

INSTITUTO BRASILEIRO DE ENSINO, DESENVOLVIMENTO E PESQUISA

CURSO DE ECONOMIA

**ESTUDO SOBRE OS IMPACTOS DA ADOÇÃO DO SAF SOB A ÓPTICA DA LEI
DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO**

MATHEUS DE ALMEIDA CASTRO

Brasília/DF

2025

MATHEUS DE ALMEIDA CASTRO

**ESTUDO SOBRE OS IMPACTOS DA ADOÇÃO DO SAF SOB A ÓPTICA DA LEI
DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Economia, do Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP), como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Economia.

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcel Stanley Monteiro – Professor Orientador
Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP)

Prof. Dr. Tiago Sousa Pereira
Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP)

Dra. Fernanda Schwantes
Confederação Nacional do Transporte (CNT)

Brasília/DF

2025

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1. Rotas, *feedstocks* e custos mínimos de produção considerados

Tabela 2. Custos totais da cesta do SAF

Tabela 3. Volumes utilizados na implementação das rotas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEAR	Associação Brasileira das Empresas Aéreas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATJ	<i>Alcohol to Jet</i>
BCB	Banco Central do Brasil
BEN	Balanco Energético Nacional
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GAV	Gasolina de Aviação
GEE	Gases do Efeito Estufa
HEFA	<i>Hydrotreated Esters and Fatty Acids</i>
IDP	Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa
MJSP	<i>Minimum Jet Fuel Selling Price</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
QAV	Querosene de Aviação
SAF	Comubstível Sustentável de Aviação
SPK-FT	<i>Synthetic Paraffinic Kerosene - Fischer-Tropsch</i>

Resumo

Este estudo analisa os impactos econômicos e ambientais da adoção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) no Brasil, à luz da Lei 14.993/2024. Para isso, é utilizado um modelo de firma com restrições ambientais, fundamentado na literatura de microeconomia ambiental, no qual uma firma representativa do setor aéreo minimiza seus custos de cumprimento das metas obrigatórias de redução de emissões. O modelo é formulado como um problema de programação linear com variáveis associadas a diferentes rotas tecnológicas de SAF (HEFA, ATJ e SPK-FT), cada uma com custos, emissões e limites de disponibilidade próprios. A simulação para o período de 2027 a 2037 mostra que a rota HEFA com óleo residual é a mais custo-eficiente e dominante até seu limite de disponibilidade, sendo gradualmente substituída pela rota ATJ com etanol de cana a partir de 2030. A rota SPK-FT com biomassa, embora tecnicamente viável, não é utilizada devido ao seu custo mais elevado. Os resultados indicam que o cumprimento da legislação é possível com um custo acumulado estimado de R\$ 21,2 bilhões e uma redução de mais de 7 milhões de toneladas de CO₂. O trabalho contribui para o debate sobre políticas públicas de descarbonização do setor aéreo, destacando a importância de incentivos econômicos para rotas de SAF mais limpas e menos competitivas no curto prazo.

Palavras-chave: SAF, descarbonização, aviação civil, microeconomia ambiental, firma com restrição ambiental.

Classificação JEL: D22, Q52, Q53, Q54, Q55, Q58, R48.

Abstract

This study analyzes the economic and environmental impacts of adopting sustainable aviation fuels (SAF) in Brazil, based on the legal framework established by Law No. 14.993/2024. A firm-level model with environmental constraints is employed, grounded in environmental microeconomics, in which a representative airline minimizes its compliance costs with mandatory emissions reduction targets. The model is formulated as a linear programming problem with variables representing different SAF technological pathways (HEFA, ATJ, and SPK-FT), each with distinct costs, emissions, and supply constraints. Simulations for the 2027–2037 period show that the HEFA route using used cooking oil is the most cost-effective, used up to its availability limit, after which ATJ from sugarcane ethanol becomes the preferred option. The SPK-FT route from biomass, while technically viable, is not selected due to higher costs. Results indicate that the policy goals are achievable at an estimated cumulative cost of R\$ 21.2 billion, with over 7 million tons of CO₂ emissions avoided. The study contributes to the policy debate on aviation decarbonization, highlighting the role of targeted incentives for cleaner but less cost-competitive SAF routes.

Keywords: SAF, decarbonization, civil aviation, environmental microeconomics, firm with environmental constraint.

JEL classification: D22, Q52, Q53, Q54, Q55, Q58, R48.

