em novas cadeias produtivas de baixo carbono.

Além disso, a expansão dos combustíveis sustentáveis de aviação também se relaciona às discussões contemporâneas sobre política industrial verde e transformação produtiva. Autores vinculados à literatura neo-schumpeteriana e institucionalista argumentam que a transição ecológica exige estratégias coordenadas de desenvolvimento capazes de articular inovação tecnológica, financiamento, infraestrutura e construção de capacidades produtivas nacionais. Nesse sentido, a atuação estatal deixa de ocupar papel apenas corretivo e passa a assumir função estratégica na indução de investimentos e na coordenação dos diferentes agentes envolvidos na transição energética em linha com a perspectiva do Estado empreendedor proposta por Mazzucato (2013).

Nesse debate, a literatura sobre economia ecológica oferece contribuições fundamentais ao destacar os limites biofísicos associados ao crescimento econômico baseado em combustíveis fósseis. Georgescu-Roegen (2005) argumenta que o processo econômico está intrinsecamente sujeito às leis da termodinâmica, especialmente ao princípio da entropia, segundo o qual toda transformação de energia e matéria implica degradação irreversível dos recursos naturais. A economia, portanto, deve ser compreendida como um subsistema do ecossistema terrestre, dependente de fluxos de energia e matéria provenientes da natureza. Essa perspectiva evidencia que a expansão contínua do consumo energético baseado em combustíveis fósseis representa um modelo de desenvolvimento ambientalmente insustentável no longo prazo.

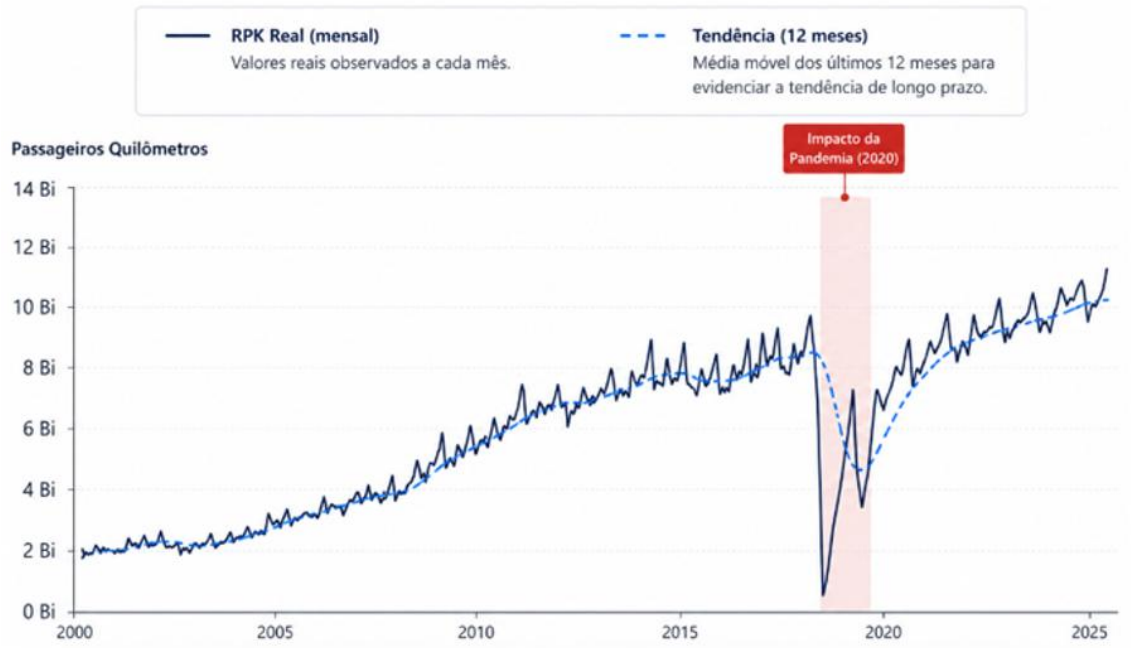
Nesse sentido, Daly (1999) propõe o conceito de economia em estado estacionário, no qual a escala da atividade econômica deve permanecer compatível com a capacidade de regeneração dos ecossistemas. Para o autor, políticas econômicas voltadas à sustentabilidade devem priorizar a redução da intensidade material e energética

da produção, bem como a transição para fontes renováveis de energia. Desta forma, a substituição progressiva de combustíveis fósseis por alternativas renováveis constitui elemento central na construção de sistemas econômicos ecologicamente sustentáveis.

No caso específico da aviação civil, essa discussão assume contornos particularmente relevantes. O transporte aéreo experimentou forte expansão nas últimas décadas, impulsionado pela globalização econômica e pelo crescimento do turismo internacional. Segundo Schäfer et al. (2019), a demanda por transporte aéreo deverá continuar crescendo nas próximas décadas, o que tende a ampliar a contribuição do setor para as emissões globais caso não sejam implementadas estratégias eficazes de descarbonização.

A demanda por voos domésticos no Brasil, medida em Revenue Passenger Kilometers (RPK), tem apresentado forte expansão nas últimas décadas, refletindo o crescimento estrutural do transporte aéreo no país. Segundo dados da ANAC (2025), o RPK doméstico passou de aproximadamente 25 bilhões em 2000 para mais de 100 bilhões em 2024, mesmo considerando a retração observada em 2020 em decorrência da pandemia de Covid-19. O gráfico a seguir evidencia essa trajetória de crescimento e a rápida retomada do setor no período pós-pandemia.

Gráfico 2. Série histórica RPK doméstico



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

A expansão contínua da demanda por transporte aéreo implica aumento do consumo de combustíveis fósseis e das emissões associadas à aviação civil. Nesse contexto, o crescimento do RPK reforça a importância das estratégias de descarbonização do setor aéreo, especialmente diante da tendência de continuidade da expansão da aviação comercial no longo prazo. Assim, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) passam a ocupar papel central na redução das emissões e na compatibilização entre crescimento do transporte aéreo e metas climáticas internacionais.

