XXII SITRAER 2025
Simpósio de Transporte Aéreo

IMPACTOS ECONÔMICO-AMBIENTAIS DA SUBSTITUIÇÃO DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO POR SAF (ALCOHOL-TO-JET) – CASO DO AEROPORTO DE BRASÍLIA

João Vitor Lima Sousa[1], Felipe Azevedo Rios Silva[1], Artur Rodrigues de Lima[1], Yaeko Yamashita[1], Francisco Gildemir Ferreira da Silva[2]
1. University of Brasília
2. University of Ceará

vitor_lima@egresso.ufg.br

SITXXII

ABSTRACT

The aviation sector's decarbonization is a global priority due to its significant greenhouse gas (GHG) emissions. Sustainable Aviation Fuel (SAF), specifically the Alcohol-to-Jet (ATJ) pathway using ethanol, is a promising alternative for Brazil. This study analyzes the economic and environmental impacts of replacing traditional jet fuel (QAV) with SAF-ATJ at Brasília International Airport (SBBR), based on its estimated 2024 fuel consumption of 0.27 billion kg. Four scenarios comparing 15% and 50% SAF substitution for 2025 and 2050, considering projected fuel costs, carbon credit values, and lifecycle emission reduction efficiencies, also calculating green hydrogen demand. Currently, SAF-ATJ is about three times more expensive than QAV, but its economic viability improves significantly with the adoption of higher carbon credits prices. By 2050, with higher carbon prices (USD 250/ton) and mature production costs, a 50% SAF blend becomes competitive in comparison to 100% QAV. Environmentally, a full SAF-ATJ transition at SBBR could prevent over 711,000 tons of CO_2 emissions annually (assuming 85% reduction). Adopting SAF-ATJ is technically viable for Brazilian aviation, but large-scale implementation requires technological maturation, cost reduction, and public policies, particularly a high-value carbon market, to reduce the economic gap with fossil fuels.

Keywords: Sustainable Aviation Fuel (SAF), Alcohol-to-Jet (ATJ), Decarbonization, Aviation Emissions, Economic Viability, Carbon Credits.

ACKNOWLEGDEMENTS

This study was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq). The authors thank the agency for its support.

GENERATIVE AI USAGE STATEMENT

The authors declare that the use of generative AI tools was restricted to technical support activities, without compromising the originality, analysis, and conclusions presented in the work. All information obtained through these resources was carefully evaluated and integrated into the study, ensuring methodological rigor and academic integrity. Tool “NotebookLM” from Google was used for automated research, enhancing the search for references related to the study topics.

1 INTRODUÇÃO

O transporte aéreo, apesar de sua versatilidade e segurança, contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por cerca de 2,5% das emissões globais de CO_2, devido ao uso de combustíveis fósseis (IEA, 2024). No Brasil, onde a aviação desempenha um papel estratégico, a maioria dessas emissões provém do querosene de aviação (QAV). Nesse contexto, o combustível sustentável de aviação (SAF) surge como uma alternativa "limpa" para substituir o QAV, sendo um combustível *drop-in* que requer poucas ou nenhuma alteração em motores existentes (ASTM 2023). Contudo, a implementação em larga escala do SAF é dificultada pelos altos custos de produção e baixa disponibilidade no mercado nacional e global (IEA, 2024).

Diante da necessidade de rotas mais adequadas ao mercado brasileiro, o SAF *Alcohol-to-Jet* (SAF-ATJ), produzido a partir do etanol, emerge como alternativa devido à alta disponibilidade de insumos no Brasil (Embrapa, 2021). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e possui grande potencial para a produção de hidrogênio verde, que são insumos essenciais para a produção do SAF-ATJ (Brasil, 2020). Além da viabilidade tecnológica e da matéria-prima, o incentivo estatal é essencial para a neutralização de carbono até 2050, alinhado ao CORSIA e a iniciativas como o Combustível do Futuro (ATAG, 2021). Nesse contexto, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), Lei nº 14.993/2024, estabelece diretrizes para a adoção do SAF, com metas progressivas de uso (Brasil, 2024). As políticas públicas buscam estimular a produção de SAF, a adesão a normas técnicas como a Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para Aviação (RBQAV) da ANP, e aproveitar a vocação agrícola do país para rotas como o ATJ, a partir do etanol nacional (Brasil, 2024).

O Aeroporto de Brasília destaca-se por sua centralidade e grande volume de operações no contexto nacional, atuando como hub logístico para todo o país. Embora existam estudos sobre SAF no exterior, há carência de análises focadas na realidade brasileira, especialmente em aeroportos do porte de Brasília, lacuna que este trabalho busca suprir. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar os impactos ambientais (redução de CO_2) e econômicos (custos de combustível) da substituição parcial do querosene de aviação por SAF-ATJ, por meio de um estudo de caso no Aeroporto de Brasília Presidente Juscelino Kubitschek.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A transição energética no setor aéreo é um desafio que exige uma abordagem integrada, envolvendo avanços tecnológicos, políticas regulatórias e investimentos (Eurocontrol, 2025). A aviação global, responsável por aproximadamente 2-3% das emissões de CO_2, tem como meta de descarbonização, formalizada na “Meta Aspiracional de Longo Prazo” (LTAG) da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), atingir emissões líquidas nulas até 2050. Este compromisso, estabelecido na 41ª Assembleia da ICAO (2022), é apoiado por outras entidades do setor, como a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) e o Conselho Internacional de Aeroportos (ACI).