1. Introdução

O transporte aéreo se destaca pela rapidez, segurança e capacidade significativa de conectividade de pessoas e mercados, sendo fundamental para a competitividade econômica e o desenvolvimento regional. No entanto, ele apresenta limitações em relação aos outros modos de transporte, principalmente em função de seus custos elevados e das altas barreiras regulatórias. Segundo o Panorama da Associação Brasileira das Empresas Aéreas – Abear (2024), em média, 36% dos custos operacionais da aviação no Brasil vem de combustíveis, sendo a maior fonte individual na estrutura de custos de uma empresa aérea. No atual cenário brasileiro, existem dois combustíveis de aviação usados em larga escala, a Gasolina de Aviação (GAV), que abastece aeronaves menores a pistão (predominantemente aviação geral), e o Querosene de Aviação (QAV), que abastece aeronaves maiores que tem motores turboélice e turbofan (predominantemente aviação comercial). Mais de 99,99% do volume de combustíveis de aviação vendidos no Brasil é composto pelo QAV (ANP, 2024). Isso se dá pelo tamanho das aeronaves e pela dominância do segmento de aviação comercial ou regular de passageiros e cargas.

A transição energética é o processo pelo qual economias ao redor do mundo estão migrando de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, para fontes renováveis e de baixo carbono, como a energia solar, eólica e os biocombustíveis. Além dessas fontes de energia, a transição energética envolve a implementação de tecnologias avançadas de armazenamento e gestão de energia. Baterias de alta capacidade, sistemas de armazenamento térmico e redes inteligentes são essenciais para garantir a estabilidade e eficiência da rede elétrica. Esse movimento é essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e limitar o aquecimento global. No setor de transporte aéreo, a transição se torna ainda mais urgente devido ao elevado volume de emissões de gases de efeito estufa (GEE) associados às operações das companhias aéreas.

Para reduzir as emissões de carbono no setor, o SAF surge como uma das soluções mais promissoras. O SAF (*sustainable aviation fuel*) é um combustível de aviação produzido a partir de matérias-primas renováveis, como resíduos agrícolas, óleos vegetais e até resíduos sólidos urbanos. A implementação em larga escala do SAF é vista como um caminho viável para reduzir as emissões de GEE no setor aéreo, sem que seja necessário alterar toda a frota de aeronaves atuais. Isso facilita a adesão gradual, uma vez que o SAF é geralmente compatível com os motores das aeronaves existentes. Entretanto, a adoção em massa do SAF também

apresenta custos elevados para as empresas de transporte aéreo. O processo de produção ainda é mais caro e menos eficiente do que o do querosene de aviação tradicional, e a disponibilidade global do SAF é limitada, o que gera um impacto direto no custo final para as companhias aéreas. Com a pressão dos governos e das organizações internacionais para que o setor reduza suas emissões, as empresas podem acabar absorvendo parte desses custos, o que pode impactar o preço das passagens aéreas. Adicionalmente, os investimentos necessários em infraestrutura para armazenar e distribuir SAF em aeroportos ao redor do mundo também podem representar um custo adicional significativo.

Para entender a produção de SAF é necessário entender as rotas tecnológicas possíveis para sua produção. As rotas são calculadas primeiramente com base na matéria-prima principal usada. No Brasil há 3 tipos de matéria-prima (*feedstock*), triglicerídeos (plantas oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais), biomassa lignocelulósica (eucalipto, pinheiro, capim elefante e bagaço de cana) e açúcares e amidos (cana-de-açúcar, milho, beterraba e mandioca). Com isso os triglicerídeos se fazem as rotas HEFA (*Hydrotreated Esters and Fatty Acids*), HC-HEFA (o mesmo princípio porém feito de hidrocarbonetos bioderivados de algas, menos eficiente e com menor potencial de mistura com o QAV) e CHJ (*Catalytic Hydrothermolysis Jet*). Essas rotas consistem em transformações de triglicerídeos em cadeias de hidrocarbonetos por reações de hidrogênio. Nas rotas de biomassa lignocelulósica se destacam as rotas SPK-FT (*Synthetic Paraffinic Kerosene - Fischer-Tropsch*), SPK-A (o mesmo princípio porém usando uma variação do processo de Fischer-Tropsch usando aromáticos que previnem vazamentos e deterioração das partes do motor) e SIP (*Synthetic Isoparaffins*). Os açúcares e amidos são a matéria prima da rota ATJ (*Alcohol To Jet*), onde álcoois são convertidos em hidrocarbonetos para serem usados em motores aéreos.