Organismos internacionais como a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) têm enfatizado o papel central do SAF nas estratégias globais de descarbonização da aviação. A IATA estima que os combustíveis sustentáveis poderão responder por aproximadamente 65% da redução total de emissões necessária para que o setor alcance a meta de emissões líquidas zero até 2050 (IATA, 2021). Essa estimativa evidencia a importância de expandir rapidamente a produção desses combustíveis, ao mesmo tempo em que se desenvolvem outras tecnologias complementares, como melhorias na eficiência energética das aeronaves e novas soluções de propulsão.

Apesar desse potencial, a implementação do SAF em escala global ainda enfrenta desafios econômicos e institucionais significativos. Os custos de produção desses combustíveis permanecem substancialmente superiores aos do querosene fóssil, o que limita sua competitividade em mercados energéticos sensíveis a preços. Nesse contexto, diversos estudos destacam a importância de instrumentos de política pública — como subsídios, incentivos fiscais e mecanismos de precificação de carbono — para viabilizar a expansão da produção e do consumo de combustíveis sustentáveis (BARANZINI et al., 2017; IEA, 2023).

Assim, a transição para combustíveis sustentáveis na aviação não deve ser interpretada apenas como um desafio tecnológico, mas como parte de um processo mais amplo de transformação estrutural dos sistemas energéticos contemporâneos. A articulação entre inovação tecnológica, políticas públicas e coordenação institucional torna-se elemento central para viabilizar a expansão dessas novas cadeias produtivas e promover a descarbonização do transporte aéreo em escala global.

3 O DESENVOLVIMENTO DO SAF NO BRASIL

À luz das transformações estruturais associadas à transição energética discutidas na seção anterior, o desenvolvimento dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) no Brasil deve ser compreendido como parte de um processo mais amplo de reconfiguração das bases produtivas e energéticas. Nesse contexto, o país apresenta características estruturais que o colocam em posição relativamente favorável, sobretudo em função de sua matriz energética diversificada e da experiência acumulada na produção de biocombustíveis.

De acordo com o Banco Mundial (2023), o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas entre as grandes economias do mundo, com participação significativa de fontes renováveis, o que cria condições favoráveis para o desenvolvimento de novas cadeias produtivas associadas à bioenergia.

A experiência brasileira no uso energético da biomassa constitui um dos principais ativos para a expansão do SAF no país. Programas históricos como o Proálcool, além da consolidação das cadeias produtivas de etanol e biodiesel, permitiram o desenvolvimento de conhecimento tecnológico, infraestrutura industrial e capacidade agrícola que podem ser mobilizados para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (CORTEZ et al., 2014). Essa trajetória institucional diferencia o Brasil de muitos outros países e contribui para posicioná-lo como potencial fornecedor relevante de matérias-primas e combustíveis de baixo carbono.

Contudo, a experiência histórica brasileira em cadeias exportadoras baseadas em recursos naturais demonstra que vantagens comparativas associadas à disponibilidade de matérias-primas não garantem, necessariamente, inserção competitiva nos segmentos de maior intensidade tecnológica e valor agregado. No contexto da transição energética, existe o risco de que países periféricos assumam predominantemente o papel de fornecedores de biomassa e insumos primários, enquanto as capacidades tecnológicas, industriais e financeiras permaneçam concentradas nas economias centrais.

Diante disso, o governo brasileiro lançou iniciativas voltadas à promoção da transição energética no setor de transportes. Uma das principais estratégias nesse sentido foi a criação do programa Combustíveis do Futuro, coordenado pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que reúne diferentes iniciativas destinadas à descarbonização da matriz energética nacional. Entre essas iniciativas destaca-se o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), instituído pela Lei nº 14.993 de 2024, com o objetivo de incentivar a pesquisa, a produção e o uso energético de combustíveis sustentáveis no setor de aviação (BRASIL, 2024).

O ProBioQAV estabelece metas progressivas de redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de combustíveis de aviação. O programa prevê que a redução das emissões se inicie em 2027 com percentual mínimo de 1%, aumentando gradualmente até alcançar 10% em 2037. Diferentemente de alguns programas internacionais, o modelo brasileiro considera a contabilização das emissões ao longo de todo o ciclo de vida do combustível, adotando metodologia conhecida como *well-to-wheel*, ou, em português, do poço-a-roda, uma analogia ao processo do combustível fóssil, que inclui desde a produção da matéria-prima até o consumo final do combustível na aeronave (EPE, 2024).

Nesse sentido, o ProBioQAV pode ser interpretado não apenas como instrumento ambiental voltado à mitigação das emissões do setor aéreo, mas também como potencial mecanismo de política industrial associado à construção de novas capacidades produtivas em setores estratégicos da transição energética. A efetividade desse processo, entretanto, dependerá da articulação entre regulação, financiamento, inovação tecnológica e coordenação entre os diferentes agentes da cadeia produtiva.

Além da dimensão regulatória, o desenvolvimento do SAF no Brasil está fortemente associado às possibilidades tecnológicas de produção desses combustíveis. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) identifica diversas rotas tecnológicas aprovadas internacionalmente para produção de bioquerosene de aviação, regulamentadas pela ASTM D7566 e pela resolução nº 856/2021 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Essas rotas utilizam diferentes tipos de matérias-primas e processos industriais para produzir combustíveis compatíveis com as especificações técnicas da aviação comercial (EPE, 2024).

Entre as rotas tecnológicas disponíveis, a rota HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) destaca-se por ser atualmente a mais madura do ponto de vista tecnológico, apresentando nível máximo de prontidão tecnológica (TRL 9). Essa tecnologia utiliza óleos vegetais e gorduras residuais como matérias-primas e permite mistura de até 50% com o querosene fóssil. Outras rotas, como HC-HEFA e CHJ, também baseadas em triglicerídeos, encontram-se em estágios intermediários de desenvolvimento tecnológico e apresentam potencial de expansão à medida que avanços tecnológicos reduzam custos e ampliem a escala de produção (EPE, 2024).

Além das rotas baseadas em triglicerídeos, existem tecnologias associadas à conversão de biomassa lignocelulósica, como as rotas SPK-FT (*Fischer-Tropsch*) e SPK/A, que utilizam processos químicos para converter biomassa vegetal em

combustíveis líquidos. Essas rotas envolvem processos de gaseificação e síntese química capazes de produzir hidrocarbonetos compatíveis com o combustível de aviação. Embora algumas dessas tecnologias ainda se encontrem em estágios intermediários de desenvolvimento, elas apresentam grande potencial de expansão no longo prazo (EPE, 2024).

