



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

Arthur Felipe

**Descarbonização do Transporte Aéreo: Uma Visão sobre
Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAFs) no Brasil**

Limeira
2024

Arthur Felipe

Descarbonização do Transporte Aéreo: Uma Visão sobre Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAFs) no Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel, na área de Sistemas de Informação e Comunicação.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz da Paixão Filho

Este trabalho corresponde à versão final da Trabalho de Conclusão de Curso defendida por Arthur Felipe e orientada pelo Prof. Dr. Jorge Luiz da Paixão Filho.

Limeira
2024

Na versão final, esta página será substituída pela ficha catalográfica na dissertação de mestrado ou na tese de doutorado.

No caso de TCC, deixe essa página em branco conforme as instruções a seguir.

No arquivo principal (`tese.tex`), adicione o nome do arquivo PDF com a ficha catalográfica como parâmetro para o comando `\fichacatalografica{ }` . Caso a versão da sua dissertação ou tese seja a versão anterior à aprovação pela banca, você pode substituir esta por uma página em branco com o comando a seguir:

```
\fichacatalografica{branco.pdf}
```

Substitua o arquivo `branco.pdf` por `white.pdf`, nos textos em inglês, ou por `blanco.pdf`, para textos em espanhol. Todos esses arquivos PDF já estão disponíveis neste modelo.

De acordo com o padrão da CCPG: “Quando se tratar de Teses e Dissertações financiadas por agências de fomento, os beneficiados deverão fazer referência ao apoio recebido e inserir esta informação na ficha catalográfica, além do nome da agência, o número do processo pelo qual recebeu o auxílio.”

e

“caso a tese de doutorado seja feita em Cotutela, será necessário informar na ficha catalográfica o fato, a Universidade convenente, o país e o nome do orientador.”

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Bacharel na área de concentração Sistemas de Informação e Comunicação, a que se submeteu o aluno Arthur Felipe, em 01 de julho de 2024 na Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof. Dr. Nome do Orientador
Presidente da Comissão Julgadora

Profa. Dra. Segunda Avaliadora
Instituição da segunda avaliadora

Dr. Terceiro Avaliador
Instituição do terceiro avaliador

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-graduação da Faculdade de Tecnologia.

Agradecimentos

Coloque nesse arquivo os agradecimentos àqueles que o ajudaram no seu trabalho. Os agradecimentos devem ocupar uma única página.

IMPORTANTE: Não esqueça de adicionar a frase a seguir, mesmo que você não tenha recebido bolsa CAPES.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Este trabalho analisa o impacto do uso de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAFs) na indústria aeronáutica brasileira, visando o cumprimento das metas de descarbonização da aviação criadas pelo governo brasileiro. A pesquisa destaca o crescimento da aviação após a pandemia de COVID-19 e o consequente aumento das emissões de carbono, ressaltando a relevância dos SAFs como alternativa aos combustíveis convencionais na mitigação dos impactos climáticos. Utilizando uma metodologia de revisão bibliográfica, análise de dados quantitativos e desenvolvimento de uma plataforma *web*, o estudo analisa a produção, vantagens e desafios dos SAFs, bem como a logística de distribuição no Brasil. Os resultados apontam que o país possui potencial significativo para se tornar líder na produção de SAFs em escala mundial, dada a abundância de matérias-primas e experiência em biocombustíveis. No entanto, a produção atual é limitada e requer investimentos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura, além de políticas de incentivo para viabilizar a transição energética na aviação. A pesquisa conclui que, com ações estratégicas e colaboração entre setores, o Brasil pode atender à demanda interna e contribuir para o mercado internacional de SAFs, apoiando os esforços mundiais para um futuro aeronáutico sustentável.