Tendo em vista todo o contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo calcular a quantidade demandada assim como os custos mínimos associados ao uso do combustível sustentável de aviação produzido em diferentes rotas tecnológicas. Cada uma das rotas tecnológicas de produção possui custos e emissões de gases de efeito estufa associados. O modelo utilizado baseia-se na literatura de microeconomia ambiental, em particular na formulação de firma com restrições ambientais. Assume-se que uma firma representativa do setor aéreo enfrenta metas obrigatórias de redução de emissões de GEEs, impostas pela Lei nº 14.993/2024.

Como hipótese, espera-se que independentemente da redução de emissões, os operadores aéreos optarão pela rota mais barata, visto que cada uma terá um custo diferente e todas oferecem ganhos ambientais muito vantajosos em comparação ao uso do QAV. Porém, os ganhos não são suficientes para justificar uma troca de rotas em favor das emissões. O trabalho se delimita ao mercado de aviação comercial no Brasil e aos *feedstocks* de óleo de cozinha usado (HEFA), biomassa de cana-de-açúcar (SPK-FT) e etanol de cana-de-açúcar (ATJ) visto que são rotas que estão consideravelmente mais avançadas para uso comercial segundo estudo da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2024) e também tem grande potencial de uso em larga escala no Brasil pela sua abundância ou indústria consolidada em torno de sua matéria-prima.

Este trabalho contribui para a discussão presente em economia sobre o tema crescimento econômico sustentável de longo prazo. São úteis para a literatura que investiga a viabilidade do carbono zero no futuro ao trazer evidências empíricas, para as empresas que podem adaptar suas estratégias e serviços às necessidades do plano da lei do combustível do futuro e se preparar para os desafios e as oportunidades do mercado de biocombustíveis e, principalmente, para os *policy makers* que podem usar esse estudo para formular políticas públicas que atendam às necessidades da transição energética e que mitiguem os impactos negativos das mudanças climáticas conciliando com crescimento econômico sustentável.

O trabalho possui mais quatro seções onde, na seção dois, são apresentados o Modelo da Firma com restrições ambientais e o referencial teórico acerca do envelhecimento e crescimento econômico, na seção três são explicitados o modelo teórico, o modelo empírico e as características dos dados, a seção quatro apresenta e discute os resultados encontrados e, por fim, a seção cinco conclui.

2. Referencial Teórico

2.1 Modelo da firma com restrições ambientais

Este trabalho modela a decisão de uma firma representativa do setor aéreo que enfrenta restrições ambientais impostas pela Lei nº 14.993/2024. A modelagem parte da literatura de economia ambiental e de organização industrial, especialmente no que se refere à substituição de insumos e ao papel de políticas regulatórias de emissões.

Modelos de firma com restrições ambientais têm sido amplamente utilizados para avaliar a eficiência de políticas de redução de emissões (JAFFE; STAVINS, 1995). Em tais modelos, a firma minimiza seu custo de produção ou operação, sujeito a uma restrição de emissões de poluentes. Adicionalmente, a introdução de tecnologias com intensidade distinta de carbono permite a formulação de problemas de substituição indireta entre insumos convencionais e alternativos (BOONEKAMP, 2006).

A presente análise assume que o setor aéreo não pode exceder um teto de emissões calculado com base na meta de redução de uso de querosene de aviação (QAV), estipulada pela legislação. Cada rota tecnológica de produção de SAF (combustível sustentável de aviação) apresenta um custo por litro e uma emissão específica de gases de efeito estufa (GEE), permitindo a comparação de sua eficiência ambiental e econômica.

Com base em Stern (2006), tem-se que o custo marginal de abatimento (CMA) de cada alternativa pode ser representado por:

$$CMA_i = \frac{p_i - p_0}{e_0 - e_i}$$

(01)

em que p_i é o preço do combustível alternativo, p_0 é o preço do QAV, e_i é a emissão do SAF e e_0 é a emissão do QAV por litro. Essa métrica indica quanto se paga por tonelada de CO_2 evitada ao substituir o QAV por determinado SAF.

A escolha de um modelo baseado em cotas, ao invés de um modelo com flexibilidades intertemporais, é coerente com a abordagem normativa da legislação brasileira. Segundo Fell, MacKenzie e Pizer (2012), políticas baseadas em quantidades fixas, mesmo sem flexibilidades

como “banking” ou “borrowing”, podem ser eficientes em contextos com incertezas limitadas ou quando os objetivos ambientais são prioritários.

