

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS



**TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NA AVIAÇÃO E O USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS
NA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO**

DANILO TAVARES PIMENTEL

GOIÂNIA

2026

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NA AVIAÇÃO E O USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO

Danilo Tavares Pimentel¹, Roberto Márcio dos Santos²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, danilo.pimentel@pucgoias.edu.br

²Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, roberto.marcio@pucgoias.edu.br

RESUMO: O setor da aviação é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, especialmente de dióxido de carbono (CO₂). Com o crescimento da demanda por transporte aéreo, o desenvolvimento e a adoção de tecnologias sustentáveis capazes de reduzir os impactos ambientais da aviação se tornam imprescindíveis. Nesse contexto, os biocombustíveis surgem como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis tradicionais utilizados na aviação. Este artigo analisa o papel das tecnologias sustentáveis na aviação, com foco na utilização de biocombustíveis como estratégia para redução das emissões de carbono. A pesquisa está baseada na revisão bibliográfica de estudos recentes sobre combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), avanços tecnológicos no setor aeronáutico e políticas ambientais globais. Os resultados indicam que o uso de biocombustíveis pode reduzir significativamente as emissões líquidas de carbono ao longo do ciclo de vida do combustível, além de contribuir para a transição energética no setor aéreo. Contudo, desafios relacionados ao custo, à produção em larga escala e à infraestrutura ainda precisam ser superados.

Palavras-chave: *aviação sustentável; biocombustíveis; emissões de carbono; combustíveis sustentáveis de aviação.*

ABSTRACT: *The aviation sector is responsible for a significant share of global greenhouse gas emissions, particularly carbon dioxide (CO₂). With the growing demand for air transport, the development and adoption of sustainable technologies capable of reducing the environmental impacts of aviation have become imperative. In this context, biofuels emerge as a promising alternative to the traditional fossil fuels used in aviation. This article analyzes the role of sustainable technologies in aviation, focusing on the use of biofuels as a strategy for reducing carbon emissions. The research is based on a literature review of recent studies on sustainable aviation fuels (SAF), technological advances in the aeronautical sector, and global environmental policies. The results indicate that the use of biofuels can significantly reduce net carbon emissions throughout the fuel's life cycle, while also contributing to the energy transition in the air sector. However, challenges related to cost, large-scale production, and infrastructure still need to be overcome.*

Keywords: *sustainable aviation; biofuels; carbon emissions; sustainable aviation fuels.*

1. Introdução

O crescimento contínuo do transporte aéreo tem gerado preocupações ambientais devido à emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis. A aviação

comercial representa aproximadamente 2% a 3% das emissões globais de dióxido de carbono, sendo considerada um setor estratégico nas discussões sobre mudanças climáticas [1].

Diante desse cenário, organizações internacionais e governos têm incentivado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas à redução da pegada de carbono da aviação. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se a melhoria da eficiência energética das aeronaves, a eletrificação parcial de sistemas, o desenvolvimento de aeronaves híbridas e o uso de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*) [2, 3].

Os biocombustíveis são produzidos a partir de biomassa, resíduos orgânicos ou óleos vegetais e, assim, contribuem para reduzir as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida do combustível [6, 8]. Vale ressaltar que, quando comparados ao querosene convencional de aviação, esses combustíveis podem reduzir significativamente as emissões líquidas de CO₂ e, assim, contribuir para o cumprimento das metas climáticas globais [7, 9].

A preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis em diversos setores, inclusive a aviação e, o uso de biocombustíveis constitui alternativa promissora para reduzir as emissões de carbono desse setor [1, 3]. No entanto, ainda há muitos questionamentos quanto à sua viabilidade econômica da produção em larga escala [9, 14]. Diante disso, este estudo se justifica pela necessidade de compreender melhor o papel dos biocombustíveis como tecnologia sustentável e, conseqüentemente, contribuir para o desenvolvimento de políticas e práticas mais sustentáveis na aviação.