Abstract

This paper analyzes the impact of using Sustainable Aviation Fuels (SAFs) in the Brazilian aviation industry, aiming to meet the decarbonization targets set by the Brazilian government. The research highlights the growth of aviation after the COVID-19 pandemic and the consequent increase in carbon emissions, emphasizing the relevance of SAFs as an alternative to conventional fuels in mitigating climate impacts. Using a methodology of literature review, quantitative data analysis, and the development of a web platform, the study examines the production, advantages, and challenges of SAFs, as well as the logistics of distribution in Brazil. The results indicate that the country has significant potential to become a global leader in SAF production, given the abundance of raw materials and experience in biofuels. However, current production is limited and requires investments in research, development, and infrastructure, along with incentive policies to enable the energy transition in aviation. The research concludes that with strategic actions and sector collaboration, Brazil can meet internal demand and contribute to the international SAF market, supporting global efforts for a sustainable aviation future.

Lista de Figuras

3.1	Jet fuel production	16
3.2	Mapa do voo de Dallas para Dubai	18
3.3	Emissões de CO ₂ por distância de voo	19
3.4	Produção de SAFs via <i>PtL</i>	21
4.1	Página inicial do website	27
4.2	Calculadora de SAF do website	28
4.3	Exemplo de gráfico do website	28
5.1	Produção de Glicerina no Brasil	31
5.2	Consumo vs exportação de glicerina	32
5.3	Diferenças de emissões SAF	33
5.4	Produção e consumo de combustíveis no Brasil	34
5.5	Caminhos para produção de SAF no Brasil	36
5.6	Demanda de QAV versus produção de SAF	37
5.7	Tendencias atuais e futuras do SAF	38

Lista de Abreviações

ICCT	International Council on Clean Transportation.
CO ₂	Dióxido de Carbono.
CH ₄	Metano.
N ₂ O	Óxido Nitroso.
H ₂ O	Água.
C ₃ H ₈ O ₃	Glicerina.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
ICAO	International Civil Aviation Organization.
IATA	International Air Transport Association.
DOE	U.S. Department of Energy.
SAF	Sustainable Aviation Fuel.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
DFW	Aeroporto Internacional de Dallas/Fort Worth.
DXB	Aeroporto Internacional de Dubai.
ONG	Organização não governamental.
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.
PtL	Power to Liquid.
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil.
ATJ	Alcohol to Jet.
QAV	Querosene de Aviação.

Sumário

1	Introdução	11
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	Combustíveis aeronáuticos convencionais (Jet Fuel)	15
3.1.1	Produção dos combustíveis aeronáuticos convencionais	15
3.1.2	Vantagens dos combustíveis aeronáuticos convencionais	17
3.1.3	Emissão de GEE - Combustíveis aeronáuticos convencionais	17
3.2	Combustíveis aeronáuticos sustentáveis (SAFs)	20
3.2.1	Produção dos SAFs	20
3.2.2	Vantagens dos SAFs	23
3.2.3	Produção no Brasil	24
3.2.4	Emissão de GEE - SAFs	24
4	Metodologia	26
5	Resultados e discussões	30
5.1	Estratégias para Otimização da Produção de SAF no Brasil	30
5.2	Disponibilidade de Matéria-Prima para SAF no Brasil	31
5.3	Desafios na Logística de Distribuição de SAF	32
5.4	Impacto da Produção de SAF na Utilização de Terras e Recursos Naturais no Brasil	34
5.5	Análise Comparativa da Produção Atual e Futura de SAF Frente à Demanda .	36
5.6	Políticas de Incentivo ao SAF: Catalisadores para a Aviação Sustentável	38
6	Conclusões	40
7	Levantamento bibliográfico	41

Capítulo 1

Introdução

A aviação desempenha um papel fundamental no mundo contemporâneo, conectando pessoas e culturas, impulsionando o comércio global e promovendo o desenvolvimento econômico. Desde que os irmãos Wright realizaram o primeiro voo controlado e sustentado em 1903, a aviação tem evoluído significativamente. Ao longo do século XX e início do século XXI, a aviação passou por uma série de avanços tecnológicos, desde a introdução de aviões a jato até o desenvolvimento de sistemas de navegação avançados. Nos últimos anos, especialmente durante a pandemia de COVID-19, a aviação enfrentou desafios sem precedentes, com a implementação de novas medidas de segurança sanitária e o aumento da inflação, que levou muitos viajantes a cortarem gastos não-essenciais (SIMÕES, 2023).

