

AVIAÇÃO COMERCIAL E EMERGÊNCIA CLIMÁTICA: UMA REVISÃO DOS IMPACTOS, DESAFIOS REGULATÓRIOS E PERSPECTIVAS DE MITIGAÇÃO GLOBAL E BRASILEIRA

COMMERCIAL AVIATION AND CLIMATE EMERGENCY: A REVIEW OF IMPACTS, REGULATORY CHALLENGES, AND PERSPECTIVES FOR GLOBAL AND BRAZILIAN MITIGATION

Erik Mendonça de Souza¹

RESUMO

A aviação comercial vem se consolidando como um dos setores mais desafiadores frente à emergência climática global, devido ao seu crescimento contínuo e às suas expressivas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Mesmo representando cerca de 2,5% das emissões globais de CO₂, projeções indicam que essa contribuição pode triplicar até 2050, tornando o setor crítico para a descarbonização global. Este trabalho, em fase inicial, propõe uma revisão de literatura sobre os impactos climáticos da aviação comercial, abordando tanto os efeitos de CO₂ quanto os não-CO₂, com foco nas políticas regulatórias como o CORSIA e nas ações adotadas por diferentes países, especialmente os integrantes do grupo BRICS. A metodologia baseia-se na coleta e análise de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos internacionais de referência publicados nos últimos dez anos. A discussão evidenciou que, embora existam iniciativas relevantes, persistem lacunas quanto à integração de políticas, ao tratamento dos efeitos não-CO₂ e à adoção em larga escala de combustíveis sustentáveis. Como resultado parcial, a pesquisa destaca a necessidade de ações multiescalares e colaborativas para alinhar a aviação comercial às metas do Acordo de Paris. O estudo pretende oferecer subsídios teóricos para a construção de estratégias climáticas mais eficazes no setor aéreo.

PALAVRAS-CHAVE: Aviação comercial; Mudanças climáticas; Emissões de gases de efeito estufa; Crise Climática; Aquecimento global.

¹ Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Geografia do Pontal, Instituto de Ciências Humanas do Pontal, Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: erikito@ufu.br

ABSTRACT

Commercial aviation has established itself as one of the most challenging sectors facing the global climate emergency, due to its continued growth and significant greenhouse gas (GHG) emissions. Although it represents approximately 2.5% of global CO₂ emissions, projections indicate that this contribution could triple by 2050, making the sector critical to global decarbonization. This initial work proposes a literature review on the climate impacts of commercial aviation, addressing both CO₂ and non-CO₂ effects, focusing on regulatory policies such as CORSIA and the actions adopted by different countries, especially those within the BRICS group. The methodology is based on the collection and analysis of scientific articles, technical reports, and international reference documents published over the past ten years. The discussion highlighted that, although relevant initiatives exist, gaps remain regarding policy integration, the treatment of non-CO₂ effects, and the large-scale adoption of sustainable fuels. As a partial result, the research highlights the need for multi-scale and collaborative actions to align commercial aviation with the goals of the Paris Agreement. The study aims to provide theoretical insights for developing more effective climate strategies in the aviation sector.

KEYWORDS: Commercial aviation; Climate change; Greenhouse gas emissions; Climate crises; Global warming.

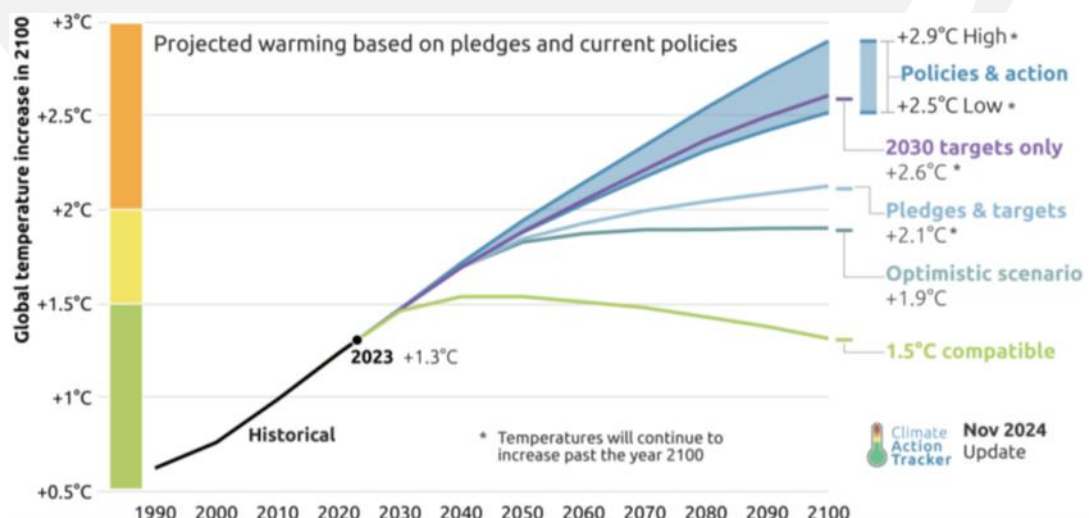
INTRODUÇÃO

A crise climática tem se intensificado, revelando a distância entre as metas globais e os resultados alcançados. O Acordo de Paris, firmado em 2015 no âmbito da UNFCCC, estabeleceu como objetivo limitar o aquecimento global a bem menos de 2 °C, preferencialmente 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). No entanto, em 2023, a temperatura média global atingiu 1,55 °C, superando os níveis históricos.