No centro da estratégia de descarbonização das companhias aéreas está a adoção em larga escala dos Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF). A IATA (2025) projeta que os SAF poderão contribuir com cerca de 65% da redução de emissões necessária para atingir a meta de 2050. Apesar de que a produção de SAF está prevista para duplicar em 2025, atingindo 2 milhões

de toneladas, isso representa apenas 0,7% da necessidade total de combustível do setor. Os principais obstáculos continuam a ser o custo elevado e a disponibilidade limitada, identificados como o principal desafio tecnológico pelo Fórum Económico Mundial (2025). Para superar as barreiras logísticas, a indústria tem desenvolvido sistemas de "*Book and Claim*", que dissociam os atributos ambientais do combustível físico, permitindo que empresas invistam em SAF e reivindiquem as reduções de emissões, independentemente de onde o combustível é fisicamente consumido, acelerando assim a procura e o investimento no mercado.

Paralelamente, os aeroportos procuram evoluir de centros de infraestrutura para catalisadores ativos da transição energética. Sob a orientação do ACI (2025), através do programa *Airport Carbon Accreditation*, 638 aeroportos em 97 países implementaram medidas de gestão de carbono. As estratégias incluem a geração de energia renovável local, como os projetos solares nos aeroportos de Changi (Singapura) e Hubballi (Índia), a eletrificação de Equipamentos de Apoio no Solo (GSE) para reduzir emissões diretas e a implementação de princípios de economia circular.

A regulação *ReFuelEU Aviation*, que entrará em vigor em 2025, estabelece mandatos de mistura de SAF juridicamente vinculativos, começando com 2% e aumentando progressivamente para 70% até 2050. Esta abordagem, monitorada pelo *Eurocontrol*, facilita projetos da indústria para enfrentar os desafios de produção e logística em escala. Apesar do progresso, a jornada para 2050 enfrenta desafios significativos, principalmente o financiamento da transição, estimado pela IATA (2025) em cerca de 5 trilhões de dólares.

A disponibilidade e o custo dos SAF, a necessidade de alinhamento de políticas globais e os riscos geopolíticos são barreiras críticas identificadas pelo Fórum Económico Mundial (2025). Para enfrentar o desafio financeiro, a ICAO (2025) lançou o *Finvest Hub*, uma plataforma para conectar projetos de sustentabilidade a investidores, com foco especial em apoiar os países em desenvolvimento. O sucesso da descarbonização aeroportuária depende, em última análise, de uma colaboração entre governos, indústria e o setor financeiro para implementar políticas de mitigação de risco, como Contratos por Diferença e garantias de empréstimo, que possam desbloquear o capital necessário para transformar a ambição de emissões líquidas nulas em realidade.

2.1 Tipos de Combustíveis para Aviação (Tradicional vs. SAF)

O Querosene de Aviação (QAV), ou Jet A-1, é o combustível fóssil padrão na aviação comercial, obtido por destilação atmosférica do petróleo (faixa de ebulição 150-300°C) (Pires et al., 2018). É composto principalmente por hidrocarbonetos parafínicos (40-60%), naftênicos (20-40%) e aromáticos (10-25%), conforme ASTM D1655 (2023). Suas propriedades físico-químicas, como densidade (775-840 kg/m³ a 15°C), viscosidade cinemática (<8,0 mm²/s a -20°C), ponto de congelamento (abaixo de -47°C), poder calorífico (mín. 42,8 MJ/kg) e teor de aromáticos (máx. 25% vol.), são controladas para garantir segurança e desempenho das aeronaves.

O SAF surge como alternativa sustentável e drop-in, compatível com aeronaves e infraestruturas existentes, podendo substituir parcialmente ou totalmente o QAV sem modificações (ANAC, 2024). As principais rotas tecnológicas para produção de SAF incluem: HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), que utiliza óleos vegetais e gorduras animais processados via hidrogenação catalítica; Fischer-Tropsch (FT), que converte biomassa em combustível sintético através de gaseificação e síntese catalítica; Alcohol-to-Jet (ATJ), que transforma etanol em combustível de aviação (Kurzawska et al., 2024). A rota ATJ apresenta potencial devido à disponibilidade de matéria-prima e possibilidade de integração com fontes de energia renovável. As principais rotas estão representadas graficamente na Figura 1.