2.2 Literatura em torno do SAF

A importância da descarbonização do setor aéreo já é discutida desde o século passado. Um documento apresentado ao Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1999, p. 23) trazia a temática em evidência para a comunidade internacional. Porém, a ideia de algum substituto para o QAV vem de décadas antes com estudos nas décadas de 50 e 60 com relação a hidrogênio líquido (SMITH, 1970 *apud* HEMIGHAUS, BOVAL, BOSLEY, ORGAN, LIND, BROUETTE, THOMPSON, LYNCH, JONES, 2006) e com relação a biocombustíveis durante o contexto da crise do petróleo de 1973 (KLASS, 1981).

Em 2006, uma importante pesquisa foi feita pela Chevron (2006, p. 16), empresa global de energia presente no Brasil há mais de 100 anos, que atualmente explora óleo e gás em águas profundas no Brasil. Neste estudo, a Chevron listou diversas alternativas para o QAV e seus resultados na época mostravam uma incapacidade das alternativas de replicar a escalabilidade e eficiência do combustível fóssil. Porém, com o passar dos anos, mais esforços foram feitos para viabilizar a produção de combustíveis a partir de fontes alternativas com o objetivo de alcançar as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) definidas no Acordo de Paris, assinado em 2015 por 195 países na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21).

Em 2016, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) criou o *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA), com o objetivo de diminuir as emissões de poluentes na aviação global por meio da adoção de tecnologias sustentáveis. Este programa global de redução e compensação de emissões de CO₂ monitora as emissões de poluentes do transporte aéreo. Desde janeiro de 2019, o Brasil está comprometido junto à OACI a monitorar as emissões das empresas aéreas com operação no país, em uma fase piloto voluntária. A adoção oficial de todas as obrigações do programa começará no país em 2027.

Desde a entrada do Brasil no CORSIA, diversos estudos e esforços com relação ao uso de SAF foram feitos com a finalidade de estudar a viabilidade de seu uso em aeronaves brasileiras. Contudo, grande parte desses estudos partiram de órgãos públicos, fazendo com que pouco tenha sido feito fora do campo legislativo. Em 2021, a Resolução 856 da Agência

Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) incluiu rotas de SAF entre os combustíveis de aviação legalizados para comercialização no Brasil. Em 2022, um estudo encomendado à Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), empresa alemã de cooperação internacional para o desenvolvimento sustentável, pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovações analisou a viabilidade econômica das principais rotas de SAF no Brasil.

Destaca-se também a atuação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na elaboração de estudos nacionais acerca do tema com informes que destacam e explicam as principais rotas de SAF, fazem referência as trajetórias possíveis para a melhor oferta do combustível no mercado brasileiro tendo em vista as legislações nacionais e internacionais. Em setembro de 2024, a EPE divulgou diversas referências de viabilidade econômica e modelos de implementação no contexto internacional. Como por exemplo um estudo de 2022 que define os MJSP (*Minimum Jet Fuel Selling Price*) para rotas HEFA, SPK-FT e ATJ em diferentes cenários de implementação (SHAHIAR, KHANAL, 2022, p. 17), bem como as emissões das diferentes rotas (SHAHIAR, KHANAL, 2022, p. 37).

No âmbito da legislação brasileira, em 2024, foi institucionalizada a adoção do SAF pelas empresas aéreas brasileiras dentro da Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024 Art. 10º), essa lei prevê uma redução de emissões de GEE em voos domésticos por meio do uso de SAF conforme percentuais mínimos de redução que começam com 1% em 2027 e 2028, e então aumentam em 1% anualmente chegando ao ano de 2037 com 10% de reduções de emissões. A metodologia de cálculo para a verificação de redução de emissões será estabelecida pela Agência Nacional de Aviação Civil.

Por fim, tendo em vista a iminente adoção de SAF no Brasil, as empresas aéreas começaram a discutir rotas tecnológicas e seus impactos ambientais e econômicos para a cumprir a legislação que passará a vigorar. Nesse contexto, a publicação *Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America*, desenvolvida por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), em 2024, com apoio financeiro da LATAM Airlines e da Airbus, avaliou as políticas de mitigação de emissões, demanda pela aviação e consumo de combustível de aviação até 2050 na América do Sul.

A referida literatura embasa tecnicamente este estudo, que busca mensurar o possível impacto da adoção do combustível de aviação sustentável no mercado brasileiro de aviação à luz da Lei nº 14.993/2024.