Neste contexto, o problema central que orienta esta investigação consiste em identificar os obstáculos para o uso de biocombustíveis na aviação e analisar como a sua utilização pode contribuir efetivamente para a redução das emissões de carbono sem comprometer a viabilidade econômica do setor.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo geral, por meio de uma revisão de literatura, analisar o potencial dos biocombustíveis como tecnologia sustentável na aviação, além de avaliar a sua contribuição para a redução das emissões de carbono. De forma específica, busca-se: (a) identificar os principais tipos de combustíveis fósseis utilizados na aviação; (b) investigar os principais tipos de biocombustíveis empregados no setor aeronáutico; (c) avaliar o impacto econômico do uso de biocombustíveis em comparação aos combustíveis convencionais; (d) analisar os desafios tecnológicos para a adoção de biocombustíveis; e (e) examinar políticas públicas e iniciativas internacionais relacionadas à aviação sustentável, a fim de identificar perspectivas futuras para o uso de biocombustíveis no setor aéreo.

2. Referencial Teórico

2.1. Contextualização Histórica da Aviação e Impactos Ambientais

A aviação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e na integração global, a qual tem evoluído, do modo significativo, desde os primeiros voos motorizados no início do século XX. Ao longo do tempo, o avanço tecnológico possibilitou o aumento da capacidade de transporte, da eficiência operacional e do alcance das aeronaves. No entanto, esse crescimento também esteve diretamente associado ao aumento do consumo de combustíveis fósseis, especialmente o querosene de aviação (Jet A-1), principal fonte energética do setor [4].

A intensificação desse desenvolvimento contribui para o aumento do tráfego aéreo global, o que resulta na elevação das emissões de gases de efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂) como principal poluente. Além disso, outros impactos ambientais, como a formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e trilhas de condensação, também têm sido objeto de estudo, devido ao seu potencial de influência no clima [1]. Dessa forma, a aviação é reconhecida como um setor estratégico, porém desafiador no contexto da sustentabilidade ambiental.

2.2. Principais Tipos de Combustíveis Fósseis na Aviação

Os combustíveis fósseis continuam predominantes na aviação. O querosene de aviação (Jet Fuel), especialmente nas variantes Jet A e Jet A-1, é o principal combustível utilizado em aeronaves comerciais e militares, devido à alta eficiência energética, baixa volatilidade e bom desempenho em grandes altitudes [5].

A gasolina de aviação (Avgas), por sua vez, é empregada em aeronaves leves com motores a pistão, caracterizada pela alta octanagem [4]. No âmbito militar, destacam-se combustíveis específicos como JP-4, JP-5 e JP-8, desenvolvidos para atender a diferentes requisitos operacionais e de segurança.

2.3. Principais Tipos de Biocombustíveis na Aviação

O HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) é, atualmente, o mais utilizado no setor da aviação, cuja matéria-prima são os óleos vegetais, as gorduras animais e os óleos residuais. Esse processo consiste na hidrogenação para remoção de oxigênio e na conversão em hidrocarbonetos, em que as principais vantagens identificadas são a maturidade tecnológica e a aprovação para o uso comercial em misturas de até 50%. Contudo, o HEFA enfrenta limitações relacionadas à disponibilidade de matérias-primas sustentáveis e à competição com a produção de alimentos [6].

O FT-SPK (*Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene*), por sua vez, utiliza biomassa sólida, como resíduos agrícolas, madeira e lixo orgânico, os quais são obtidos por meio de gaseificação. Embora ainda apresente custos elevados, alta complexidade tecnológica e limitações de infraestrutura, o FT-SPK proporciona elevada qualidade do combustível produzido, mesmo que sua produção utilize o processamento de resíduos [7].

O ATJ (*Alcohol-to-Jet*) converte etanol ou butanol em hidrocarbonetos, por meio de cadeias produtivas já estabelecidas, especialmente em países com forte produção de biocombustíveis, como o Brasil. Entretanto, essa tecnologia ainda se encontra em expansão comercial e apresenta custos relativamente altos [8].

O SIP (*Synthesized Iso-Paraffins*) é baseado na fermentação de açúcares e, assim, apresenta baixo impacto de carbono, porém, há limitações quanto à proporção de mistura permitida (até 10%) e à escala de produção [6, 8].

Por fim, o CHJ (*Catalytic Hydrothermolysis Jet*) utiliza óleos e gorduras em um processo que simula a formação natural de combustíveis fósseis sob alta pressão e temperatura, o qual gera um produto semelhante ao querosene convencional, mas ainda em estágio emergente e com baixa escala comercial [7].