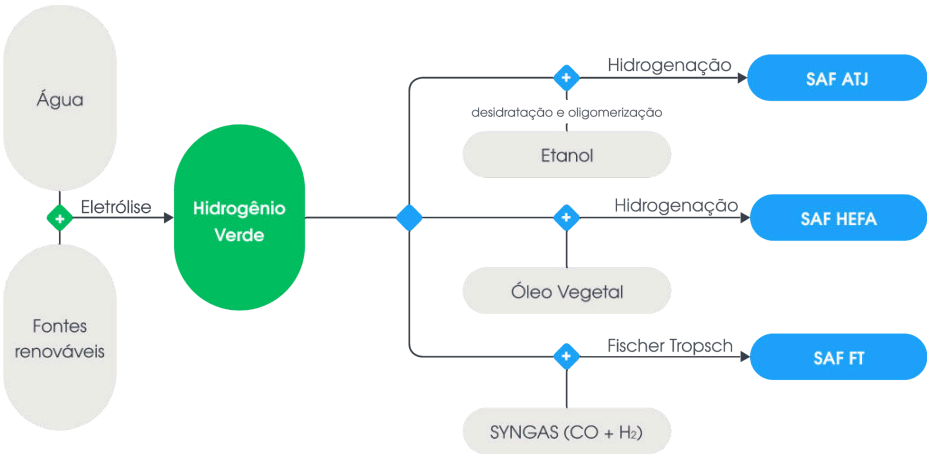


Figura 1: Rotas produtivas de SAF advindas do Hidrogênio Verde.

A rota *Alcohol-to-Jet* (ATJ) é estratégica para o Brasil, convertendo álcoois de cadeia curta, como o etanol de cana-de-açúcar, em hidrocarbonetos (C8-C16) com potencial de redução de emissões superior a 80% no ciclo de vida (Liu et al., 2023). O SAF-ATJ de etanol possui densidade de 765-815 kg/m³ e poder calorífico de 43,0-43,8 MJ/kg (Rodriguez et al., 2023). Sua composição é predominantemente parafínica (85-95%), com baixo teor de aromáticos (<5%) e enxofre (<0,001%), superando o QAV convencional e atendendo à ASTM D7566 (2022). Testes indicam redução de 15-25% de material particulado e 10-20% de NOx comparado ao Jet A-1 (Song et al., 2024). A disponibilidade de etanol no Brasil, com produção anual superior a 35 bilhões de litros, oferece potencial teórico para a produção de até 9 bilhões de litros de SAF anualmente, o que poderia atender a uma parcela significativa da demanda nacional de combustível de aviação, apresentando vantagens ambientais e econômicas devido ao uso de um biocombustível estabelecido e alto potencial de captura de CO_2 durante o crescimento da cultura (Brasil, 2020).

Análises de ciclo de vida mostram potencial de redução de emissões de até 85% em relação ao querosene fóssil, considerando o sequestro de carbono da cana e o uso do bagaço. O custo de produção estimado é de $0,70-1,10/litro, beneficiando-se da infraestrutura e economias de escala do setor sucroenergético brasileiro (Liu et al., 2023). O trabalho detalha a metodologia, resultados, discussão e conclusões para implementação do SAF.

Segundo a ICAO (2025), o SAF pode se tornar um importante contribuinte para a redução nas emissões de CO_2, com potencial de redução de 5% das emissões até 2030 na aviação internacional. Ainda segundo a ICAO (2025), combustíveis renováveis e fontes limpas de energia podem contribuir imensamente para alcançar as metas de descarbonização definidas para 2050, contudo, o nível atual de produção desses combustíveis é extremamente baixo, representando apenas 0,2% do consumo da aviação global. Desse modo, para alcançar as metas de descarbonização definidas pela ANAC, é adequada a estimação dos custos de abastecimento com combustíveis fósseis e combustíveis renováveis e suas respectivas emissões, e a partir disso, realizar uma análise comparativa entre os dois custos e os dois cenários de emissão, considerando os valores atuais dos combustíveis e as projeções futuras.

3 METODOLOGIA

A metodologia para estimar o consumo de SAF, demanda por hidrogênio verde e análise comparativa ambiental e econômica da substituição do Querosene de Aviação Tradicional por SAF será dividida em três etapas metodológicas: (i) Quantificação do consumo de SAF com enfoque no estudo de caso; (ii) Cálculo do uso de hidrogênio verde para cobertura da demanda por SAF; (iii) Análise de competitividade econômica e ambiental do SAF em comparação do QAV. Dessa forma, para realização dos cálculos, faz-se necessário as seguintes variáveis: (i) Quantidade de SAF consumida; (ii) Preço dos combustíveis (SAF e QAV); (iii) Preço do crédito de carbono (por

tonelada); e (iv) Redução percentual das emissões de SAF em relação ao QAV. Para a obtenção dos preços e de redução percentual das emissões faz-se necessário recorrer à literatura, já para a quantificação do consumo, serão realizados cálculos com base no consumo estimado de QAV do aeroporto, disponível no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil (ANAC), e calculando a estimativa equivalente do consumo de SAF em cada um dos cenários propostos.