Outra rota tecnológica relevante é o ATJ-SPK (*Alcohol-to-Jet*), que utiliza álcoois derivados de biomassa, como etanol e butanol, como insumos para produção de hidrocarbonetos utilizados no combustível de aviação. Essa rota possui especial relevância no contexto brasileiro devido à grande capacidade instalada de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e do milho. O aproveitamento dessa infraestrutura produtiva pode reduzir custos de produção e facilitar a integração do SAF com cadeias produtivas já consolidadas no país (FAPESP, 2022).

O potencial brasileiro para produção de SAF também se manifesta na disponibilidade de matérias-primas agrícolas e na existência de áreas agrícolas já consolidadas. Estudos realizados pela FAPESP em parceria com fabricantes de aeronaves como Embraer e Boeing destacam que o Brasil possui combinação única de disponibilidade de terras, produtividade agrícola e experiência institucional na produção de biocombustíveis, o que pode favorecer a expansão sustentável da produção de combustíveis de aviação de baixo carbono (FAPESP, 2022).

Paralelamente às iniciativas institucionais e tecnológicas, diversos projetos industriais voltados à produção de SAF vêm sendo anunciados no país. A Petrobras, por exemplo, divulgou planos para produção de SAF em refinarias brasileiras, incluindo projetos associados à refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão, e à refinaria Riograndense, no Rio Grande do Sul. Esses projetos indicam capacidade potencial de produção significativa e sinalizam o interesse de grandes empresas do setor energético na expansão do mercado de combustíveis sustentáveis (EPE, 2024).

Outras empresas também têm anunciado investimentos relevantes no setor. O grupo Brasil Biofuels (BBF) apresentou projeto de construção de biorrefinaria em Manaus voltada à produção de combustíveis renováveis, incluindo SAF e diesel verde, utilizando óleo de palma como matéria-prima. A empresa Acelen Renováveis, por sua vez, anunciou investimentos superiores a R$ 12 bilhões para produção de biocombustíveis avançados na refinaria de Mataripe, na Bahia, com perspectiva de utilização de óleo de macaúba como insumo principal (ACELEN, 2024).

Apesar do potencial produtivo brasileiro, observa-se que parte significativa das tecnologias associadas ao SAF permanece concentrada em empresas e instituições localizadas nos países centrais, especialmente Estados Unidos e Europa. Isso implica desafios relacionados à dependência tecnológica, ao acesso a patentes e à necessidade de fortalecimento das capacidades nacionais de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Nesse sentido, além dos investimentos domésticos, o Brasil também tem buscado ampliar sua inserção em iniciativas internacionais voltadas à descarbonização da aviação. Parcerias internacionais envolvendo instituições brasileiras e estrangeiras têm sido estabelecidas com o objetivo de desenvolver projetos de pesquisa e plantas piloto para produção de SAF. Entre essas iniciativas destacam-se projetos de cooperação entre Brasil e Alemanha voltados ao desenvolvimento de tecnologias de produção de hidrogênio e combustíveis sintéticos a partir de fontes renováveis de energia (EPE, 2024).

Sob a perspectiva tecnológica, o desenvolvimento do SAF no Brasil também pode ser analisado à luz da dinâmica global de inovação no setor. De acordo com o Radar Tecnológico do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI, 2026), observa-se forte concentração das atividades inovativas em países como Estados Unidos e China, responsáveis por 46% e 20% das invenções globais relacionadas ao SAF, respectivamente. Em contraste, o Brasil apresenta participação ainda limitada, com aproximadamente 1,4% das tecnologias desenvolvidas, embora figure como um dos principais destinos para proteção de patentes no setor.

Essa evidência sugere que, embora o país possua vantagens comparativas relevantes, sua inserção na cadeia global de SAF ainda se dá predominantemente como potencial produtor, e não como líder tecnológico, o que aponta para a necessidade de fortalecimento das políticas de inovação e desenvolvimento industrial. Dessa forma, observa-se que o desenvolvimento do SAF no Brasil resulta da convergência entre políticas públicas, potencial agrícola, capacidades industriais e cooperação internacional. Embora desafios econômicos, regulatórios e tecnológicos ainda persistam, o país apresenta condições estruturais favoráveis para se posicionar como ator relevante na cadeia global de combustíveis sustentáveis de aviação.

Porém, o sucesso dessa estratégia dependerá da capacidade de consolidar um ambiente institucional estável, capaz de estimular investimentos, promover inovação tecnológica e integrar diferentes elos da cadeia produtiva no processo de transição energética do setor aéreo. O desafio brasileiro na consolidação do SAF não se limita, portanto, à expansão da oferta de biomassa ou à viabilidade técnica das rotas produtivas.

Trata-se, sobretudo, de construir um arranjo institucional capaz de coordenar investimentos de longo prazo.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

4.1 Procedimentos metodológicos

Com o objetivo de aprofundar a análise apresentada na seção anterior, a etapa empírica da pesquisa foi conduzida de forma a compreender como diferentes atores envolvidos na cadeia produtiva do combustível sustentável de aviação (SAF) percebem os desafios associados ao desenvolvimento desse mercado no Brasil.

A utilização de pesquisa de percepção justifica-se pelo fato de que o mercado de SAF no Brasil ainda se encontra em estágio inicial de consolidação institucional e regulatória. Nesse contexto, a análise das percepções dos atores diretamente envolvidos na cadeia produtiva permite identificar expectativas, incertezas e assimetrias que dificilmente poderiam ser captadas apenas por indicadores quantitativos tradicionais.

Para isso, foi aplicado um questionário estruturado baseado em escala Likert de cinco pontos, variando entre “discordo totalmente” e “concordo totalmente”. Esse tipo de instrumento é amplamente utilizado em pesquisas sociais aplicadas por permitir a mensuração de percepções e níveis de concordância em relação a determinadas proposições analíticas (LIKERT, 1932).

As afirmações incluídas no questionário foram elaboradas com base na revisão da literatura sobre transição energética, políticas públicas de biocombustíveis e descarbonização da aviação, bem como nos desafios institucionais identificados na análise documental realizada ao longo da pesquisa. Os temas abordados incluíram políticas públicas de incentivo, instrumentos de precificação de carbono, competitividade econômica do SAF, infraestrutura logística, disponibilidade de matérias-primas e inserção do Brasil no mercado internacional desses combustíveis.