Embora descritas em conjunto, essas rotas possuem origens e graus de maturidade distintos. A rota Fischer-Tropsch é a mais antiga, pois deriva de um processo de síntese já consolidado

industrialmente muito antes de sua aplicação aeronáutica, enquanto o HEFA foi a primeira rota de base lipídica a alcançar maturidade tecnológica e uso comercial em larga escala [6, 7]. A viabilidade técnica dos biocombustíveis na aviação passou a ser demonstrada por meio de voos comerciais e operacionais conduzidos por companhias aéreas e fabricantes, que comprovaram a compatibilidade dos SAF com as aeronaves em operação [4, 7]. A consolidação dessas rotas ocorreu de forma progressiva, à medida que foram sendo certificadas pela ASTM como componentes de mistura para o querosene de aviação — processo iniciado pela Fischer-Tropsch e pelo HEFA e, posteriormente, ampliado para as rotas ATJ, SIP e CHJ [4, 7].

No que se refere ao custo de fabricação, há diferenças relevantes entre as rotas. O HEFA, por ser a tecnologia mais consolidada e de menor complexidade, apresenta o menor custo de produção entre as rotas de SAF, o que ajuda a explicar a sua predominância atual no mercado [6, 7]. Em contrapartida, as rotas termoquímicas, como a Fischer-Tropsch, e as de base sintética envolvem maior intensidade de capital e processos mais complexos, o que eleva seus custos [7]. De modo geral, o custo dos SAF ainda supera o do querosene convencional em duas a cinco vezes, a depender da rota e da disponibilidade de matéria-prima [9].

Quanto à eficiência energética, observa-se um comportamento que, em parte, contrasta com a hierarquia de custos. As rotas de base lipídica, como o HEFA, tendem a apresentar maior eficiência de conversão e menor consumo energético no processamento, ao passo que as rotas termoquímicas, sobretudo a Fischer-Tropsch, demandam mais energia nas etapas de gaseificação, limpeza do gás de síntese e conversão catalítica [6]. Essa diferença de eficiência, somada à complexidade tecnológica e aos custos, ajuda a explicar por que rotas como SIP e CHJ, ainda que promissoras, permanecem em estágio incipiente de adoção comercial [7].

O Quadro 1 sintetiza e compara as principais rotas tecnológicas de produção de SAF descritas nesta seção, contrastando-as com o querosene fóssil de aviação quanto à matéria-prima, ao processo de produção, ao limite de mistura e às principais vantagens e limitações.

Quadro 1 – Síntese comparativa das rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) e do querosene fóssil

Combustível / Rota	Matéria-prima	Processo de produção	Limite de mistura	Vantagens	Limitações / maturidade
HEFA	Óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais	Hidrogenação (remoção de oxigênio e conversão em hidrocarbonetos)	Até 50%	Maturidade tecnológica; aprovação comercial; rota mais utilizada	Disponibilidade de matérias-primas sustentáveis; competição com a produção de alimentos
FT-SPK	Biomassa sólida (resíduos agrícolas, madeira, lixo orgânico)	Gaseificação seguida de síntese de Fischer-Tropsch	Até 50%*	Elevada qualidade do combustível; aproveitamento de resíduos	Custos elevados; alta complexidade; maior consumo energético; limitações de infraestrutura
ATJ	Etanol ou butanol	Conversão de álcoois em hidrocarbonetos	Até 50%*	Cadeias produtivas já estabelecidas (ex.: Brasil)	Tecnologia em expansão comercial; custos relativamente altos

Combustível / Rota	Matéria-prima	Processo de produção	Limite de mistura	Vantagens	Limitações / maturidade
SIP	Açúcares	Fermentação de açúcares	Até 10%	Baixo impacto de carbono	Baixo limite de mistura; escala de produção limitada
CHJ	Óleos e gorduras	Hidrotermólise catalítica (simula a formação natural sob alta pressão e temperatura)	Até 50%*	Produto semelhante ao querosene convencional	Estágio emergente; baixa escala comercial
Querosene fóssil (Jet A-1)	Petróleo (fonte fóssil não renovável)	Refino do petróleo	100%**	Alta eficiência energética; baixa volatilidade; bom desempenho em altitude; infraestrutura consolidada; menor custo	Linha de base das emissões de CO ₂ ; recurso não renovável

Fonte: elaborado pelo autor (2026), com base em Khujamberdiev e Cho (2024), Watson *et al.* (2024), Fernandes *et al.* (2024), Bento *et al.* (2024) e Costa *et al.* (2024).