3.1 Quantificação do consumo de SAF

Para quantificar o consumo de SAF em aeroportos, deve-se primeiramente quantificar o consumo de QAV, uma vez que, as fórmulas moleculares de ambos são semelhantes, permitindo uma substituição simples (*drop-in-fuel*). A partir de 2027, seguindo o projeto de lei que institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), os operadores aéreos devem reduzir as emissões de GEE em suas operações domésticas por meio do uso de SAF começando com 1% no primeiro ano até 10% em 2037 e 100% até 2050, estipulado pela CORSIA. (EPE, 2024) Dessa maneira, a estimação do volume de SAF pode ser considerada a partir do percentual de substituição, permitindo também a elaboração de cenários de substituição considerando os percentuais futuros.

3.1.1 Cálculo de Emissões

As estimativas de emissões dos combustíveis conforme descrito anteriormente foram realizadas a partir do volume consumido. Assim, os volumes de combustíveis foram convertidos em massa (nas unidades correspondentes), este processo foi realizado tanto para o QAV quanto para o SAF. O SAF, como por Geleynse *et* al (2018) apresenta uma estrutura molecular mais complexa em relação ao QAV, contudo, apresenta uma maior pureza, resultando em uma redução ou até ausência de alguns elementos particulados presentes no QAV, como o óxido de enxofre (SO_x) e aromáticos.

Para o cálculo de emissões foram consideradas as emissões de CO_2, considerando a formulação química média do QAV e o percentual de redução de emissões do SAF de 80% (Liu et. al 2023). Assim, com as considerações anteriores a seguinte fórmula química de combustão (1) foi considerada:

$$C_{12}H_{26} + 18{,}5\ O_2 \rightarrow 12\ CO_2 + 13\ H_2O \qquad (1)$$

Com base nas massas molares, 1000g de QAV ($C_{12}H_{26}$) geram 3,101 kg CO_2. A mesma formulação e relação de emissão por quilograma foi considerada para o SAF ATJ etanol de cana de açúcar, em virtude da similaridade das formulações, contudo, a estimativa de massa emitida de CO_2 associada ao SAF é 80% menor em relação ao QAV pela utilização da estimativa de ciclo de vida do SAF, que considera as emissões ao longo de sua cadeia produtiva, que é preferencialmente de energia e insumos limpos, como o H_2V, isto é, de baixas emissões. O SAF ATJ está certificado pela ASTM D7566-A5 para misturas de até 50% com querosene convencional, mantendo plena compatibilidade com a infraestrutura existente e possibilitando reduções substanciais de emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida.

3.2 Cálculo da Demanda de Hidrogênio Verde (H_2V)

A demanda de hidrogênio verde para produção de SAF foi quantificada com base em reações de hidrogenação. O SAF ATJ, obtido via rota Alcohol-to-Jet, é composto majoritariamente por 2,2,4,6,6-pentametil-heptano (~84% em massa) e seus isômeros, seguido por 2,2,4,4,6,8,8-heptametil-nonano (~12,9% em massa) e moléculas C_8–C_{16} (~3,1%), resultando na fórmula média $C_{13}H_{27}$ (Geleynse et al., 2018). As reações globais estequiometricamente balanceadas foram consideradas na Tabela 1.

Tabela 1: Equações balanceadas

Equação Global	Proporções aproximadas	Consumo de H_2 (g)
$6\ C_2H_5OH + H_2 \rightarrow C_{12}H_{26} + 6\ H_2O$	84%	11,8
$8\ C_2H_5OH + H_2 \rightarrow C_{16}H_{34} + 8\ H_2O$	12,9%	8,9

$7\ C_2H_5OH + H_2 \rightarrow C_{14}H_{30} + 7\ H_2O$	3,1%	10,2

Fonte: adaptado dos autores

Considerando que há uma proporção de produtos formados com proporções aproximadas, foi realizado o cálculo médio ponderado (2) para o consumo final de H2 em g/kg SAF via rota ATJ:

$$\text{Consumo } H_2 = (11{,}8 \times 84{,}0\% + 8{,}9 \times 12{,}9\% + 10{,}2 \times 3{,}1\%) / 100\%$$
$$\text{Consumo } H_2 = 11{,}4 \text{ g } H_2\text{/kg SAF ATJ} \quad (2)$$

As formulações químicas permitem assim determinar a quantidade de hidrogênio verde necessária para suprir uma demanda estimada de SAF, que ainda pode servir de aporte para determinação de outros parâmetros econômicos, como determinação do tamanho de plantas de produção, impacto econômico dos investimentos, entre outros insights importantes para o mercado de Hidrogênio Verde e SAF.

3.3 Análise de Competitividade Econômica

O desenvolvimento dessa análise permite a avaliação e a compreensão de potenciais e mais viáveis cenários para subsidiar o processo de substituição de QAV por SAF. Dessa forma, levam-se em consideração os preços correntes dos combustíveis, a demanda portuária, o valor do crédito de carbono atual e um cenário com projeção de USD 250/ton (IEA, 2024).