A coleta de dados foi autorizada pelo Comitê de Ética responsável e realizada por meio de questionário eletrônico distribuído a profissionais e especialistas vinculados a diferentes segmentos da cadeia produtiva do SAF no Brasil. A amostra final contou com 53 respostas válidas, provenientes de participantes com experiência em áreas relacionadas à produção de biocombustíveis, formulação de políticas públicas, pesquisa tecnológica e operação do setor aeronáutico.

A estrutura do questionário foi organizada de modo a contemplar diferentes dimensões associadas à implementação do SAF no Brasil, incluindo viabilidade

regulatória, competitividade econômica, capacidade produtiva, infraestrutura logística e adoção operacional. Essa abordagem permitiu analisar o processo de transição energética de forma multidimensional, considerando simultaneamente fatores tecnológicos, institucionais e econômicos.

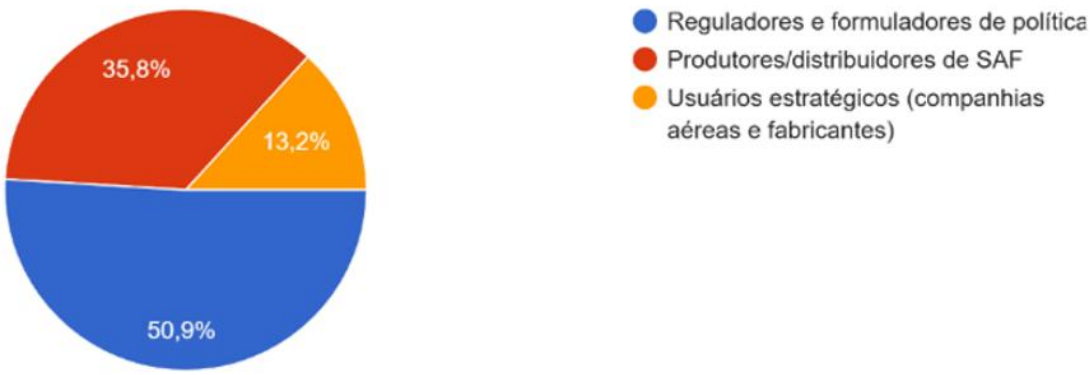
4.2 Perfil da amostra

Os participantes da pesquisa foram agrupados em três grandes categorias que representam diferentes elos da cadeia produtiva do SAF: produtores e distribuidores de combustíveis sustentáveis, reguladores e formuladores de políticas públicas e usuários estratégicos do combustível, grupo que inclui companhias aéreas e fabricantes de aeronaves.

A distribuição dos respondentes revela predominância de especialistas técnicos e profissionais ligados à formulação de políticas públicas, refletindo a forte presença de pesquisadores, analistas e profissionais de instituições públicas e privadas envolvidas no debate sobre transição energética. Em contrapartida, a participação de usuários estratégicos da cadeia, como companhias aéreas e fabricantes de aeronaves, foi proporcionalmente menor. Essa limitação decorre, em grande medida, das dificuldades de acesso a profissionais dessas organizações em pesquisas acadêmicas, especialmente em setores estratégicos e altamente regulados.

Apesar dessa limitação, a diversidade de perfis dos respondentes permitiu captar percepções relevantes sobre os desafios institucionais, tecnológicos e econômicos associados ao desenvolvimento do SAF no Brasil, contribuindo para uma análise comparativa entre diferentes segmentos da cadeia produtiva.

Gráfico 3. Perfil da amostra de respondentes



Fonte: Pesquisa de Campo (dados primários).

Embora a amostra não possua caráter probabilístico, sua composição apresenta elevada relevância analítica em razão do perfil técnico e institucional dos participantes. A pesquisa contou com profissionais diretamente envolvidos em diferentes segmentos da cadeia produtiva do SAF, incluindo representantes de produtores de biocombustíveis, instituições regulatórias, formuladores de políticas públicas, pesquisadores especializados e usuários estratégicos do setor aeronáutico.

Esse perfil confere consistência qualitativa aos resultados obtidos, permitindo captar percepções de atores diretamente expostos aos desafios regulatórios, econômicos e tecnológicos da implementação do SAF no Brasil.

4.3 Resultados da pesquisa de campo

De maneira geral, os resultados da pesquisa indicam elevado grau de concordância entre os participantes quanto à importância das políticas públicas para o desenvolvimento do mercado de SAF no Brasil. A maioria dos respondentes concorda que a expansão da produção desses combustíveis dependerá de instrumentos institucionais capazes de reduzir riscos associados aos investimentos em novas tecnologias e ampliar a competitividade do combustível sustentável em relação ao querosene de aviação de origem fóssil.

Esses resultados reforçam a hipótese central do artigo de que os obstáculos à expansão do SAF no Brasil não decorrem exclusivamente de limitações tecnológicas, mas principalmente da ausência de mecanismos robustos de coordenação institucional capazes de alinhar expectativas e reduzir incertezas econômicas ao longo da cadeia produtiva.

Outro resultado relevante refere-se à percepção sobre o papel dos mecanismos de precificação de carbono. A maior parte dos participantes concorda que instrumentos robustos de precificação de carbono, associados a mercados regulados ou voluntários de créditos de carbono, podem contribuir para melhorar a competitividade econômica do SAF. Esse resultado é consistente com a literatura sobre transição energética, que aponta a precificação do carbono como um dos instrumentos mais eficazes para incentivar a adoção de tecnologias de baixo carbono (BARANZINI et al., 2017).