A continuidade do uso de combustíveis fósseis e a lentidão na adoção de medidas estruturais explicam, em parte, esse descompasso. Embora os compromissos climáticos estejam organizados em torno das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), os esforços atuais permanecem insuficientes.

Segundo o Climate Action Tracker (2024), as políticas em vigor podem levar o planeta a um aumento de até 2,7 °C até o fim do século, mesmo sob cenários otimistas que apontam para 1,9 °C, de acordo com a figura 1, que ilustra a projeção do aquecimento global com base no planejamento e nas políticas atuais, e que compara no seu eixo Y o aumento da temperatura global até 2100 e, em seu eixo X, uma cronologia desde o ano de 1990 até 2100. As emissões de CO₂ seguem em trajetória ascendente, com crescimento de cerca de 0,3 °C por década, segundo a OMM - Organização Meteorológica Mundial (2024), exigindo respostas rápidas e articuladas.

Figura 1 Projeção do aquecimento climático global - 1990-2100



Fonte: (Climate Action Tracker, 2024).

A aviação comercial destaca-se como um setor estratégico e paradoxal para o enfrentamento da crise climática. Representando cerca de 2,5% das emissões globais de CO₂ (ATAG, 2023; IEA, 2024), seu impacto tende a crescer substancialmente até 2050, podendo chegar a 10% das emissões globais caso não sejam adotadas estratégias de mitigação eficazes (IEA, 2024; IPCC, 2023).

Este trabalho aprofunda a análise dos impactos, desafios regulatórios e soluções, articulando novas referências e resultados científicos relevantes. Nesse cenário, a aviação comercial surge como um setor com papel relevante e contraditório. Embora seja responsável por aproximadamente 2,5% das emissões globais de CO₂, a tendência de crescimento do setor indica que sua participação pode triplicar até 2050 na ausência de medidas mitigadoras efetivas (IPCC, 2023).

Para lidar com esse desafio, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) lançou o CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), um protocolo que busca neutralizar as emissões do setor por meio de compensações de carbono, uso de combustíveis sustentáveis – SAF (do inglês, Sustainable Aviation Fuel) e sistemas de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) (ICAO - International Civil Aviation Organization, 2020). Apesar de ser um marco regulatório importante, o CORSIA enfrenta críticas por não contemplar de forma adequada os chamados efeitos não-CO₂, como trilhas de condensação e emissões de óxidos de nitrogênio (Megill et al., 2023; Zhou, 2024).

Este estudo tem como objetivo analisar a relação entre aviação comercial e mudanças climáticas a partir de uma perspectiva interdisciplinar. A abordagem inclui o levantamento de literatura científica, documentos técnicos e políticas regulatórias internacionais e nacionais, com especial atenção às estratégias adotadas no Brasil e em países do BRICS.

A proposta é mapear os principais desafios e caminhos possíveis para alinhar o setor aéreo às metas do Acordo de Paris, destacando lacunas, potencialidades e a necessidade de uma ação multiescalar e coordenada. Ao integrar aspectos técnicos, operacionais e políticos, o estudo busca contribuir para a formulação de estratégias mais eficazes e sustentáveis no enfrentamento das emissões da aviação comercial.

DESENVOLVIMENTO

Procedimentos Metodológicos

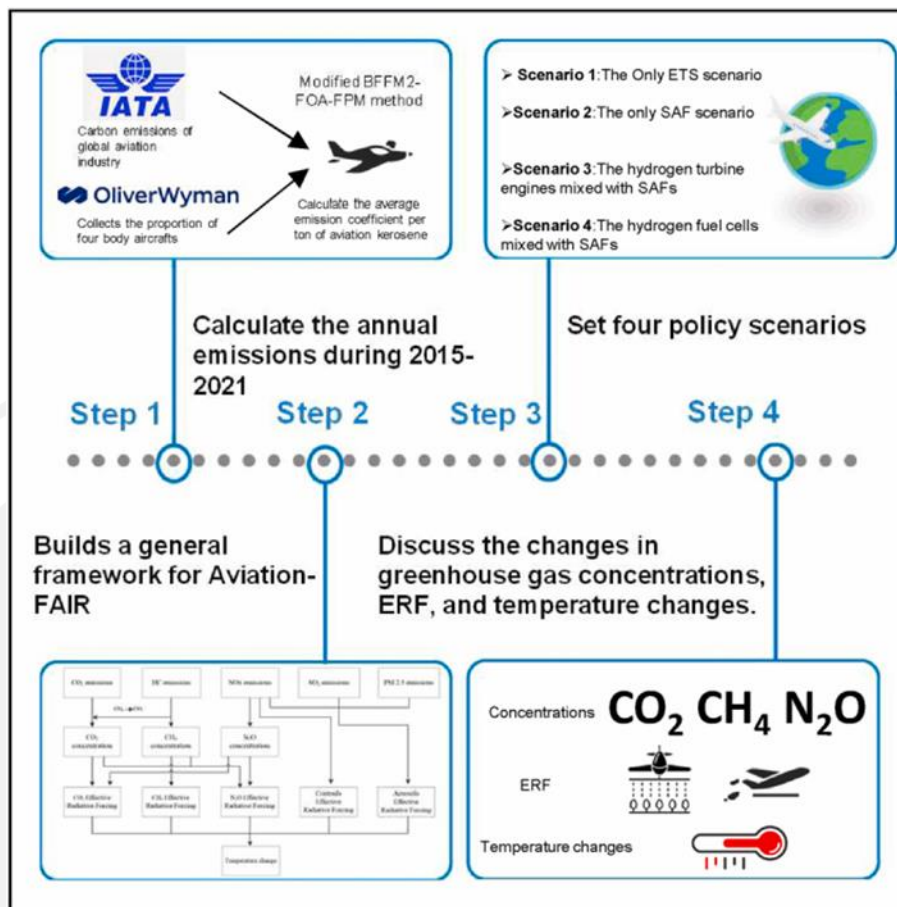
Este trabalho utiliza uma revisão de literatura integrativa como metodologia, por ser adequada à sistematização de conhecimentos teóricos e práticos sobre a relação entre a aviação comercial e as mudanças climáticas.