Notas: em comparação ao querosene fóssil, as rotas de SAF podem reduzir as emissões de CO₂ entre 60% e 80% ao longo do ciclo de vida, conforme a matéria-prima e o processo produtivo (Khujamberdiev e Cho, 2024). (*) Para FT-SPK, ATJ e CHJ adota-se o limite geral de compatibilidade com motores atuais (até 50%); os percentuais específicos dependem da certificação ASTM D7566 aplicável. (**) O querosene fóssil é utilizado de forma pura, servindo de linha de base para as comparações.

2.4. Impactos Econômicos do Uso de Biocombustíveis em Comparação aos Combustíveis Convencionais

Apesar do potencial dos SAF, a sua adoção enfrenta diversos desafios econômicos. Entre eles, o custo de produção ainda é significativamente superior ao do querosene convencional, ao variar entre duas e cinco vezes mais, devido à baixa escala produtiva, à complexidade da cadeia de suprimentos e à limitada disponibilidade de matérias-primas [9]. Além disso, a produção global de SAF ainda representa menos de 1% do consumo total de combustível de aviação, o que evidencia a limitação de escala e infraestrutura [3]. A competição por matérias-primas com setores como alimentação, biodiesel e indústria química também pressiona os custos e a disponibilidade [7], somados a isso, há a dependência de políticas públicas, como incentivos fiscais e subsídios, que influenciam diretamente a viabilidade econômica e a adoção desigual entre países.

2.5. Desafios Tecnológicos para a Adoção de Biocombustíveis

No âmbito tecnológico, destacam-se desafios relacionados à disponibilidade sustentável de biomassa, à eficiência dos processos produtivos e à integração com a infraestrutura existente [10]. Algumas rotas apresentam elevado consumo energético e baixa eficiência de conversão, enquanto a necessidade de compatibilidade com motores atuais impõe limites de mistura, geralmente de até 50%. Sobretudo as rotas termoquímicas como a Fischer-Tropsch, apresentam maior consumo energético no processamento (etapas de gaseificação, limpeza de syngas e conversão catalítica), enquanto a rota HEFA destaca-se pela maior maturidade e eficiência energética relativa [6]. Além disso, os processos de certificação e padronização, conduzidos por

organismos como a ASTM, são rigorosos e morosos, o que pode prejudicar a implementação de novas tecnologias [4]. **2.6. Políticas Públicas, Iniciativas Internacionais e Perspectivas Futuras**

Diante desse cenário, políticas públicas e iniciativas internacionais desempenham papel fundamental na promoção da aviação sustentável. A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) lidera esforços globais por meio do CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), que visa estabilizar as emissões de voos internacionais por meio de compensação de carbono [2].

Paralelamente, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) estabeleceu a meta de neutralidade de carbono até 2050, com foco na adoção de SAF, melhorias operacionais e desenvolvimento de novas tecnologias [3]. Em nível regional, a União Europeia implementa políticas como o sistema de comércio de emissões (ETS) e o programa ReFuelEU Aviation, que estabelece metas obrigatórias crescentes para o uso de SAF. Nos Estados Unidos, iniciativas como o *Inflation Reduction Act* e o *SAF Grand Challenge* priorizam incentivos fiscais, expansão produtiva e apoio à pesquisa [11]. No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) acompanha a sustentabilidade do setor por meio de relatórios e diretrizes específicas [12], e a Lei n. 14.993/2024 (Lei do Combustível do Futuro) instituiu o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) como marco regulatório nacional [5, 13].

As projeções indicam que os biocombustíveis podem representar papel estratégico na transição energética da aviação [14], já que sua principal vantagem reside na compatibilidade com a frota atual, o que contribui para a redução significativa das emissões de dióxido de carbono, estimada entre 60% e 80% ao longo do ciclo de vida [6]. A expectativa para a área é uma expansão acelerada da produção, impulsionada por metas regulatórias, incentivos governamentais e investimentos do setor privado [15]. Além disso, a tendência é de redução gradual dos custos, decorrente de ganhos de escala, avanços tecnológicos e políticas de apoio contínuas, o que consolida os SAF como uma das principais alternativas para a descarbonização do transporte aéreo [9].