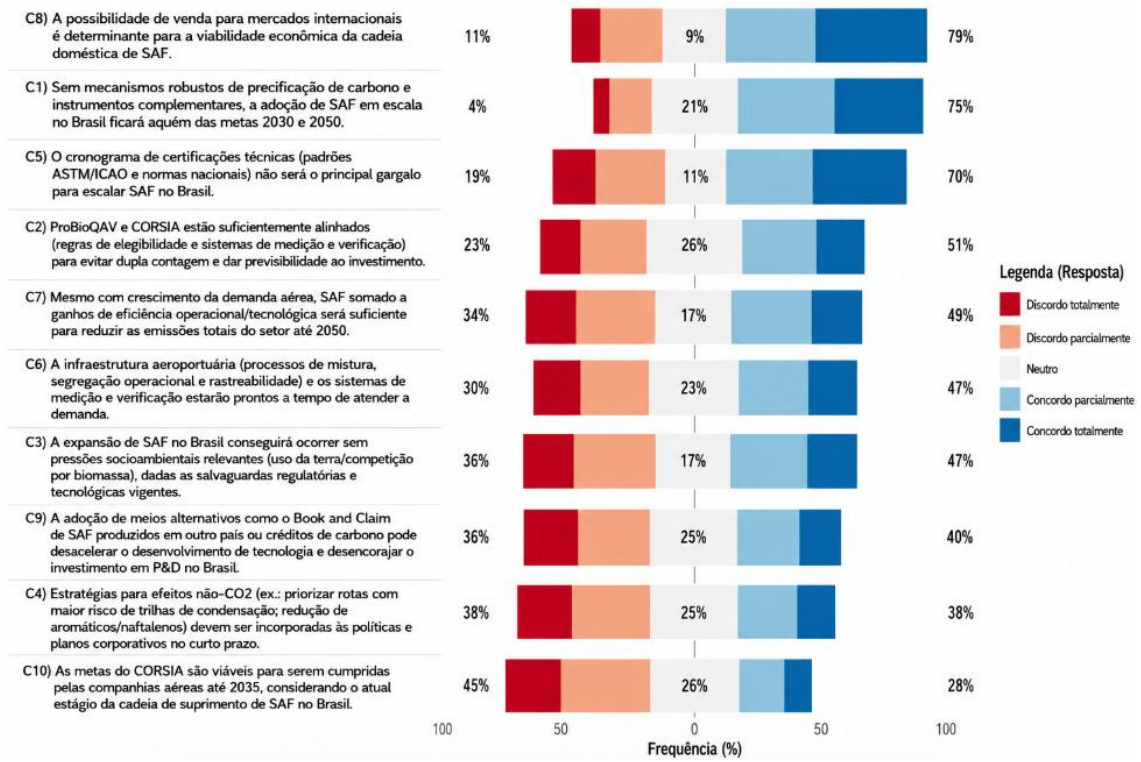
A pesquisa também revelou forte percepção de que o Brasil possui vantagens comparativas importantes para o desenvolvimento do SAF. Entre os fatores mais frequentemente mencionados pelos respondentes destacam-se a disponibilidade de biomassa, a experiência acumulada na produção de biocombustíveis e a existência de infraestrutura agroindustrial consolidada. Esses fatores reforçam o potencial do país para se posicionar como fornecedor relevante de combustíveis sustentáveis no mercado internacional.

No entanto, os participantes também destacam desafios importantes relacionados à competitividade econômica do SAF. Os custos de produção desses combustíveis ainda são significativamente superiores aos do querosene de aviação convencional, o que cria barreiras para sua adoção em larga escala. Nesse contexto, diversos respondentes enfatizam a importância de políticas públicas que incentivem investimentos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e ampliação da capacidade produtiva.

As dificuldades identificadas pelos respondentes também refletem mecanismos de dependência de trajetória associados à predominância histórica dos combustíveis fósseis no setor aéreo. A elevada consolidação tecnológica, logística e regulatória do querosene convencional cria barreiras estruturais à difusão de combustíveis alternativos, dificultando a rápida formação de mercados competitivos para o SAF.

O gráfico 4 mostra de modo claro os pontos de maior convergência e maior divergência nas respostas dos itens comuns, isto é, que foram sinalizados por todos os participantes.

Gráfico 4. Distribuição das percepções dos especialistas sobre os desafios e condicionantes para a adoção de SAF no Brasil



Fonte: Pesquisa de Campo (dados primários).

Os resultados do Gráfico 4 evidenciam forte convergência em torno da importância dos instrumentos regulatórios e econômicos para a expansão do SAF no Brasil. O item com maior nível de concordância foi o C8, referente à importância do mercado internacional para a viabilidade econômica da cadeia doméstica de SAF, com 79% das respostas concentradas em “concordo parcialmente” ou “concordo totalmente”, enquanto apenas 11% discordaram total ou parcialmente. Esse resultado sugere que os participantes percebem a inserção internacional como elemento estratégico para garantir escala econômica e competitividade à produção brasileira de combustíveis sustentáveis.

Em seguida, destaca-se o item C1, relacionado à precificação de carbono, que apresentou 75% de concordância e apenas 4% de discordância. Esse resultado reforça os argumentos desenvolvidos por Baranzini et al. (2017), segundo os quais instrumentos robustos de precificação de carbono desempenham papel fundamental na indução de tecnologias de baixo carbono e na internalização dos custos ambientais associados aos combustíveis fósseis. A elevada convergência observada na pesquisa indica que os respondentes reconhecem que a competitividade do SAF dificilmente será alcançada sem mecanismos econômicos capazes de compensar os diferenciais de custo em relação ao querosene convencional.