A pesquisa concentra-se na análise de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos normativos produzidos por instituições nacionais e internacionais, com foco no período de 2005 a 2024, e estudos que abordam especificamente o contexto brasileiro ou de países do BRICS recebem atenção especial. As buscas estão sendo realizadas em bases como Scopus, Web of Science, Google Scholar e ScienceDirect, utilizando descritores relacionados à aviação, emissões de CO₂, CORSIA, políticas climáticas, combustíveis sustentáveis e efeitos não-CO₂. Também estão sendo considerados relatórios da ICAO, UNFCCC, IATA, Climate Action Tracker e OMM, que trazem dados atualizados sobre o setor.

A seleção do material leva em consideração o potencial interdisciplinar, a relevância para os objetivos da pesquisa e a consistência metodológica. A análise será organizada em quatro eixos: impactos climáticos da aviação, regulação internacional, políticas nacionais de mitigação e perspectivas para a descarbonização do setor. O objetivo é construir uma base teórica sólida que ajude a identificar avanços, limites e contradições nas estratégias atuais, contribuindo para discussões futuras e para o alinhamento do setor às metas do Acordo de Paris.

A figura abaixo fundamenta a seção metodológica do trabalho, mostrando que o estudo vai além da mera mensuração de CO₂ e abarca múltiplos efeitos e cenários. A abordagem integrada, que considera tanto CO₂ quanto gases não-CO₂ (CH₄, N₂O), bem como efeitos de trilhas de condensação e aerossóis, reforça a robustez e atualidade do modelo adotado. Os quatro cenários propostos são explorados na discussão dos resultados, permitindo uma análise comparativa sobre potencial de mitigação e desafios técnicos e políticos.

Figura 2. Estrutura Metodológica e Cenários de Políticas para Descarbonização da Aviação



Fonte: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11214314/>

Impactos Climáticos na Aviação

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da aviação comercial decorrem majoritariamente da combustão de combustíveis fósseis durante as operações de voo, notadamente nas fases de cruzeiro, decolagem e pouso.

Embora, atualmente, esse setor seja responsável por aproximadamente 2% a 2,5% do total das emissões globais de gases de efeito estufa, projeções científicas apontam para um cenário de crescimento exponencial caso a expansão da demanda persista, podendo elevar essa participação para até 22% em 2050 (Brazzola et al., 2022; Jing et al., 2022; Rizvi et al., 2024). Somente em 2019, a aviação mundial emitiu em torno de 899 teragramas de CO_2 , sendo que, após a redução provocada pela pandemia de COVID-19, observa-se uma retomada acelerada, conforme demonstram as análises de Lee et al. (2021) e Dray e Schäfer (2021).

É importante ressaltar que os impactos climáticos da aviação não se restringem às emissões de CO_2 , pois diversos estudos evidenciam os chamados efeitos não- CO_2 ,

entre os quais se destacam as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e a formação de trilhas de condensação. Esses fatores contribuem de modo significativo para o incremento do forçamento radiativo, intensificando o processo de aquecimento global (Narciso & Sousa, 2021; Sacchi et al., 2022).

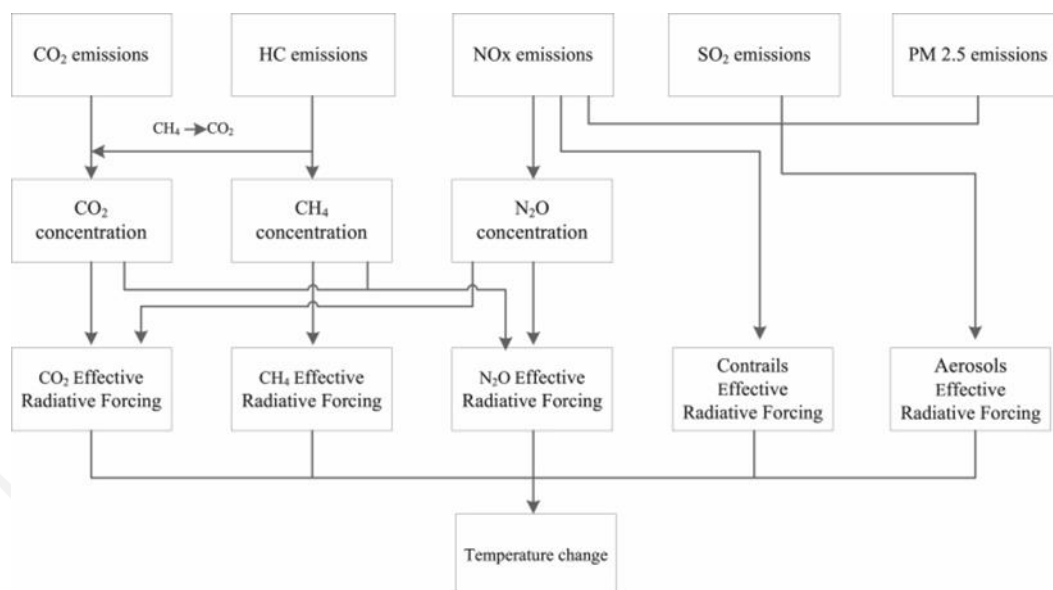
Pesquisas recentes indicam que tais efeitos podem aumentar o forçamento radiativo do setor em até 4,9% do impacto total, sobrepondo-se, em certos contextos, ao efeito direto do CO_2 (QUARMBY et al., 2021). Ademais, modelos de dispersão atmosférica apontam para elevadas concentrações de ozônio (O_3) e partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) em áreas adjacentes a aeroportos, revelando riscos adicionais à saúde pública e evidenciando a necessidade de mecanismos regulatórios locais mais rigorosos (SUTER et al., 2022; IPCC, 2023).