4 RESULTADOS

Foi analisado o consumo estimado de querosene de aviação (QAV) para 2024 no aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek (SBBR), em Brasília, totalizando 0,27 bilhões de kg de QAV, conforme dados da ANAC (2024). Foram desenvolvidos quatro cenários para estimativas de custo e emissões: os dois primeiros consideraram os valores de combustíveis de julho de 2025 e a eficiência de produção/redução de emissões para 2025, com volumes de 15% e 50% de SAF, respectivamente. Os cenários três e quatro projetaram preços de combustíveis para 2050, mantendo a mesma eficiência e redução de emissões, também com 15% e 50% de SAF. Os valores foram agrupados e tabulados na Tabela 2.

Tabela 2: Preços estimados para os cenários

	Cenário 1	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**
Volume abastecido com QAV	85%	50%	85%	50%
Volume abastecido com SAF ATJ	15%	50%	15%	50%
Custo do QAV (USD/l)	0,62	0,62	0,65	0,65
Custo do SAF ATJ (USD/l)	1,86	1,86	1,20	1,20
Valor do crédito de carbono (USD/ton)	70,65	70,65	250	250
Redução nas emissões de CO_2 do SAF ATJ em relação ao QAV	64,8%	64,8%	85%	85%

Fonte: adaptado dos autores. Valores de redução e preços de combustível: EPE, 2020, MCTI, 2020

Nos cenários um e três, a produção de SAF requer 461,7 toneladas de hidrogênio. Já nos cenários dois e quatro, são necessárias 1539 toneladas, o que demonstra como a eficiência do processo impacta a economia de insumos e, consequentemente, reduz os custos do produto final. Inicialmente, o abastecimento com QAV (querosene de aviação) mostra-se mais vantajoso em termos de custo. No primeiro cenário, o QAV custa USD 229.613.875,44, enquanto o SAF custa USD 104.585.806,50. No terceiro cenário, o QAV custa USD 367.901.889,83, e o SAF, USD 70.352.882,96. Essa desvantagem do SAF nos cenários um e três se deve ao seu alto valor, que o torna menos competitivo, considerando o mesmo volume de abastecimento. No entanto, nos cenários dois e quatro, o SAF se revela uma alternativa mais rentável, impulsionado pelo aumento no valor do crédito de carbono. No segundo cenário, o abastecimento com SAF custa USD 348.617.717,28, contra USD 135.062.733,05 do QAV. No quarto cenário, o SAF custa USD 216.412.876,37, e o QAV, USD 234.509.609,90. Isso demonstra o impacto da imposição do preço do carbono no custo final de abastecimento (figura 2).

Quanto às emissões de CO_2 nota-se que mesmo com as reduções no primeiro e segundo cenário inferiores aos demais, há uma diferença significativa das emissões geradas pelos dois combustíveis, ilustrado na figura 3.

Desse modo, no primeiro cenário o QAV e SAF são responsáveis por 722.925,00 ton e 49.132,64 ton emitidas respectivamente. Para o segundo cenário são 425.250,00 ton com QAV e 163.775,48 ton com SAF. No terceiro cenário são emitidas 722.925,00 ton de CO_2 com abastecimento com QAV e 20.471,93 ton de CO_2 com abastecimento com SAF. E para o quarto cenário foram emitidas 425.250,00 ton de CO_2 e 68.239,78 ton de CO_2 com o abastecimento de QAV e SAF respectivamente.

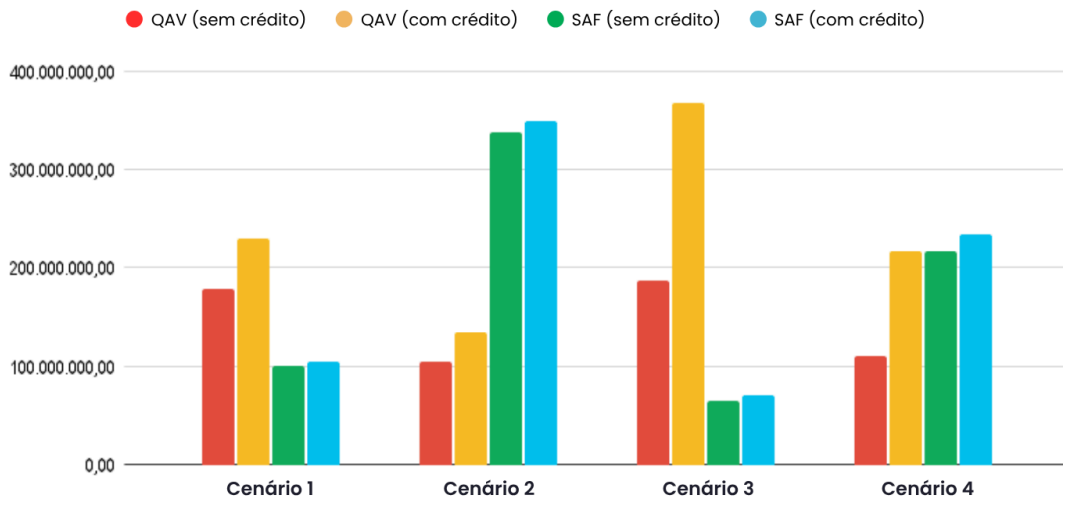


Figura 2: Cenários da substituição de QAV por SAF no Aeroporto Juscelino Kubitschek