3. Materiais e Métodos

Este estudo é realizado por meio de uma pesquisa bibliográfica e documental, de natureza qualitativa e exploratória, com o objetivo de analisar o papel das tecnologias sustentáveis na aviação, com ênfase no uso de biocombustíveis na redução das emissões de carbono. O percurso metodológico foi estruturado em duas vertentes complementares: (i) uma pesquisa documental, com base em relatórios técnicos de organismos institucionais; e (ii) uma revisão bibliográfica sistematizada, baseada em publicações científicas revisadas por pares. A pesquisa documental analisou dados secundários provenientes de relatórios das seguintes organizações: IATA (*International Air Transport Association*), ICAO (*International Civil Aviation Organization*), IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), FAA (*Federal Aviation Administration*) e ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), com o objetivo de avaliar tendências de emissão de carbono, panorama regulatório e o impacto da adoção de biocombustíveis no setor aéreo.

A revisão bibliográfica foi realizada busca realizada no mês de abril de 2026, nas bases Periódicos CAPES, Scopus, SciELO e Google Scholar. Os descritores empregados, combinados pelos operadores booleanos AND e OR, foram, em português: "biocombustíveis" AND "aviação", "combustível sustentável de aviação" OR "SAF", "emissões de carbono" AND "aviação", "tecnologias sustentáveis" AND "setor aeronáutico"; e em inglês: "*sustainable aviation fuel*" AND "*biofuel*", "*SAF*" AND "*carbon emissions*", "*aviation decarbonization*" AND "*biofuel*".

A busca inicial retornou 187 registros. Após a remoção de duplicatas, restaram 145 trabalhos para triagem por título e resumo. Foram aplicados os seguintes critérios de inclusão: (a) artigos publicados em periódicos com revisão por pares; (b) publicação entre 2022 e 2026; (c) abordagem dos temas: uso de biocombustíveis na aviação, tecnologias sustentáveis aplicadas ao setor aeronáutico, e/ou impactos ambientais relacionados à emissão de CO₂; (d) acesso ao texto integral; e (e) idioma português ou inglês.

Foram adotados, como critérios de exclusão: (a) literatura cinzenta (matérias jornalísticas, postagens em blogs corporativos, relatórios não revisados por pares); (b) publicações anteriores a 2022; (c) trabalhos cujo foco principal não fosse a aviação ou que tratassem do tema apenas tangencialmente; (d) estudos restritos a aspectos exclusivamente técnico-químicos sem relação com sustentabilidade ou emissões; e (e) teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso. Aplicados esses filtros, foram excluídos 135 registros, o que resultou em 10 publicações selecionadas, em que sete são nacionais e três internacionais.

As publicações nacionais selecionadas foram: Bento *et al.* (2024), Casas e Henkes (2024), Costa *et al.* (2024), Fernandes *et al.* (2024), Estevo, Thomaz e Gondim (2024), Henkes (2025) e Rodrigues (2025). As publicações internacionais selecionadas foram: Khujamberdiev e Cho (2024), Watson *et al.* (2024) e Bardon e Massol (2025). O conjunto contempla, de forma equilibrada, as três frentes temáticas estabelecidas para a inclusão: rotas tecnológicas de produção de SAF, análise de ciclo de vida e emissões de CO₂, e políticas públicas voltadas à aviação sustentável.

As publicações selecionadas, em conjunto com os relatórios institucionais, foram submetidas a uma análise comparativa entre diferentes tipos de combustíveis utilizados na aviação — combustíveis fósseis convencionais e biocombustíveis — a qual considerou indicadores como emissão de CO₂, eficiência energética, custo de produção e viabilidade econômica. Por fim, os resultados foram interpretados de acordo com objetivos do estudo, na busca por evidenciar a efetividade das tecnologias sustentáveis na aviação e o potencial dos biocombustíveis como alternativa para a mitigação das mudanças climáticas.

4. Resultados e Discussão

A análise dos estudos revisados e dos dados documentais consultados demonstra que o uso de tecnologias sustentáveis na aviação apresenta resultados positivos, especialmente quando associado à adoção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). Entre as alternativas analisadas, os biocombustíveis destacaram-se como a solução de curto e médio prazo mais viável para reduzir as emissões de carbono no setor aéreo, principalmente por sua compatibilidade com a infraestrutura e com a frota atual de aeronaves [7].