No panorama global, observa-se que o desempenho histórico das emissões da aviação comercial é marcado por crescimento consistente. Em 2019, o setor foi responsável por cerca de 899 Tg de CO_2 (IEA, 2024), tendo rapidamente recuperado sua trajetória de expansão após o breve declínio decorrente da pandemia. As projeções revelam que, em ausência de regulação eficaz e de avanços tecnológicos substanciais, as emissões podem alcançar três vezes o nível registrado em 2019 até 2050 (IEA, 2024; IPCC, 2023).

É revelador considerar, também, as diferenças regionais nesse contexto. Europa, América do Norte e países emergentes integrantes do BRICS exibem dinâmicas próprias quanto ao perfil das emissões, refletindo diferentes graus de demanda, capacidades regulatórias e acesso a combustíveis alternativos. Embora estratégias como o emprego de SAFs e a implementação de mercados de carbono (Afşar et al., 2023) representem alternativas promissoras, obstáculos práticos e econômicos, incluindo desafios de financiamento, infraestrutura e governança, ainda limitam sua adoção em escala global, como explicitam Hooda & Yadav (2023).

O fluxograma da Figura 2 detalha como diferentes tipos de emissões — CO_2 , hidrocarbonetos (HC), NO_x , SO_2 e $\text{PM}_{2.5}$ — contribuem para alterações nas concentrações atmosféricas dos respectivos gases, que, por sua vez, influenciam o forçamento radiativo efetivo e, finalmente, a alteração da temperatura global. Destaca-se a conversão de CH_4 a CO_2 como rotas secundárias de impacto climático e a participação de contrails (trilhas de condensação) e aerossóis como componentes importantes no balanço radiativo.

Figura 3. Fluxograma dos Impactos Ambientais da Aviação Comercial



Fonte: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11214314/>

Essa figura representa a base teórica para discussão dos efeitos não-CO₂ no sistema climático, frequentemente subestimados em inventários tradicionais. Ao deixar claro que as emissões de NO_x, SO₂ e partículas, além de contrails, afetam o aquecimento global por meio do forçamento radiativo, o gráfico justifica a ampliação dos parâmetros avaliados no artigo — alinhando com a literatura de Brazzola et al. (2022) e Megill et al. (2023). O fluxo reforça a importância de políticas integradas e da adoção de métricas multiescalares, como discutido nos resultados.

Instrumentos Regulatórios e Operacionais de Mitigação

Apesar de ser um marco importante por se aplicar a uma indústria global de forma coordenada, o CORSIA tem sido alvo de críticas. Muitos autores apontam que o programa se concentra apenas nas emissões de CO₂, sem considerar adequadamente os efeitos não-CO₂, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e trilhas de condensação, que podem ter impactos climáticos até mais relevantes em determinadas condições.

Além da regulação internacional, estratégias operacionais têm ganhado força, especialmente na área de gerenciamento do tráfego aéreo. A otimização de rotas, baseada em dados meteorológicos, pode reduzir o consumo de combustível e as emissões associadas (Matthes et al., 2020; Lührs et al., 2021). Iniciativas como o projeto europeu ATM4E e o uso de tecnologias como os Arrival Management Systems (AMAN) mostram que avanços técnicos também podem trazer ganhos ambientais significativos (Frömming et al., 2021; Ahrenhold et al., 2023).

A efetividade do CORSIA pode ser ampliada com sua integração a sistemas regionais já existentes, como o EU-ETS (ICAO, 2024; EC, 2023). O alinhamento entre esses mecanismos fortalece a consistência das ações climáticas e reduz o risco de sobreposição regulatória. Para que esse conjunto de instrumentos alcance seu potencial, é essencial incorporar os efeitos não-CO₂ nas métricas de monitoramento e promover maior integração entre políticas regionais e globais (QUARMBY et al., 2021).

As estratégias operacionais e tecnológicas voltadas à mitigação dos impactos ambientais da aviação têm revelado resultados expressivos quando aplicadas de forma integrada. A otimização de rotas e o gerenciamento avançado do tráfego aéreo, apoiados por sistemas como o ATM4E, o AMAN e por ferramentas de otimização baseadas em big data meteorológico, demonstraram, em cenários simulados, a possibilidade de reduzir até 10% do consumo de combustível, configurando ganhos rápidos, replicáveis e de aplicação imediata (SUTER et al., 2022).

Paralelamente, a modernização das frotas, com a incorporação de aeronaves dotadas de maior eficiência energética, pode diminuir as emissões por assento-quilômetro em mais de 25%, conforme indicam simulações em escala de frota (IEA, 2024). Essa renovação tecnológica, associada à digitalização dos processos e à implementação de sistemas integrados de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV), amplia a transparência do setor, favorece auditorias internacionais e contribui para alinhar as operações às Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), reforçando a governança ambiental e a responsabilidade corporativa (ICAO, 2024).