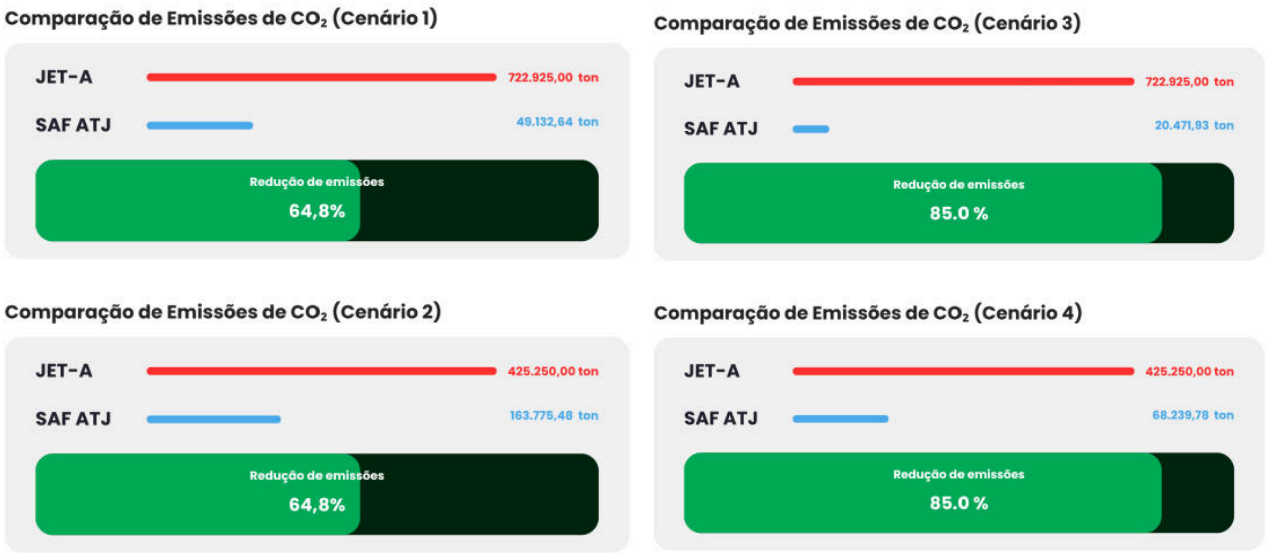


Figura 3: Comparação de emissões de CO_2 entre os quatro cenários

Os resultados apresentados reforçam a importância do abastecimento utilizando-se de fontes limpas de combustíveis, podendo assim ser uma alternativa viável para alcançar as métricas de descarbonização definidas para a aviação nacional e global. Além disso, endossam a importância de políticas públicas para além do barateamento dos preços dos combustíveis limpos, uma definição sensata do valor do crédito de carbono, podendo torná-los competitivos em comparação aos combustíveis fósseis utilizados até então. Ainda é válido destacar que, o nível atual de maturidade dos combustíveis limpos são fatores determinantes para a baixa adesão dos mesmos, enfrentando

problemas como baixa disponibilidade e altos preços, contudo, é sabido que, com o avanço das tecnologias e adoção de fontes limpas de energia, a tendência é a utilização massiva desses combustíveis, bem como a melhoria dos fatores ambientais, com a redução de emissões durante o ciclo de vida desses combustíveis. Por isso, uma cadeia produtiva limpa pode gerar uma redução ainda mais significativa das emissões.

5 DISCUSSÃO

Este estudo de caso apresenta a dualidade entre custos e benefícios ambientais na substituição do QAV (JET A-1) tradicional por SAF-ATJ de etanol no Aeroporto de Brasília. Do ponto de vista ambiental, o estudo confirma os significativos benefícios do SAF ATJ na redução de emissões. Mesmo percentuais modestos de mistura resultam em quedas consideráveis de CO_2. Com 15% de SAF, houve uma redução de cerca de 11% nas emissões totais anuais. Com 50% de SAF e eficiência otimizada (85% de redução unitária em 2050), a diminuição nas emissões totais se aproxima de 42%, caindo de 850 mil para 493 mil toneladas de CO_2 por ano. A substituição total do QAV por SAF-ATJ em operações aeroportuárias pode reduzir anualmente 720-725 mil toneladas de CO_2, alinhada às metas de descarbonização de 80-85% de redução, similar a estudos de SAF de etanol de cana-de-açúcar (Liu et al., 2023).

Atualmente (2025), a adoção parcial (15%) de SAF eleva os custos operacionais, pois é cerca de três vezes mais caro que o Jet A-1 convencional, o que é uma barreira sem incentivos financeiros (IEA, 2024). Contudo, a projeção para 2050 indica que, com avanços tecnológicos e crédito de carbono à USD 250/ton, o SAF pode se tornar mais atrativo que o QAV. Por exemplo, em 2050, com 50% de SAF, o custo anual de abastecimento seria de USD 216 milhões (SAF) vs. USD 234 milhões (QAV), mostrando que políticas de precificação de carbono podem compensar a diferença.