3. Metodologia

3.1 Modelo teórico

O modelo utilizado neste trabalho baseia-se na literatura de microeconomia ambiental, em particular na formulação de firma com restrições ambientais (JAFFE; STAVINS, 1995). Segundo os quais, uma firma busca maximizar os benefícios ambientais bem como minimizar seus custos de produção quando sujeitos a uma restrição ambiental exógena, imposta por um regulador. Essa restrição pode assumir diferentes formas: um padrão tecnológico, uma meta de emissões ou uma obrigação de uso de determinado insumo com menor impacto ambiental. Aplicando para a pesquisa, o problema da firma é, portanto, o de minimizar os custos associados ao uso de combustíveis, escolhendo entre diferentes rotas tecnológicas de SAF (Sustainable Aviation Fuel), cada uma com custos e emissões próprios, de forma a cumprir a meta regulatória anual.

A substituição entre o querosene de aviação e os combustíveis alternativos ocorre de forma indireta e parcial, limitada por fatores técnicos de mistura máxima e eficiência de abatimento. A função objetivo do modelo é:

$$\min_{x_i} C = \sum_{i=1}^3 c_{i;t} x_{i;t}$$

(02)

onde:

- C representa o custo total
- $c_{i;t}$ representa o custo de um litro da rota i no ano t
- $x_{i;t}$ representa a quantidade de litros da rota i no ano t

sujeita a:

- (i) meta de emissões:

$$\sum_{i=1}^3 r_i x_i \geq R_t$$

(03)

- (ii) limites de mistura por rota:

$$\sum_{i \in \text{HEFA}} x_i \leq 0,5 \cdot Q_t; \quad \sum_{i \in \text{ATJ}} x_i \leq 0,5 \cdot Q_t; \quad \sum_{i \in \text{SPK}} x_i \leq 0,5 \cdot Q_t$$

(04)

- (iii) não negatividade:

$$x_i \geq 0 \quad \forall i$$

(05)

Neste contexto, as variáveis de decisão X_i representam os volumes utilizados de cada rota de SAF associada a um tipo de matéria-prima. As decisões são tomadas ano a ano, considerando metas fixas de SAF previstas pela legislação.

Importante destacar que o modelo não inclui o preço do QAV na função objetivo pois a demanda total de combustível Q_t é dada e deve ser cumprida, o QAV serve como complemento automático ao SAF e o foco é determinar qual a composição mais barata de SAF necessária para cumprir a meta de redução de emissões, não o custo total do abastecimento.

3.2 Dados

Neste trabalho, os dados foram coletados de diversas fontes. A demanda por QAV foi obtida por meio do Balanço Energético Nacional (BEN), (EPE, 2024). Em 2023, foram consumidos 3,04 bilhões de kg (3,81 bilhões de litros) de QAV no Brasil. Também da EPE foram obtidos os dados sobre o crescimento da demanda de QAV no Brasil nos próximos anos: segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 (2023), a demanda por QAV deve crescer em média 2,4% ao ano.

Para estimar as emissões reais do QAV, foram usados dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), do Observatório do Clima (2025). O Observatório apontou que em 2023 foram emitidas 10,04 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por meio da queima de querosene de aviação no Brasil. Isso significa que, em média, a emissão decorrente da queima de QAV é de 2,637kgCO₂e/L. A unidade kgCO₂e/L significa quilogramas de dióxido de carbono equivalente por litro. Essa é uma unidade amplamente utilizada em análises ambientais e energéticas para expressar a quantidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) associada à produção, uso ou queima de um litro de determinado combustível.

Para calcular as emissões de cada rota a ser analisada, foi usado o documento do CORSIA de 2024 (OACI, 2024), onde são analisados diferentes *feedstocks* de SAF pelo ponto de vista de emissões. Após uma análise do documento, foi elaborada uma equação para descobrir a emissão média de cada tipo de rota:

$$\text{KgCO}_2\text{e/L} = \frac{\text{emissao do feedstock (gCO}_2\text{e /MJ)} \times \text{LHV(MJ/L)}}{1000}$$

(06)

Onde:

- $\text{KgCO}_2\text{e/L}$ = emissões da rota por litro
- emissao do feedstock = coeficiente de emissões do *feedstock*
- LHV = Potencial calorífico do combustível

Para o potencial calorífico do combustível (LHV) do SAF, foi usado 34,4, o mesmo do QAV. Essa escolha se deve pela similaridade entre as composições das moléculas sintetizadas no SAF com as do QAV. Então, fazendo os cálculos da média de emissão *feedstocks* multiplicada pelo potencial calorífico estabelecido, chega-se ao resultado de que as emissões por rota são de:

- SPK-FT 0,26 $\text{kgCO}_2\text{e/L}$
- HEFA (Óleo Usado) 0,48 $\text{kgCO}_2\text{e/L}$
- ATJ (Etanol de Cana) 0,30 $\text{kgCO}_2\text{e/L}$

Para os preços, foi usado o dado de MJSP médio para cada *feedstock* no trabalho de (SHAHAR, KHANAL, 2022). Na tabela 1, são apresentados os *feedstocks* que serão considerados no trabalho, bem como seus preços.