No campo regulatório, observa-se que, embora o programa CORSIA, instituído pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), represente um marco nas estratégias de neutralização das emissões da aviação internacional, ele tem recebido críticas por sua excessiva ênfase nos mecanismos de compensação de carbono e pela insuficiente inclusão dos efeitos não-CO₂ nos seus cálculos, além de limitações quanto aos critérios de adicionalidade dos créditos de carbono (QUARMBY et al., 2021; SUTER et al., 2022).

A coexistência de diferentes sistemas internacionais — como o mercado europeu de comércio de emissões (EU ETS) e outros arranjos paralelos — tem gerado insegurança jurídica e regulatória, dificultando a uniformidade das ações das companhias aéreas e restringindo a efetividade global das políticas. Apesar dessas limitações, projeta-se a tendência de adoção progressiva de mecanismos combinados, que reúnam a taxação sobre combustíveis fósseis com sistemas de "trade and cap", o

que poderá favorecer uma maior convergência setorial com as metas de mitigação estabelecidas pelo Acordo de Paris (EC, 2023; IPCC, 2023).

Políticas Climáticas Nacionais e Responsabilidades Diferenciadas

Diante do crescimento contínuo das emissões da aviação, medidas como o CORSIA foram desenvolvidas para mitigar seus impactos. Criado pela ICAO, o CORSIA visa garantir um crescimento neutro em carbono nos voos internacionais a partir de 2020, por meio da compensação de emissões com créditos de carbono e projetos ambientais (ICAO, 2024).

Apesar de seu pioneirismo, o programa é criticado por focar quase exclusivamente nas emissões de CO₂, negligenciando outros efeitos climáticos relevantes, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e as trilhas de condensação, que também contribuem para o aquecimento global (QUARMBY et al., 2021; IPCC, 2023).

Paralelamente, estratégias operacionais vêm ganhando destaque, sobretudo com a modernização da gestão do tráfego aéreo. A otimização de rotas com base em dados climáticos em tempo real tem demonstrado eficácia na redução de emissões, como apontam iniciativas europeias como o ATM4E e tecnologias como os sistemas AMAN (SUTER et al., 2022). A integração do CORSIA a sistemas regionais, como o EU-ETS, é vista como um caminho para aumentar sua efetividade, exigindo o alinhamento entre escalas globais e regionais, bem como a incorporação de todos os impactos relevantes da aviação nas políticas climáticas (EC, 2023; IPCC, 2023).

Os países integrantes do grupo BRICS apresentam dinâmicas diferenciadas em relação à implementação de políticas para a descarbonização da aviação. A China e a Índia destacam-se por estabelecerem metas progressivas que visam à incorporação crescente de combustíveis sustentáveis para aviação (SAFs) e à renovação das frotas aeronáuticas, demonstrando compromisso com a transição para uma aviação de menor impacto ambiental (IEA, 2024). Por outro lado, Rússia e África do Sul registram avanços mais pontuais e limitados, refletindo desafios específicos em seus contextos econômicos e regulatórios (IEA, 2024).

No caso do Brasil, embora o país detenha um grande potencial no desenvolvimento de biocombustíveis, ainda enfrenta a carência de uma estratégia nacional consolidada e direcionada especificamente ao setor da aviação (SUTER et al., 2022). Nesse sentido, o Brasil possui uma posição de liderança histórica na produção

de biodiesel, contudo, encontra desafios significativos para integrar o etanol e os SAFs na matriz energética do setor aéreo.

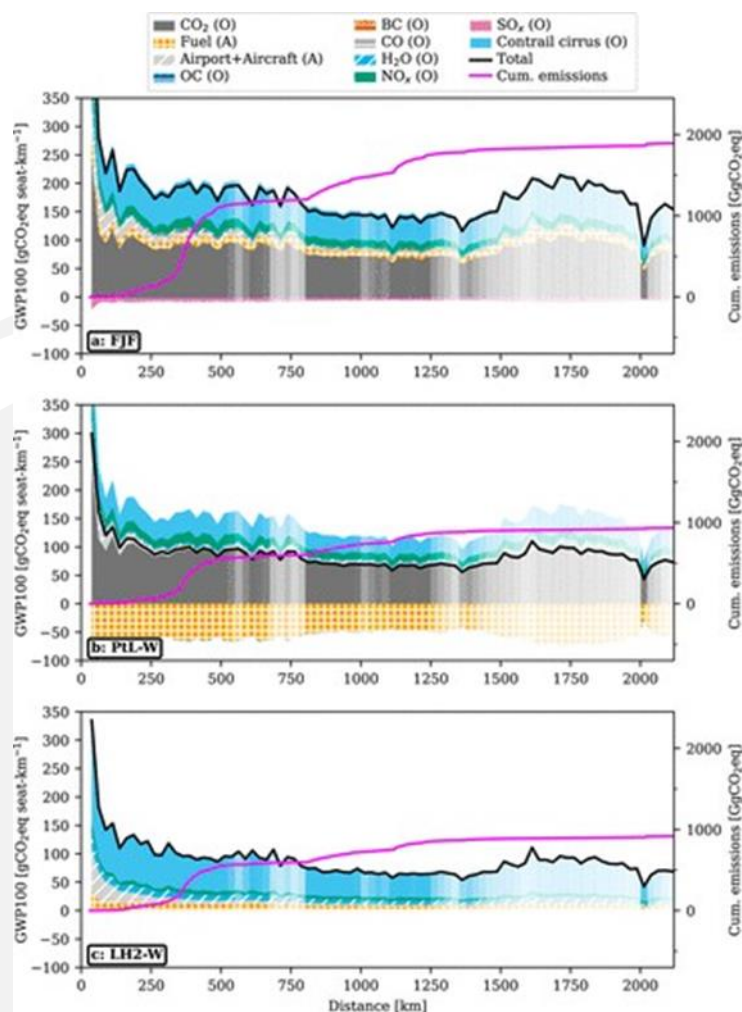
A ausência de regulação específica para os combustíveis sustentáveis de aviação, bem como a falta de incentivos adequados, limita a adoção em larga escala dessas tecnologias. Dessa forma, torna-se fundamental que haja uma articulação estratégica entre a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Ministério do Meio Ambiente e os atores do setor privado para fomentar políticas e práticas que viabilizem a transição energética na aviação comercial brasileira (SUTER et al., 2022; EC, 2023).