A rota ATJ, promissora no Brasil pela produção de etanol de cana, demanda grandes quantidades de hidrogênio verde – cerca de 1.539 toneladas de H_2 por ano para 50% de SAF. Isso exige investimentos em produção de hidrogênio renovável e integração com usinas sucroalcooleiras. A disponibilidade em larga escala de SAF também depende de uma cadeia produtiva adaptada, que inclui desde a captura de CO_2 durante os processos de produção e logística do etanol, coleta de biomassa para produção adicional de álcool de 2ª geração até a construção de biorrefinarias ATJ.

Sem planejamento e apoio governamental, a oferta restrita e o alto custo do SAF-ATJ podem permanecer como limitantes. As estimativas para 2050 são baseadas em premissas otimistas, considerando a eficiência máxima do processo de produção e 85% na redução das emissões de carbono no ciclo de vida do SAF-ATJ. Além disso, não foram contabilizados custos de investimento em infraestrutura nem limitações logísticas para a adoção de SAF em larga escala.

Apesar das limitações, os achados oferecem indicativos valiosos para políticas públicas e planejamento do setor aéreo. Os cenários explorados indicam que incentivos econômicos como subsídios ao SAF-ATJ, taxação de carbono sobre combustíveis fósseis, financiamento à produção de H_2V podem acelerar a paridade de custo entre SAF e QAV. Do ponto de vista tecnológico, é fundamental investir em Pesquisa e Desenvolvimento para aumentar a eficiência e reduzir os custos de produção do biocombustível, potencialmente garantindo sua viabilidade econômica. Adicionalmente, rotas complementares de SAF, como HEFA e *Fischer-Tropsch*, podem contribuir para expandir a oferta no curto prazo. Assim, a substituição gradual e prospectiva do querosene de aviação por SAF configura-se como um caminho possível para a sustentabilidade da aviação, aliando uma redução de emissões a perspectivas de competitividade econômica a médio e longo prazo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo destaca o SAF ATJ como uma alternativa sustentável viável para reduzir em cerca de 85% as emissões de CO_2 nas operações do Aeroporto Juscelino Kubitschek (SBBR) em comparação com o QAV, evitando aproximadamente 720 mil toneladas de dióxido de carbono anualmente com a substituição total. Embora a produção do SAF ATJ esteja em processo de maturação, sendo menos eficiente e mais cara que o QAV, o desenvolvimento tecnológico e a otimização do processo produtivo prometem torná-lo competitivo. Sua projeção de redução significativa nas emissões no ciclo de vida o torna atraente tanto economicamente quanto ambientalmente.

Apesar dos benefícios ambientais, a adoção do SAF ATJ acarreta um custo operacional adicional, exigindo políticas de incentivo para equilibrar o impacto financeiro e viabilizar sua adoção em larga escala, atualmente, o SAF ATJ é três vezes mais caro que o QAV. Contudo, a expectativa é que, até 2050, ele se torne competitivo impulsionado pelo aumento da demanda, amadurecimento da cadeia produtiva e políticas públicas de apoio, especialmente um mercado de carbono com alta precificação.

Este estudo, focado na realidade brasileira, fornece dados empíricos para o planejamento de estratégias de descarbonização, e futuras pesquisas podem aprofundar essa análise. Em resumo, o SAF-ATJ é uma solução promissora para a aviação sustentável, que demanda esforços coordenados entre governo, indústria e academia para superar os desafios econômicos atuais.

7 REFERÊNCIAS

Aburto, J., Martínez-Hernández, E., & Castillo-Landero, A. (2025). Is Sustainable Aviation Fuel Production Through Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids (HEFA) and Alcohol-to-Jet (ATJ) Technologies Feasible in Mexico? Sustainability, 17(4), 1584. https://doi.org/10.3390/su17041584

Agência Nacional de Aviação Civil. (2024). Conexão SAF. Brasília, DF: ANAC. Recuperado em 20 ago. 2024, de https://hotsites.anac.gov.br/conexaosaf/

Air Transport Action Group. (2021). Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency – a vision of net-zero aviation by mid-century (2nd ed.). Air Transport Action Group. https://aviationbenefits.org/media/167152/atag-waypoint-2050-2021-2nd-edition.pdf

Airports Council International - Latin America And Caribbean (ACI-LAC). (2024). Whitepaper: Circular economy in airports. ACI-LAC. Retrieved Sep 4, 2025, from https://aci-lac.aero/wp-content/uploads/2024/09/2024-Whitepaper-Circular-economy-in-airports.pdf

Airports Council International (ACI). (2025). Airport Carbon Accreditation: Annual Report 2023-2024. Brussels: ACI. Retrieved Sep 4, 2025, from https://www.airportcarbonaccreditation.org/wp-content/uploads/2025/04/Airport-Carbon-Accreditation-Annual-Report-2023-2024.pdf

ASTM International. (2022). ASTM D7566-22a: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons. West Conshohocken, PA: Author.