Tabela 1. Rotas, *feedstocks* e custos mínimos de produção considerados

Variável	Rota	Feedstock	Custo MJSP (US\$/L)
x1	HEFA	Óleo usado	0,91 (média 0,55-1,27)
x2	ATJ	Etanol de Cana	1,17

x3	SPK-FT	Biomassa	1,28 (média 0,36–2,20)
----	--------	----------	------------------------

Para o câmbio US\$/R\$ foi usada a cotação de fechamento de 2024, R\$ 6,19/US\$. A inflação será constante e estabelecida em 4% conforme a previsão do Boletim Focus para o ano de 2027 de 23 de maio de 2025 (BCB, 2025)

A porcentagem máxima de mistura dos combustíveis SAF é de 50% no QAV segundo estudo da EPE (2024).

3.3 Modelo Empírico

O modelo empírico é formulado como um problema de programação linear, resolvido separadamente para cada ano do intervalo de 2027 a 2037. A firma representativa do setor aéreo escolhe a quantidade ótima de uso de três rotas tecnológicas de SAF, associadas a diferentes matérias-primas, de modo a minimizar o custo total do volume de SAF necessário para cumprir a meta de redução de emissões do ano, respeitando os limites tecnológicos de mistura e os custos específicos de cada rota. Os resultados serão estimados no software Google Colab com a Linguagem Python e biblioteca SciPy (versão 1.15.3).

A função de custo total no ano t é dada por:

$$\min_{x_{1,t}, x_{2,t}, x_{3,t}} C_t = 5,63 \cdot x_{1,t} + 7,24 \cdot x_{2,t} + 7,92 \cdot x_{3,t}$$

(07)

Onde:

- $x_{i,t}$: Volume (litros) da rota i utilizada no ano t
- C_i : custo unitário da rota i em R\$/litro (valores constantes de 2024, convertidos com câmbio R\$ 6,19/US\$);

As restrições de uso de cada rota foram baseadas na pesquisa da AGROICONE em parceria com a RSB (2021) que fala sobre a disponibilidade de cada *feedstock* no Brasil. As restrições são de:

- 110 milhões de litros para HEFA de óleo usado
- 6,48 bilhões de litros para ATJ de etanol de cana
- 2,12 bilhões de litros para SPK-FT de biomassa

4. Resultados

A simulação do modelo de substituição de QAV por SAF ao longo do período de 2027 a 2037, com os preços atualizados em dólar e convertidos para reais, revela dinâmicas importantes entre custo, eficiência ambiental e restrições operacionais. O objetivo do modelo é identificar a composição ótima da cesta de combustíveis sustentáveis, a menor custo, capaz de atender às metas de redução de emissões da Lei do Combustível do Futuro. Seus resultados sob a óptica dos custos de implementação estão dispostos na Tabela 2

Tabela 2: Custos totais da cesta do SAF

Ano	Demanda QAV (L)	Meta CO₂ (kg)	Custo total SAF (R\$)	Custo acumulado (R\$)
2027	4.185.561.000	110.373.200	R\$ 288.234.300	R\$ 288.234.300
2028	4.286.014.000	113.022.200	R\$ 295.151.900	R\$ 583.386.200
2029	4.388.879.000	231.469.500	R\$ 604.471.200	R\$ 1.187.857.400
2030	4.494.212.000	355.537.100	R\$ 979.958.000	R\$ 2.167.815.400
2031	4.602.073.000	485.426.700	R\$ 1.375.709.000	R\$ 3.543.524.400
2032	4.712.523.000	621.346.100	R\$ 1.789.831.000	R\$ 5.333.355.400
2033	4.825.623.000	763.510.100	R\$ 2.222.980.000	R\$ 7.556.335.400
2034	4.941.438.000	912.140.100	R\$ 2.675.829.000	R\$ 10.232.164.400
2035	5.060.034.000	1.067.464.000	R\$ 3.149.075.000	R\$ 13.381.239.400
2036	5.181.473.000	1.229.719.000	R\$ 3.643.436.000	R\$ 17.024.675.400

2037	5.305,830.000	1.399.147.000	R\$ 4.159.654.000	R\$ 21.184.329.400
------	---------------	---------------	-------------------	--------------------