Os resultados indicam que diferentes rotas tecnológicas de produção de SAF, como HEFA, FT-SPK e ATJ, podem proporcionar reduções expressivas nas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida do combustível, os quais variam entre 60% e 80% em comparação ao querosene fóssil convencional, a depender da matéria-prima utilizada, do processo produtivo e da logística envolvida [6]. Combustíveis produzidos a partir de resíduos orgânicos e óleos residuais apresentaram melhor desempenho ambiental, por evitarem competição direta com a produção de alimentos e reduzirem impactos indiretos no uso do solo [8].

No aspecto operacional, observou-se que o uso de misturas de SAF com querosene convencional não comprometeu a segurança nem o desempenho das aeronaves nos casos testados comercialmente [4]. Companhias aéreas internacionais que adotaram voos com SAF relataram resultados satisfatórios quanto à eficiência energética e à redução da pegada de carbono [10]. Isso demonstra que a tecnologia já se encontra em estágio aplicável, embora ainda limitada em escala global [3].

Entretanto, os resultados também evidenciam obstáculos, em que o principal deles é o custo de produção, ainda superior ao do combustível fóssil, o qual pode variar entre duas e cinco vezes mais, conforme a rota tecnológica e a disponibilidade de matéria-prima [9]. Tal diferença impacta diretamente a competitividade econômica das companhias aéreas, especialmente em mercados sensíveis ao preço das passagens.

Outro fator identificado foi a baixa oferta mundial de SAF, que atualmente representa parcela reduzida do consumo total de combustível da aviação. Essa limitação está relacionada à capacidade industrial insuficiente, aos desafios logísticos e à necessidade de investimentos em refinarias, centros de distribuição e certificação técnica [14].

No campo regulatório, verificou-se que políticas públicas têm influência decisiva para ampliar a adoção dos biocombustíveis. Programas como o CORSIA, da ICAO [2], o ReFuelEU Aviation, na União Europeia, e incentivos fiscais nos Estados Unidos [11] têm estimulado investimentos e metas de uso obrigatório de SAF. No contexto brasileiro, a Lei n. 14.993/2024 e o ProBioQAV representam um marco regulatório importante para a transição energética do setor aéreo nacional [13, 15]. Observa-se que países que adotam políticas consistentes tendem a avançar mais rapidamente na transição energética do setor.

5. Conclusão

Considerando que o objetivo deste estudo foi analisar o potencial dos biocombustíveis como tecnologia sustentável na aviação e a sua contribuição para a redução das emissões de carbono, entende-se que o objetivo foi atendido.

Os resultados indicam que os biocombustíveis são, atualmente, uma alternativa eficaz para a redução das emissões de carbono na aviação, especialmente em curto prazo, enquanto tecnologias como hidrogênio verde e aeronaves elétricas ainda estão em desenvolvimento. Contudo, a sua consolidação depende do aumento da produção, da redução de custos, da continuidade de incentivos governamentais e privados, de ganhos de eficiência operacional e de inovação tecnológica. Desse modo, os biocombustíveis ocupam posição estratégica por oferecerem aplicação imediata e resultados ambientais consistentes. Com base na análise das publicações selecionadas, entende-se que a descarbonização da aviação depende da combinação

entre combustíveis sustentáveis, modernização da frota e avanços operacionais ligados às cadeias produtivas.

O desafio das mudanças climáticas tem impulsionado o setor aéreo a busca soluções sustentáveis e, nesse contexto, os biocombustíveis se destacam como uma alternativa viável para reduzir as emissões de carbono associadas ao transporte aéreo. Os resultados da revisão bibliográfica sugerem que os combustíveis sustentáveis de aviação podem contribuir com a descarbonização do setor, principalmente quando associados a outras tecnologias sustentáveis e a melhorias operacionais de produção.