Entretanto, com o final da pandemia em meados de 2022, a aviação civil vem passando por uma transformação significativa: o crescimento exponencial anual de voos de passageiros (ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE AÉREO, 2024). A princípio, essa transformação sinalizou uma recuperação na economia mundial e proporcionou ares de liberdade para a sociedade, que havia passado por um período prolongado de isolamento social nos dois anos anteriores.

Em conjunto com este elevado crescimento, há previsões de que a quantidade de voos seja triplicada até o ano de 2050 (ICCT, 2018, p.2), gerando, portanto, uma crescente preocupação com o aumento das emissões de carbono da indústria aeronáutica. O tópico vem ganhando maior relevância no cenário global recentemente, em face ao aumento dos esforços mundiais para reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2), que contribui substancialmente para potencializar os problemas gerados pelas alterações climáticas.

Embora a evidência climática sugira que um certo nível de gases de efeito estufa (como o Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), e Vapor de Água (H_2O) (NASA, 2024)) é natural e essencial para manter a Terra aquecida, garantindo a vida no planeta, a interferência humana levou aos níveis atuais, que, segundo Radka (2022), resulta em ameaças à saúde humana e ambiental. O Dióxido de Carbono, sendo um dos principais subprodutos das atividades humanas, desempenha um papel crucial neste cenário atual preocupante.

Os impactos do aumento das emissões de gases de efeito estufa afetam a complexidade dos eventos atmosféricos: o aquecimento gerado pelo Dióxido de Carbono e por outras partículas dispersas no ar (aerossóis) provoca o desequilíbrio dos padrões climáticos responsáveis pelas precipitações, que resulta na diminuição da incidência de chuvas em áreas mais poluídas (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2013, p.3), piora na qualidade do ar e o aumento da temperatura média global.

No contexto de poluição, pode-se ressaltar os impactos do setor de transportes. O setor foi responsável por quase 16% das emissões de CO_2 total emitidas em 2022 no Brasil (KPMG, 2023), sendo o sub-setor da aviação responsável por cerca de 13,7 bilhões de kg de CO_2 total no mesmo ano (ANAC, 2019), representando cerca de 22% das emissões de CO_2 total do setor.

O constante crescimento da aeronáutica como um todo e o desafio para a redução de emissões de poluentes motivou os pesquisadores a buscarem formas inovadoras de reduzir a pegada de carbono deste setor sem comprometer a segurança dos passageiros. Com a expectativa de que a indústria da aviação cresça para 8 milhões de passageiros até 2050 (BP GLOBAL, 2022), a diminuição das emissões de carbono dessa indústria é essencial para atingir as metas de neutralidade de carbono exigidas pelas entidades reguladoras.

A indústria aeronáutica é um dos contribuintes que representa o maior desafio para a redução de emissões de poluentes, dentre os diversos tipos de transporte. Esse desafio deve-se à enorme complexidade de projeto das aeronaves e aos diversos protocolos de segurança que devem ser atendidos que, em conjunto, aumentam a complexidade de homologação de novas tecnologias. Essas particularidades, além de impor maior restrição às aeronaves comerciais, impactam também o uso de novas tecnologias a bordo (como a eletrificação, por exemplo). Ademais, o modal aéreo possui a característica de emitir uma grande quantidade de poluentes por viajante, o que a torna ainda menos sustentável a longo prazo.

Os principais gases de efeito estufa emitidos pela aviação são o CO₂, resultante do funcionamento dos motores, e os chamados "*contrails*", rastros de condensação (vapor de água) deixados pelas turbinas das aeronaves, que, quando se combinam com o CO₂, aumentam a retenção de calor na atmosfera. A fim de compensar essa poluição, surgem então os "SAFs", combustíveis aeronáuticos sustentáveis que proporcionam um potencial promissor para reduzir a pegada de carbono da aviação e contribuir para o objetivo global de mitigação das alterações climáticas.