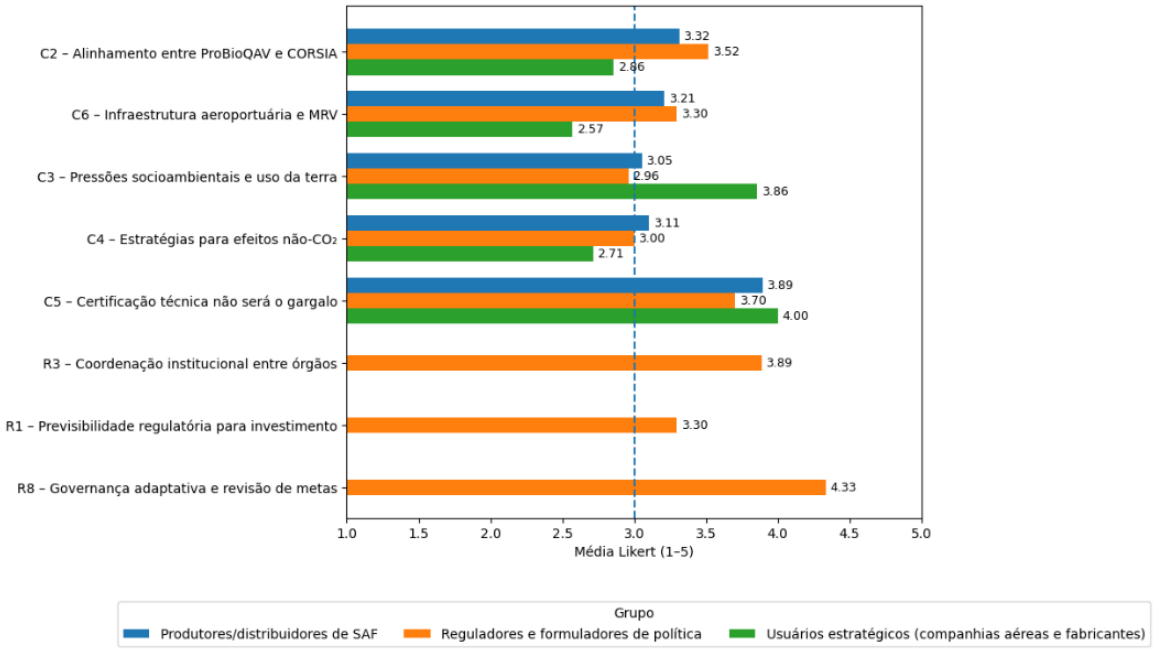
Outro resultado relevante refere-se ao item C5, relacionado às certificações técnicas, que apresentou 70% de concordância. Esse dado sugere que os participantes não percebem os requisitos técnicos internacionais como principal obstáculo à expansão do SAF. Esse resultado dialoga diretamente com a discussão apresentada na seção anterior sobre o avanço das principais rotas tecnológicas aprovadas internacionalmente, especialmente a rota HEFA, identificada pela EPE (2024) como tecnologia em estágio avançado de prontidão tecnológica (TRL 9). Nesse sentido, os resultados indicam que os principais gargalos percebidos pelos agentes deslocam-se da dimensão estritamente tecnológica para questões econômicas, regulatórias e institucionais associadas à expansão em escala comercial.

Por outro lado, os maiores níveis de discordância concentram-se nos itens C10 (45%), C4 (38%) e C9 (36%). O elevado percentual de discordância em relação ao item C10 evidencia ceticismo quanto à viabilidade de cumprimento das metas do CORSIA até 2035 considerando o atual estágio da cadeia produtiva de SAF no Brasil. Esse resultado revela percepção disseminada de que o ritmo atual de consolidação institucional e expansão produtiva ainda é insuficiente para acompanhar as metas internacionais de descarbonização da aviação defendidas pela ICAO (2019) e pela IATA (2021). A divergência observada também sugere tensões entre os compromissos climáticos globais e as limitações econômicas e institucionais enfrentadas por economias periféricas na construção de novas cadeias produtivas de baixo carbono.

As divergências relacionadas aos efeitos não-CO_2 e ao modelo book and claim também refletem importantes incertezas institucionais associadas à governança da transição energética no setor aéreo. Esses resultados evidenciam dificuldades de coordenação típicas de processos de transição sociotécnica em setores intensivos em infraestrutura e fortemente dependentes de combustíveis fósseis.

Diferentemente do Gráfico 4, os Gráficos 5 e 6 desagregam os resultados por grupos de atores da cadeia produtiva do SAF — produtores e distribuidores, reguladores e formuladores de políticas públicas e usuários estratégicos — permitindo identificar assimetrias de percepção associadas às diferentes posições institucionais ocupadas pelos respondentes. Nesses gráficos, os resultados são apresentados a partir das médias das respostas em escala Likert de cinco pontos, na qual o valor 1 corresponde a “discordo totalmente”, 2 a “discordo parcialmente”, 3 a “neutro”, 4 a “concordo parcialmente” e 5 a “concordo totalmente”. Assim, valores acima de 3 indicam tendência de concordância entre os participantes.

Gráfico 5. Percepções sobre a viabilidade regulatória do SAF no Brasil, por grupo de respondentes



Fonte: Pesquisa de Campo (dados primários)

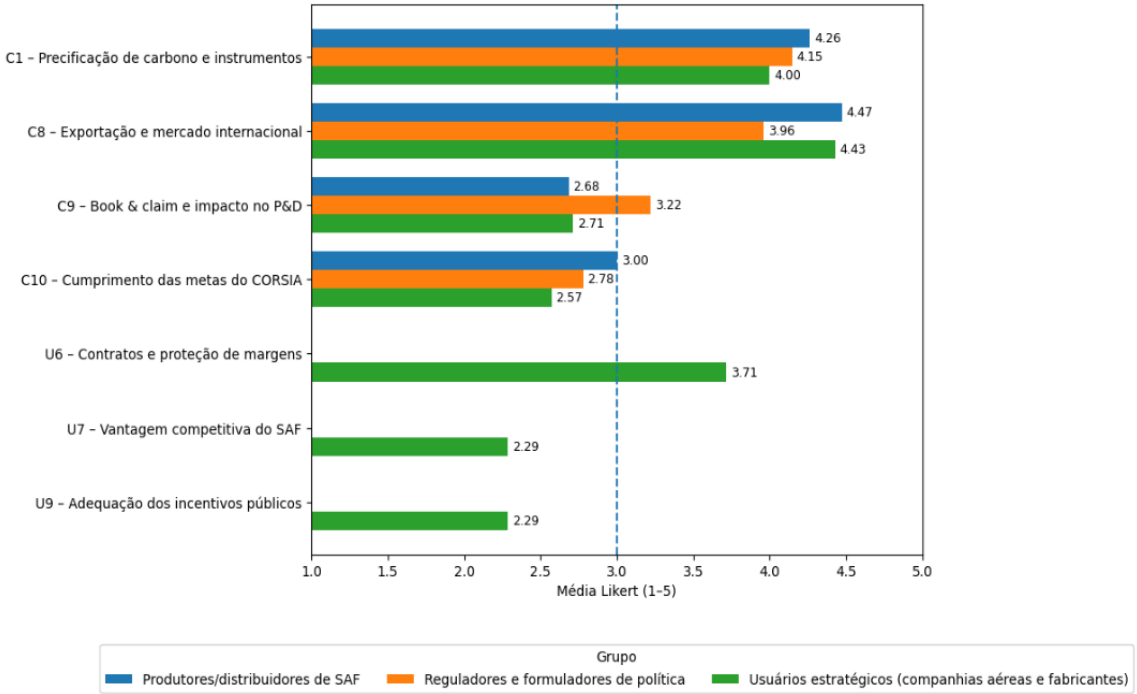
No Gráfico 5, observa-se elevada percepção dos reguladores e formuladores de política acerca da importância da coordenação institucional e da previsibilidade regulatória para a expansão do SAF. O maior valor registrado foi no item R8 (“governança adaptativa e revisão de metas”), com média 4,33 entre reguladores, indicando elevado grau de concordância quanto à necessidade de mecanismos flexíveis de coordenação institucional. Esse resultado reforça a interpretação desenvolvida por Geels et al. (2017), segundo a qual processos de transição energética em sistemas sociotécnicos complexos exigem capacidade institucional de adaptação regulatória diante de contextos marcados por elevada incerteza tecnológica e econômica.