Diante disso, percebe-se que para que o seu uso seja ampliado, é necessário superar desafios relacionados ao custo, à produção em escala e às políticas de incentivo. Investimentos em pesquisa, inovação tecnológica e políticas públicas são fundamentais para viabilizar a transição energética na aviação. Assim, a adoção de biocombustíveis representa um passo importante em direção a um sistema de transporte aéreo mais sustentável e alinhado às metas globais de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Como sugestões para estudos futuros, propõe-se: (a) a realização de pesquisas empíricas e estudos de caso com dados operacionais reais de companhias aéreas brasileiras que adotem misturas de SAF, com vistas a quantificar as reduções efetivas de emissões e os impactos econômicos sobre as tarifas e as cadeias produtivas; (b) a avaliação dos efeitos da implementação da Lei n. 14.993/2024 e do ProBioQAV sobre a expansão da produção nacional de biocombustíveis, considerando matérias-primas regionais como cana-de-açúcar, soja, óleos residuais e resíduos lignocelulósicos; (c) análises comparativas de ciclo de vida entre as rotas tecnológicas já consolidadas (HEFA, FT-SPK, ATJ, SIP, CHJ) e tecnologias emergentes, como hidrogênio verde, combustíveis sintéticos (Power-to-Liquid) e propulsão elétrica/híbrida, a fim de identificar combinações tecnológicas mais eficientes para a descarbonização do setor; (d) investigações sobre os impactos socioambientais da expansão da produção de biomassa destinada à aviação, em especial quanto à competição com a produção de alimentos, ao uso do solo e à preservação da biodiversidade; e (e) estudos sobre a infraestrutura logística, de refino, de distribuição e de certificação técnica necessária à ampliação da oferta de SAF no Brasil, com a identificação de gargalos, oportunidades de investimento e modelos regulatórios capazes de acelerar a transição energética do setor aéreo nacional.

6. Referências

1. Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva (2023).
2. International Civil Aviation Organization: ICAO environmental report 2022: innovation for a green transition. ICAO, Montreal (2022).
3. International Air Transport Association: Fly Net Zero — 2050 commitment and aviation energy transition. IATA, Montreal (2023).
4. Bento, F.M., Lobato, M.R., Beker, S.A., Brilhante, E.L.G.: Combustíveis de aviação: histórica atenção ao armazenamento. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas* 4(4), 101–136 (2024).
5. Costa, R.C., Teixeira, C.A.N., Mendes, A.P.A., Rocio, M.A.R.: Combustível sustentável de aviação. *BNDES Setorial* 30(58), 97–142 (2024).

6. Khujamberdiev, R., Cho, H.M.: Biofuels in aviation: exploring the impact of sustainable aviation fuels in aircraft engines. *Energies* 17(11), 2650 (2024). <https://doi.org/10.3390/en17112650>
7. Watson, M.J., Machado, P.G., da Silva, A.V., Saltar, Y., Ribeiro, C.O., Nascimento, C.A.O., Dowling, A.W.: Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 449, 141472 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>
8. Fernandes, J.L.S., Alves, L.F.R.C., Mota, M.M.A., Tavares, A.C.A., Santos, T.E.F., Cavalcante Neto, J.L., Ferreira Neto, M.P., Gouveia, D.S.: Biocombustíveis na aviação: desafios e inovações. *Revista Foco* 17(10), e6360 (2024). <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n10-021>
9. Bardon, P., Massol, O.: Decarbonizing aviation with sustainable aviation fuels: myths and realities of the roadmaps to net zero by 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 211, 115279 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115279>
10. Casas, L.J., Henkes, J.A.: Gestão energética sustentável: novos combustíveis para a aviação e estruturas de suporte. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas* 4(2), 192–242 (2024).
11. Federal Aviation Administration: Sustainable aviation fuel grand challenge — roadmap and progress report. FAA, Washington (2023).
12. Agência Nacional de Aviação Civil: Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil. ANAC, Brasília (2023).
13. dos Santos Estevo, J., Forti Thomaz, L., Duarte Gondim, A.: Aviação civil e sustentabilidade no Brasil: o papel dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). *Revista Brasileira de Transportes* 4(2), 20–55 (2024). <https://doi.org/10.12660/rbt.v4n2.2024.91297>
14. Henkes, J.A.: Combustíveis sustentáveis para a aviação no Brasil — atualidade e perspectivas futuras. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas* 5(5), 1–7 (2025).
15. Rodrigues, A.: A aviação civil e a inserção de combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil. *Revista Brasileira de Transportes* (2025). <https://doi.org/10.12660/rbt.v5n1.2025.93913>