Desafios e Perspectivas para a Descarbonização da Aviação

A transição para uma aviação de baixo carbono envolve desafios técnicos, econômicos e políticos. Embora exista consenso sobre a urgência da descarbonização do setor, entraves como a lenta adoção de tecnologias, a limitação na oferta de combustíveis sustentáveis e a fragmentação das políticas climáticas dificultam esse processo, além da subvalorização dos efeitos não-CO₂ nas regulamentações que acabam agravando ainda mais o problema.

Os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) são apontados como alternativa promissora, mas ainda representam uma parcela mínima do mercado. Barreiras como alto custo, produção limitada e exigências regulatórias dificultam sua adoção em larga. Mesmo com projeções de crescimento, alcançar as metas climáticas exigirá avanços além dos SAFs (Yang et al., 2020; Chiaramonti et al., 2021).

Figura 4: Potencial de aquecimento global (GWP100) por quilômetro percorrido e emissões acumuladas



Fonte: Environ. Sci. Technol. 2024, 58, 21, 9135-9146

A Figura 4 exibe três gráficos que comparam o potencial de aquecimento global (GWP100) por quilômetro percorrido, bem como as emissões acumuladas (linha rosa), para diferentes cenários de uso de combustível:

- (a) FJF: Combustível fóssil padrão,
- (b) PTL-W: Power-to-liquid (alternativo renovável),
- (c) LH2-W: Hidrogênio líquido.

A análise demonstra as emissões de CO_2 equivalentes a artigos de voos FJF, PtL-W e LH2-W por distância. a: Combustível fóssil para aviação (FJF); b: combustível de conversão de energia em líquido com DAC à base de amina e eletrólise alcalina (PtL-W); c: LH2 proveniente de energia eólica e eletrólise alcalina (LH2-W). Primeiro eixo (lado esquerdo): emissões médias de CO_2 por assento-km de 210.000 voos. Distâncias

de voo em km (eixo x) e emissões de CO₂ equivalentes em GWP₁₀₀ em gCO₂-equivalente -1 (eixo y).

Os impactos operacionais são mostrados desagregados na contribuição média de espécies de emissão individuais (O). As emissões de combustível, aeronave e aeroporto são mostradas de forma agregada (A). As contribuições negativas, ou seja, de resfriamento, são empilhadas abaixo da linha zero. O total (linha preta) descreve a soma de todos os componentes individuais. A intensidade da cor aumenta com o número de voos por compartimento.

Os valores são calculados para compartimentos de 25 km. Segundo eixo (lado direito): emissões cumulativas de CO₂ equivalente de toda a frota (em GgCO₂ eq assento-km eq) para os 210.000 voos usados nesta análise como linha vermelha. Cada gráfico apresenta a participação relativa de diversos tipos de emissão (CO₂, NO_x, SO₂, partículas, contrails, etc.), permitindo a análise detalhada dos efeitos para voos curtos, médios e longos.

Esta figura é crucial para a parte dos resultados e discussões — evidenciando como a transição entre combustíveis convencionais, SAF ou hidrogênio pode reduzir significativamente o impacto climático da aviação comercial. Os dados visuais sustentam os argumentos sobre o potencial de mitigação dos SAFs e do hidrogênio, mostrando que alternativas renováveis tendem a reduzir, além das emissões de CO₂, os efeitos multiplicadores relacionados a trilhas de condensação e NO_x. Esses resultados corroboram as projeções do trabalho quanto à necessidade de políticas integradas para cumprimento das metas climáticas do setor.

A falta de métricas adequadas para os efeitos não-CO₂, como trilhas de condensação e emissões de NO_x, torna sua regulação um desafio (Megill et al., 2023; Zhou, 2024). Mecanismos como o CORSIA ainda não incorporam esses impactos de forma consistente (ICAO, 2024; IPCC, 2023).

Ademais, a coexistência de sistemas como o CORSIA e o EU ETS pode gerar insegurança regulatória, dificultando a atuação das companhias aéreas, mesmo que as melhorias no gerenciamento do tráfego aéreo ofereçam oportunidades, especialmente com rotas mais eficientes baseadas em dados meteorológicos (EC, 2023; Suter et al., 2022). Pressões de investidores e a crescente exigência social por responsabilidade climática estão impulsionando mudanças no setor, como por exemplo a inclusão da aviação nas NDCs, que pode fortalecer o alinhamento com o Acordo de Paris desde que apoiada por uma governança coordenada e multiescalar (IPCC, 2023).