Também se destacam os valores associados à coordenação entre órgãos públicos (R3 = 3,89) e à previsibilidade regulatória para investimentos (R1 = 3,30). Esses resultados dialogam diretamente com a literatura sobre política industrial verde e coordenação institucional, especialmente com a perspectiva do Estado empreendedor desenvolvida por Mazzucato (2013), segundo a qual a atuação estatal desempenha papel estratégico na redução de riscos e na coordenação de investimentos em setores emergentes de alta intensidade tecnológica.

Entre produtores e distribuidores de SAF, os maiores níveis de concordância concentram-se no item C5 (“certificação técnica não será o principal gargalo”), com média 3,89, e no alinhamento entre ProBioQAV e CORSIA (C2 = 3,32). Esses resultados sugerem percepção relativamente favorável em relação à capacidade de integração entre a política doméstica de combustíveis sustentáveis e os mecanismos internacionais de descarbonização da aviação.

Já os usuários estratégicos — companhias aéreas e fabricantes — atribuíram maior relevância às pressões socioambientais e ao uso da terra (C3 = 3,86), além da importância das certificações técnicas (C5 = 4,00). Esse resultado dialoga com os argumentos da economia ecológica apresentados anteriormente. Conforme destacam Daly (1999) e Georgescu-Roegen (2005), processos de expansão produtiva associados à transição energética também estão sujeitos a limites biofísicos e conflitos relacionados ao uso de recursos naturais. Nesse sentido, os dados sugerem que a consolidação do SAF no Brasil envolve não apenas desafios econômicos e tecnológicos, mas também preocupações relacionadas à sustentabilidade ambiental da expansão da biomassa.

Gráfico 6. Percepções sobre a viabilidade econômica do SAF no Brasil, por grupo de respondentes



Fonte: Pesquisa de Campo (dados primários).

O Gráfico 6 evidencia de forma ainda mais clara as tensões econômicas e institucionais associadas à consolidação do SAF no Brasil. Entre produtores e

distribuidores, os maiores valores observados referem-se ao mercado internacional e à precificação de carbono, com médias de 4,47 (C8) e 4,26 (C1), respectivamente. Esses resultados sugerem percepção de que a competitividade do SAF dependerá fortemente da integração do Brasil às dinâmicas internacionais de descarbonização e da construção de instrumentos econômicos capazes de compensar os elevados custos relativos do combustível sustentável.

Entre reguladores, destacam-se novamente os itens relacionados à precificação de carbono (4,15) e à inserção internacional do SAF (3,96), indicando reconhecimento institucional de que a expansão do setor depende da articulação entre política climática, política industrial e mecanismos de financiamento de longo prazo.

Os resultados mais expressivos, contudo, aparecem entre os usuários estratégicos da cadeia. Embora esse grupo apresente elevada concordância quanto à relevância do mercado internacional para o desenvolvimento do SAF (4,43) e à importância de contratos de proteção de margens e mecanismos de longo prazo (3,71), os respondentes demonstram baixa percepção quanto à competitividade atual do SAF brasileiro (2,29) e à adequação dos incentivos públicos existentes (2,29). Esse contraste constitui um dos principais achados empíricos da pesquisa, pois evidencia que os agentes econômicos reconhecem o elevado potencial estratégico do SAF brasileiro, mas avaliam que o ambiente institucional e econômico atual ainda não oferece condições suficientes para viabilizar sua expansão em escala comercial.

Esse resultado também reforça a discussão desenvolvida anteriormente acerca das assimetrias tecnológicas presentes nas cadeias globais da transição energética. Embora o Brasil possua vantagens comparativas relevantes associadas à biomassa e à experiência em biocombustíveis, os respondentes indicam percepção de que o país ainda ocupa posição periférica na estrutura global de inovação em SAF, resultado compatível com os dados do Radar Tecnológico do INPI (2026), que evidenciam forte concentração tecnológica nos Estados Unidos e na China.

De maneira geral, os resultados da pesquisa reforçam a hipótese central do artigo de que os principais obstáculos à expansão do SAF no Brasil não decorrem exclusivamente de limitações tecnológicas ou da disponibilidade de matérias-primas, mas sobretudo da ausência de mecanismos estáveis de coordenação institucional, previsibilidade regulatória e alinhamento entre os incentivos econômicos dos diferentes agentes da cadeia produtiva.

As evidências obtidas dialogam diretamente com a literatura sobre transições sociotécnicas apresentada anteriormente. Conforme argumentam Geels et al. (2017), processos de transição energética em setores intensivos em infraestrutura e dependentes de combustíveis fósseis não ocorrem de forma espontânea apenas por meio da difusão de novas tecnologias. A consolidação de mercados de baixo carbono depende da articulação entre inovação tecnológica, capacidade estatal, financiamento, regulação e coordenação institucional. Nesse sentido, as percepções captadas pela pesquisa indicam que os atores envolvidos na cadeia produtiva do SAF reconhecem que a viabilidade do setor depende da construção de um ambiente institucional estável e previsível.