Do ponto de vista econômico, os resultados mostram que a rota HEFA com óleo residual é a mais custo-eficiente, sendo utilizada de forma exclusiva até o ano de 2029. Seu baixo custo de R\$ 5,63/L combinado com uma boa eficiência ambiental (emissão de 0,48 kgCO_{2e}/L, gerando uma redução de 2,157 kgCO_{2e}/L em relação ao QAV) a torna dominante até o momento em que seu limite de disponibilidade é atingido. Analisando a tabela 3, tem-se que, a partir de 2030, o modelo passa a complementar a meta com a rota ATJ baseada em etanol de cana-de-açúcar, que, embora mais cara (R\$ 7,24/L), oferece uma redução ainda maior nas emissões (2,377 kgCO_{2e}/L). Essa transição acontece sem que a rota SPK-FT com biomassa lignocelulósica (R\$ 7,92/L) seja utilizada em nenhum ano, o que evidencia que sua performance ambiental ligeiramente inferior à do ATJ não compensa seu maior custo. A Tabela 3 ilustra ano a ano o volume de SAF utilizado na implementação das rotas.

Tabela 3: Volumes utilizados na implementação das rotas

Ano	x1 HEFA (Óleo)	x2 ATJ (Cana)	x3 SPK (Biomassa)
2027	51.169.792	0	0
2028	52.397.867	0	0
2029	107.310.832	0	0
2030	110.000.000	49.754.774	0
2031	110.000.000	104.399.096	0
2032	110.000.000	161.580.191	0
2033	110.000.000	221.388.348	0
2034	110.000.000	283.916.732	0
2035	110.000.000	349.261.462	0
2036	110.000.000	417.521.707	0

2037	110.000.000	488.799.774	0
------	-------------	-------------	---

Essa escolha reflete a racionalidade econômica do modelo: entre duas rotas com eficiências ambientais semelhantes, prevalece aquela com menor custo. A diferença entre as reduções de ATJ (2,377 kgCO₂e/L) e SPK (2,337 kgCO₂e/L) é de apenas 0,04 kgCO₂e/L, o que não justifica o gasto adicional de aproximadamente R\$ 0,68/L. Como consequência, a rota SPK é excluída da cesta, a menos que políticas públicas alterem sua competitividade relativa — por exemplo, via subsídios, isenções fiscais ou mandatos específicos de uso por tipo de *feedstock*.

Do ponto de vista tecnológico, o modelo evidencia o impacto de restrições técnicas e operacionais, como o limite de mistura de 50% e os tetos de produção por rota. Ainda que HEFA seja a mais eficiente economicamente, seu uso fica rapidamente esgotado pela combinação entre meta crescente de emissões e volume físico limitado. A entrada do ATJ na cesta ocorre de forma automática a partir de 2030, preenchendo a lacuna deixada pelo esgotamento do HEFA. Isso ilustra como metas mais ambiciosas levam naturalmente à diversificação da matriz, mesmo em um cenário sem intervenção governamental direta. É importante salientar que o óleo de cozinha usado também é usado na produção de graxa amarela industrial, o que pode diminuir a disponibilidade real do *feedstock* bem como aumentar seu custo de implementação. A mesma coisa aconteceria com as rotas com base em cana de açúcar, seja a biomassa do bagaço e palha quanto o etanol, eles são usados em outros processos e podem sofrer com diminuição de disponibilidade em um cenário real.

Por fim, sob a ótica ambiental, o modelo mostra que o arcabouço regulatório pode ser cumprido de maneira eficiente e previsível, com o uso de rotas disponíveis no mercado. A redução efetiva de emissões é sempre exatamente a necessária para atender à meta legal, sem excedentes, dado que o modelo é orientado por custos. Essa abordagem permite estimar com precisão o custo total de cumprimento da política em cada ano e avaliar a progressividade da política ambiental no setor aéreo brasileiro.

Esses resultados fornecem subsídios importantes para o desenho de políticas públicas. A ausência da rota SPK no mix ótimo, apesar de sua viabilidade técnica e ambiental, indica que sua competitividade depende de ajustes regulatórios. O modelo também mostra que uma política neutra, isto é, que apenas define metas, sem subsídios diferenciados tende a concentrar

o uso de rotas em poucas alternativas, o que pode gerar riscos logísticos e de suprimento. Uma política mais estratégica poderia, portanto, combinar metas crescentes com incentivos proporcionais à viabilidade técnica, ambiental e econômica de cada tecnologia.