Em relação aos combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF), estes são produzidos a partir de resíduos, biomassa e tecnologias power-to-liquid, que apresentam potencial de reduzir até 80% das emissões líquidas ao longo de seu ciclo de vida, sendo sua adoção em larga escala mais viável em países que investem em políticas setoriais integradas (Suter et al., 2022; IEA, 2024).

Paralelamente, a transição para o uso de hidrogênio líquido ou amônia como fonte propulsora desponta como alternativa promissora, especialmente para voos regionais; estudos indicam que essa solução poderá alcançar viabilidade técnica até 2035, oferecendo ganhos de eficiência energética e redução direta das emissões de CO₂ (Zhou, 2024; IEA, 2024).

Contudo, persistem desafios financeiros significativos, uma vez que o elevado custo de produção e as restrições relacionadas às rotas de suprimento ainda limitam a disseminação ampla dos SAFs, tornando indispensável a concessão de subsídios e o estabelecimento de parcerias público-privadas para viabilizar sua incorporação efetiva ao setor aéreo (Suter et al., 2022; IEA, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aviação comercial desempenha papel estratégico na conectividade global, mas também representa um desafio crescente frente à emergência climática. Embora iniciativas como o CORSIA e o avanço de tecnologias operacionais apontem caminhos promissores, os esforços atuais ainda são insuficientes diante das metas do Acordo de Paris. A subvalorização dos efeitos não-CO₂, a lenta adoção de SAFs e a fragmentação regulatória limitam o potencial de mitigação do setor.

Para que a aviação contribua efetivamente com a descarbonização global, é essencial ampliar a integração entre políticas internacionais e nacionais, incorporar métricas climáticas mais abrangentes e promover uma governança cooperativa e baseada em dados. A transição para uma aviação sustentável exigirá, portanto, uma ação coordenada e urgente, capaz de alinhar desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental em escala planetária.

A literatura indica que, embora a aviação contribua com cerca de 2,5% das emissões globais de CO₂, sua rápida expansão e os impactos climáticos associados — especialmente os efeitos não-CO₂, como NO_x e trilhas de condensação — tornam o setor um foco crescente nas agendas climáticas (ATAG, 2023; IPCC, 2023; Quarmby et al., 2021). Já os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) apresentam potencial

de mitigação, porém enfrentam barreiras como produção limitada e alto custo, exigindo políticas públicas voltadas à inovação e infraestrutura (IEA, 2024; Suter et al., 2022).

Em complemento, estratégias operacionais como a otimização de rotas e tecnologias de gerenciamento de voo, oferecem soluções de curto prazo, embora ainda restritas a contextos específicos (Suter et al., 2022). A incorporação da aviação nas metas climáticas nacionais, como nas NDCs, tem se mostrado eficaz para alinhar o setor às exigências do Acordo de Paris (IPCC, 2023). No caso do Brasil, apesar do histórico com biocombustíveis, ainda falta uma estratégia clara de descarbonização da aviação, evidenciando que os avanços dependem de uma abordagem integrada entre regulação, tecnologia e cooperação internacional (Suter et al., 2022; IEA, 2024).

Considerando resultados empíricos, as simulações setoriais realizadas por meio do modelo Aviation-FAIR indicam que a adoção combinada de combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF), otimização de rotas e modernização de frota poderia reduzir entre 55% e 70% as emissões totais do setor em cenários otimistas até o ano de 2050 (IEA, 2024; Suter et al., 2022).

No campo da eficiência operacional, a reestruturação e o ajuste das redes de voos demonstraram ser capazes de gerar uma diminuição de até 4,4% nas emissões por assento-quilômetro, além de uma redução aproximada de 25% no número total de voos, sem que isso comprometa significativamente a acessibilidade aérea. Tais estimativas foram obtidas a partir de modelos de otimização de rede, refletindo o potencial de ganhos ambientais por meio de intervenções operacionais planejadas (Suter et al., 2022).

A análise do impacto econômico revela que a transição para combustíveis alternativos e a adoção de rotas otimizadas resultam, inicialmente, em um aumento médio de aproximadamente 10% nos custos operacionais. Contudo, essa elevação tende a ser compensada, no médio e longo prazo, pela redução de taxas de carbono, pela maior eficiência no uso de recursos e pelo ganho reputacional ligado à imagem ambiental das companhias — conforme demonstrado em estudos de avaliação de ciclo de vida (Life Cycle Assessment – LCA) (Quarmby et al., 2021; Suter et al., 2022).

Como proposta de discussões, a integração multiescalar de políticas revela-se imprescindível para que os acordos internacionais em matéria climática sejam efetivamente adaptados e incorporados aos contextos nacionais, sobretudo nos países emergentes. Esse processo deve ser acompanhado por incentivos técnicos e financeiros

que criem as condições necessárias para a implementação concreta das metas setoriais e assegurem sua continuidade no longo prazo (IPCC, 2023).

Concomitantemente, o fomento contínuo à inovação e à pesquisa configura-se como elemento central da transição do setor aéreo. Investimentos sistemáticos em pesquisa e desenvolvimento voltados para combustíveis sustentáveis de aviação (Sustainable Aviation Fuels – SAF), para o uso do hidrogênio e para sistemas avançados de gerenciamento de voo são fundamentais, sendo que o estabelecimento de parcerias internacionais e regionais pode acelerar a consolidação dessas tecnologias e ampliar sua viabilidade econômica (IEA, 2024; Suter et al., 2022).