Os resultados também corroboram os argumentos desenvolvidos pela literatura institucionalista e neo-schumpeteriana acerca do papel estratégico do Estado na coordenação de processos de transformação produtiva associados à transição energética. Em linha com a perspectiva do Estado empreendedor proposta por Mazzucato (2013), diversos respondentes destacam a necessidade de instrumentos públicos capazes de reduzir riscos associados aos elevados custos iniciais de investimento e estimular o desenvolvimento de novas capacidades produtivas e tecnológicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste artigo, que combinou revisão teórica, exame institucional e investigação empírica baseada em pesquisa de campo, evidencia a complexidade do processo de implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) no Brasil no contexto da transição energética global em função das limitações tecnológicas associadas à substituição de combustíveis fósseis e da elevada demanda energética do setor.

Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) emergem como uma das principais alternativas para a redução das emissões de gases de efeito estufa no transporte aéreo, sendo amplamente reconhecidos por organismos internacionais como elemento central para o alcance das metas de neutralidade de carbono até 2050.

Este artigo buscou analisar os desafios institucionais e as perspectivas para o desenvolvimento do SAF no Brasil, considerando o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o contexto internacional de descarbonização e as percepções dos diferentes atores da cadeia produtiva. A análise evidenciou que o país possui vantagens comparativas relevantes, especialmente relacionadas à disponibilidade

de biomassa, à experiência consolidada na produção de biocombustíveis e à estrutura agroindustrial existente.

Entretanto, os resultados também indicam que a consolidação desse potencial depende da superação de entraves regulatórios, tributários e econômicos. A pesquisa de campo revelou elevado grau de concordância entre os respondentes quanto à necessidade de instrumentos de precificação de carbono, incentivos fiscais e mecanismos de coordenação institucional capazes de reduzir riscos e estimular investimentos. Adicionalmente, foram identificadas assimetrias importantes entre os diferentes elos da cadeia produtiva, evidenciando divergências na percepção sobre prontidão tecnológica, viabilidade econômica e eficácia das políticas públicas.

A análise ganha maior profundidade quando considerada à luz da evidência tecnológica apresentada pelo Radar Tecnológico do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI, 2026), que demonstra a forte concentração da inovação em SAF em países como Estados Unidos e China, responsáveis por 46% e 20% das invenções globais, respectivamente, enquanto o Brasil apresenta participação ainda limitada, com cerca de 1,4% das tecnologias desenvolvidas. Esse resultado indica que, apesar do potencial produtivo, o país ainda não consolidou posição relevante na fronteira tecnológica do setor.

Nesse sentido, os achados do estudo sugerem que o principal desafio brasileiro não reside na disponibilidade de recursos naturais, mas na capacidade de articulação entre políticas públicas, instrumentos econômicos e desenvolvimento tecnológico. A ausência de coordenação entre esses elementos tende a gerar um ambiente de incerteza que dificulta a convergência entre oferta e demanda, limitando a expansão do SAF em escala comercial.

Além disso, os resultados apontam que o desenvolvimento do SAF no Brasil deve ser compreendido não apenas como uma estratégia ambiental, mas também como uma oportunidade de política industrial e inserção em cadeias globais de valor associadas à transição energética. A construção de um ambiente institucional estável, aliado ao fortalecimento de políticas de inovação e financiamento, será fundamental para transformar as vantagens comparativas do país em vantagens competitivas sustentáveis no longo prazo.

Em síntese, conclui-se que o Brasil possui condições estruturais favoráveis para se posicionar como ator relevante no mercado global de combustíveis sustentáveis de aviação. Os resultados da pesquisa também contribuem para o debate teórico sobre transições energéticas em economias periféricas, ao evidenciar que a existência de

vantagens comparativas baseadas em recursos naturais não é suficiente para garantir inserção competitiva em cadeias globais de baixo carbono. A experiência brasileira no desenvolvimento do SAF demonstra que processos de transição energética dependem da construção de capacidades institucionais, tecnológicas e financeiras capazes de coordenar investimentos e reduzir incertezas ao longo da cadeia produtiva.

Nesse sentido, o desenvolvimento do SAF no país deve ser compreendido não apenas como uma estratégia de mitigação climática, mas como um vetor de política industrial, social e de inserção competitiva nas cadeias globais da transição energética.

REFERÊNCIAS

ANAC. Painel interativo Power BI sobre demanda doméstica em RPK. Disponível em: *<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDI3ZjQxZDItMjY2MC00NzNhLTk1ZjUtN2MwNjMzNzNiNGE1IiwidCI6ImI1NzQ4ZjZlLWI0YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiJ9>*. Acesso em: 28 ago. 2025.

BANCO MUNDIAL. *Relatório sobre clima e desenvolvimento para o país: Brasil*. Washington, D.C.: World Bank, 2023. Disponível em: https://www.worldbank.org. Acesso em: 22 dez. 2024.

BARANZINI, Andrea et al. Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. *WIREs Climate Change*, v. 8, n. 4, 2017.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV). Brasília: Presidência da República, 2024.

CORTEZ, Luis Augusto Barbosa et al. *Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: a flightpath to aviation biofuels in Brazil*. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

CRESWELL, John W. *Research design: qualitative, quantitative and mixed methods approaches*. 4. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2014.

DALY, Herman E. *Ecological economics and the ecology of economics*. Cheltenham: Edward Elgar, 1999.

EDGAR. Global Greenhouse Gas Emissions Report 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil: perspectivas futuras*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 22 dez. 2024.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). *Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: plano de ação*. São Paulo: FAPESP, 2022.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The entropy law and the economic process*. Cambridge: Harvard University Press, 2005.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). *Fly Net Zero*. Montreal: IATA, 2021. Disponível em: https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/. Acesso em: 22 dez. 2024.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). *Net zero roadmap for aviation*. Montreal: IATA, 2024.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Montreal: ICAO, 2019. Disponível em: https://www.icao.int. Acesso em: 22 dez. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Net zero roadmap: a global pathway to keep the 1.5°C goal in reach*. Paris: IEA, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Sixth assessment report: climate change 2023*. Geneva: IPCC, 2023.

LIKERT, Rensis. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, v. 22, n. 140, p. 1–55, 1932.

MAZZUCATO, Mariana. *The entrepreneurial state: debunking public vs. private sector myths*. London: Anthem Press, 2013.