ASTM International. (2023). ASTM D1655-23: Standard specification for aviation turbine fuels. West Conshohocken, PA: Author.

Benavides, A., Benjumea, P., Cortés, F. B., & Ruíz, M. A. (2021). Chemical Composition and Low-Temperature Fluidity Properties of Jet Fuels. Processes, 9(7), 1184. https://doi.org/10.3390/pr9071184

Brasil. (2024, 8 out.). Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Diário Oficial da União, seção 1, 9 out. 2024, p. 1.

Brasil. Ministério de Minas e Energia, & Empresa de Pesquisa Energética. (2020). Plano Nacional de Energia 2050 (Relatório Final). Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2050/documentos/relatorio-final-do-pne-2050.pdf

Castro, N., Braga, S. L., Pradelle, F., Chaves, A. C., & Chantre, C. (Eds.). (2023). A economia do hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. E-papers Serviços Editoriais.

Cuan, J. E. I. I., Garcia, V. F., Palacios-Bereche, R., & Ensinas, A. V. (2025). Optimisation for Sustainable Supply Chain of Aviation Fuel, Green Diesel, and Gasoline from Microalgae Cultivated in Sugarcane Vinasse. Processes, 13(5), 1326. https://doi.org/10.3390/pr13051326

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2021). Etanol de segunda geração. Brasília, DF: EMBRAPA. Recuperado em 20 jul. 2025, de https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/alcool/materias-primas/lignocelulosica/etanol

Eurocontrol. (2025). European Aviation Environmental Report 2025. Brussels: EUROCONTROL. Retrieved Sep 3, 2025, from https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-environmental-report-2025

Ferrão, I. A. S., Mendes, M. A. A., Moita, A. S. O. H., & Silva, A. R. R. (2022). The addition of particles to an alternative jet fuel. Fuels, 3(2), 184-206. https://doi.org/10.3390/fuels3020012

Geleynse, S., Brandt, K., Garcia-Perez, M., Wolcott, M., & Zhang, X. (2018). The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: Techno-economic evaluation. ChemSusChem, 11(21), 3728–3741. https://doi.org/10.1002/cssc.201801690

International Air Transport Association (IATA). (2025). Global Outlook for Air Transport - June 2025. Montreal: IATA. Retrieved Sep 3, 2025, from https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport-june-2025/

International Civil Aviation Organization. (2025). Environmental report 2025. Montreal, Canada: ICAO. Recuperado em 26 jul. 2025, de https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO-EnvReport-2025.pdf

International Energy Agency. (2024). Aviation (Tracking report). Paris: IEA. Recuperado em 10 jul. 2025, de https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation

International Energy Agency. (2024). CO_2 emissions in 2024 (Global Energy Review). Paris: IEA. Recuperado em 10 jul. 2025, de https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions

Kurzawska, P., & Jasiński, R. (2024). A Review of Alternative Aviation Fuels [Review of A Review of Alternative Aviation Fuels]. Energies, 17(16), 3890. https://doi.org/10.3390/en17163890

Liu, X., Kwon, H., Wang, M., & O'Connor, D. E. (2023). Life cycle greenhouse gas emissions of Brazilian sugar cane ethanol evaluated with the GREET model using data submitted to RenovaBio. Environmental Science & Technology, 57(32), 11814–11822. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08488

International Energy Agency. (2024). Global energy and climate model. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model. Licence: CC BY 4.0

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. (2020). Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação. Brasília, DF: MCTI. Recuperado em 26 jul. 2025, de https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf

Pires, A. P. P., Han, Y., Kramlich, J., & Garcia-Perez, M. (2018). Chemical composition and fuel properties of alternative jet fuels. BioResources, 13(2), 2632-2657. https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2632-2657

Qasem, N. A. A., Mourad, A., Abderrahmane, A., Said, Z., Younis, O., Guedri, K., & Kolsi, L. (2024). A recent review of aviation fuels and sustainable aviation fuels. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(10), 4287-4312. https://doi.org/10.1007/s10973-024-13027-5

Rodriguez, D., et al. (2023). Revolutionizing aviation: Understanding the transformative power of power-to-liquid fuels (White paper). Boston, MA: 4AIR. Recuperado em 26 jul. 2025, de https://www.4air.aero/whitepapers/revolutionizing-aviation-understanding-the-transformative-power-of-power-to-liquid-fuels

Song, Z., et al. (2024). Comparison of emission properties of sustainable aviation fuels and conventional aviation fuels: A review. Applied Sciences, 14(13), 5484. https://doi.org/10.3390/app14135484

Watson, M. J., da Silva, A. V., Machado, P. G., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2025). The case for biojet fuel from bioethanol in Brazil: An optimization-based analysis using historical market data. Industrial & Engineering Chemistry Research, 64(8), 4410–4424. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03039

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). (2025). Global Aviation Sustainability Outlook 2025. Geneva: WEF. Retrieved Sep 5, 2025, from https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Aviation_Sustainability_Outlook_2025.pdf