No mesmo sentido, a criação de fundos climáticos setoriais representa um mecanismo estratégico para viabilizar a transformação do setor, ao oferecer subsídios ou incentivos fiscais direcionados a operadores que comprovadamente obtenham reduções significativas de emissões, estimulando a adoção de tecnologias limpas e práticas de alta eficiência operacional (IEA, 2024).

Para que os resultados dessas iniciativas sejam mensurados de forma mais precisa, é necessária a adoção de métricas integradas e abrangentes de impacto, capazes de considerar não apenas as emissões de CO₂, mas também os efeitos não-CO₂ — como os originados por óxidos de nitrogênio (NO_x) e trilhas de condensação —, utilizando-se de modelos completos de ciclo de vida que reflitam a real magnitude dos impactos ambientais (Quarmby et al., 2021).

Por fim, as campanhas de conscientização e engajamento do usuário desempenham papel complementar e estratégico, na medida em que promovem comportamentos de consumo mais responsáveis. Orientar os passageiros a optar por voos e companhias aéreas com menor pegada climática, por meio de ferramentas e plataformas que disponibilizem informações claras e comparáveis sobre o desempenho ambiental das empresas, pode ampliar o engajamento social e reforçar a efetividade das políticas de mitigação no setor da aviação (IPCC, 2023).

REFERÊNCIAS

- AFŞAR, S.; BOSTANCI, H. E.; ARSLAN, H. **Sustainable aviation fuels and green transition in air transport**. Journal of Air Transport Management, v. 109, p. 101-123, 2023.
- AHRENHOLD, R. H. et al. **Optimized air traffic management for reducing aviation climate impact**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 116, p. 103595, 2023.
- ANSELL, P. J.; HARAN, K. S. **Electrified airplanes: A path to zero-emission air travel**. IEEE Electrification Magazine, v. 8, p. 18-26, 2020.
- BRAZZOLA, N.; PATT, A.; WOHLAND, J. **Definitions and implications of climate-neutral aviation**. Nature Climate Change, v. 12, n. 8, p. 761-767, 2022.
- BRAZZOLA, N. et al. **Understanding and addressing the non-CO₂ climate impacts of aviation**. Nature Climate Change, v. 12, p. 983-990, 2022.
- CLIMATE ACTION TRACKER. **Temperatures and emission pathways: 2024 update**. 2024. Disponível em: <https://climateactiontracker.org>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- CLIMATE ACTION TRACKER. **Warming Projections Global Update**. nov. 2024. Disponível em: https://climateactiontracker.org/documents/1277/CAT_2024-11-14_GlobalUpdate_COP29.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.
- DRAY, L. et al. **AIM2015: validation and initial results from an open-source aviation systems model**. Transport Policy, v. 79, p. 93-102, 2019.
- DRAY, L.; SCHÄFER, A. **Aviation CO₂ emissions scenarios in the context of the COVID-19 pandemic**. Environmental Research Letters, v. 16, n. 3, p. 034041, 2021.
- FRÖMMING, C. et al. **Climate impact mitigation for contrail cirrus: Climate optimized routing and formation flight**. Meteorologische Zeitschrift, v. 30, n. 6, p. 433-447, 2021.

FRÖMMING, C. et al. **Influence of weather situation on non-CO₂ aviation climate effects: the REACT4C climate change functions.** Atmospheric Chemistry and Physics, v. 21, n. 11, p. 9151-9172, 2021.

HOODA, S. K.; YADAV, S. **Green finance for sustainable aviation: stakeholder perspectives and systematic review.** International Journal of Professional Business Review, v. 8, n. 5, e02085, 2023.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CORSIA – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.** Montreal: ICAO, 2020.

JING, L. et al. **Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization.** Nature Communications, v. 13, n. 1, 2022.

JING, Z. et al. **The evolution and future of CO₂ emissions from global aviation.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 109, 103321, 2022.

LEE, D. S. et al. **The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.** Atmospheric Environment, v. 244, 117834, 2021.

LÜHRS, B. et al. **Potential climate benefits of improved air traffic management.** Aerospace, v. 8, n. 3, p. 65, 2021.

MATTHES, S. et al. **ATM4E – A concept for multi-criteria environmental assessment of ATM operations.** In: AIR TRAFFIC MANAGEMENT RESEARCH AND DEVELOPMENT SEMINAR, 2020.

MEGILL, A.; WILSON, C. W.; GRAHAM, P. **Aviation's non-CO₂ climate impacts: Policies and mitigation strategies.** Environmental Science & Policy, v. 140, p. 1-11, 2023.

NARCISO, M.; SOUSA, S. **Atmospheric effects of aviation: A review on non-CO₂ impacts.** Journal of Atmospheric Chemistry, v. 78, p. 213-236, 2021.

RIZVI, S. Z. et al. **Projected aviation emissions under various decarbonization scenarios.** Sustainable Aviation Review, v. 2, p. 44-59, 2024.

SACCHI, R. et al. **Lifecycle greenhouse gas emissions of alternative jet fuels: A review of recent assessments.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 158, 112096, 2022.

TAIT, K. N. et al. **Aircraft emissions, their plume-scale effects, and the spatio-temporal sensitivity of the atmospheric response: a review.** Aerospace, v. 9, n. 7, p. 355, 2022.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Paris Agreement. Bonn: UNFCCC, 2015.

ZHOU, J. **Addressing aviation's contrail and NO_x impacts: Integrated policy approaches.** Climate Policy, v. 24, n. 2, p. 159-178, 2024.