5. Conclusão

Este trabalho estudou a implementação do SAF no Brasil com base nos suprimentos (*feedstocks*) mais prováveis e na legislação que será adotada com base na Lei do Combustível do Futuro. Verificando, assim, seus custos e rotas tecnológicas mais eficientes do ponto de vista econômico. Para isso, foi aplicado um modelo microeconômico de minimização de custos com restrições ambientais com base na literatura acerca do tema para os anos de 2027 a 2037.

Com base no comportamento do modelo, validou-se a hipótese de que a firma seguirá a lógica de minimização de custo até atingir limites operacionais. A entrada de novas rotas ocorre não por preferência ambiental, mas por necessidade técnica de cumprimento, como por exemplo quando a rota ATJ entrou na cesta de consumo por ser a segunda alternativa mais barata, mesmo com a rota SPK-FT sendo menos poluente em relação a sua alternativa. Isso reforça o papel da regulação e dos incentivos econômicos para orientar a transição energética em direção a rotas mais limpas e resilientes.

Estes achados contribuíram para a discussão presente em economia sobre o tema crescimento econômico sustentável de longo prazo. São úteis para a literatura que investiga a viabilidade do carbono zero no futuro ao trazer evidências empíricas, para as empresas que podem adaptar suas estratégias e serviços às necessidades do plano da lei do combustível do futuro e se preparar para os desafios e as oportunidades do mercado de biocombustíveis e, principalmente, para os *policy makers* que podem usar esse estudo para formular políticas públicas que atendam às necessidades da transição energética e que mitiguem os impactos negativos das mudanças climáticas conciliando com crescimento econômico sustentável.

Como sugestão para pesquisas futuras, podem ser elencados estudos que considerem os efeitos do barateamento de rotas tecnológicas que se embasem em dados mais ajustados para o mercado e realidade de matriz energética brasileira e também o efeito de políticas de subsídios e cotas de uso de rotas menos poluentes, além disso, projetar uma demanda internacional pelo SAF brasileiro, visto que o Brasil tem um potencial muito grande para se tornar exportador de combustível sustentável num cenário global.

REFERÊNCIAS

ABEAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. *Panorama Abear*, 2024. Disponível em: <https://panorama.abear.com.br/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Focus – Relatório de Mercado*. Brasília, 23 maio 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/content/focus/focus/R20250523.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.

BOONEKAMP, P. *Energy-efficiency indicators in public statistics and private benchmarking*. *Energy Policy*, v. 34, n. 15, p. 2187–2208, 2006.

BRASIL. *Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 out. 2024.

BRASIL. *Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 out. 2021.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Série Parcerias – A provisão de infraestruturas de transporte pela iniciativa privada: Aeroportos*. Brasília: CNT, 2025. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 18 mar. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Caderno de Demanda de Transportes – PDE 2032*. Brasília: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE%202032.pdf. Acesso em: 28 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Combustíveis Sustentáveis para a Aviação no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_Combust%3%ADveis_Sustent%3%A1veis_Avia%3%A7%C3%A3o_Brasil.pdf. Acesso em: 15 maio 2025.

FELL, H.; MACKENZIE, I. A.; PIZER, W. A. *Prices versus quantities versus bankable quantities*. *Resource and Energy Economics*, v. 34, n. 4, p. 607–623, 2012.

HEMIGHAUS, Greg et al. *Alternative Jet Fuels: A Supplement to Chevron's Aviation Fuels Technical Review*. Chevron Corporation, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policymakers*. [S.l.]: IPCC, 1999. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/av-en-1.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

JAFFE, A. B.; STAVINS, R. N. *Dynamic incentives of environmental regulations: the effects of alternative policy instruments on technology diffusion*. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 29, n. 3, p. S43–S63, 1995.

KLASS, Donald L. *Biomass as a Nonfossil Fuel Source*. Washington, DC: American Chemical Society, 1981.

MARRECO, J.; GALVÃO, C.; RAMOS, J. B. G. *Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 2 maio 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. *SEEG Brasil – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. Disponível em: <https://seeg.eco.br/#que>. Acesso em: 27 maio 2025.

PALTSEV, S. et al. *Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America*. Cambridge, MA: MIT Center for Sustainability Science and Strategy, 2024. Disponível em: <https://cs3.mit.edu/publication/118414>. Acesso em: 6 abr. 2025.

PIZER, W. A. *Combining price and quantity controls to mitigate global climate change*. *Journal of Public Economics*, v. 85, n. 3, p. 409–434, 2002.

STERN, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.