Os SAFs são um grupo de combustíveis de aviação derivados de recursos sustentáveis (como óleos de cozinha, resíduos municipais, industriais e agrícolas), gerando hidrocarbonetos similares aos combustíveis fósseis, porém que utilizam como matéria prima recursos que até então não poderiam ser reutilizados. Estes combustíveis são concebidos para serem utilizados diretamente em motores e infraestruturas existentes, constituindo uma alternativa promissora aos combustíveis tradicionais convencionais (PRUSSI et al, 2021, p. 3).

Atualmente, o uso de SAFs pode reduzir as emissões de CO₂ em até 94% ao longo do seu ciclo de vida em comparação com o combustível de aviação convencional, considerando seu ciclo de vida completo (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2023), e dado que sua produção seja feita utilizando fontes renováveis.

Em virtude dos avanços nas tecnologias de SAF, do recente crescimento no apoio político e da sua potencial contribuição para o cumprimento dos compromissos climáticos internacionais, a sua relevância vem ganhando grande destaque. Este trabalho pretende trazer uma pesquisa de aprofundamento sobre o papel que os SAFs desempenham na redução das emissões de GEE do setor da aviação, com foco especial na redução de CO₂, examinando o potencial de várias matérias-primas e métodos de produção e avaliando os desafios e oportunidades que estão por vir para a adoção generalizada de SAF.

Para enriquecer a análise deste trabalho, foi desenvolvido um website de código aberto, com base nas evidências de emissão de CO₂ por matéria prima e rota de produção encontradas pelo trabalho de Grimme (2023). Esta plataforma permitirá aos usuários aprender de forma prática sobre os SAFs, comparar diversas matérias-primas com rotas de produção do combustível, além de visualizar dados de produção e estimativas de crescimento de maneira facilitada. Através dessa ferramenta, busca-se difundir o conhecimento sobre as diversas nuances dos SAFs no Brasil, formando também uma plataforma que auxiliará em pesquisas futuras, contribuindo para um futuro mais sustentável na aviação.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é analisar o impacto da utilização de combustíveis sustentáveis na matriz energética da aviação no Brasil. Para isso, serão avaliadas as emissões de gases de efeito estufa, analisadas as diversas matérias-primas e métodos de produção de SAFs, e considerados os impactos econômicos e ambientais dessa transição. Além disso, o estudo identificará desafios e oportunidades para a adoção dos SAFs, bem como o papel das políticas públicas e regulamentações. Um website desenvolvido especificamente para esta pesquisa permitirá a comparação de matérias-primas e rotas de produção, além de facilitar a visualização de dados de produção e estimativas de crescimento dos SAFs.

2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar o potencial de produção dos diversos tipos de SAF no Brasil e suas respectivas características;
- Avaliar a importância dos SAFs na indústria aeronáutica e seus benefícios;
- Estimar a capacidade do Brasil em se tornar autossuficiente na produção de SAF;
- Conscientizar sobre o papel dos SAFs na descarbonização da indústria aeronáutica;
- Criar uma plataforma de código aberto que possa ser usada para estudos futuros sobre o tema.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Combustíveis aeronáuticos convencionais (Jet Fuel)

Atualmente, os chamados "*Jet Fuels*" são os combustíveis aeronáuticos (também conhecidos como Querosene de aviação, ou Qav) mais comumente utilizados em aeronaves movidas por motores de turbina a gás. *Jet Fuels* são uma mistura de hidrocarbonetos divididos em subclasses, respeitando a quantidade de átomos de carbono em sua molécula (AIR BP, 2020).

Esses combustíveis são separados nas categorias Jet A, Jet A-1 e Jet B. Jet A e Jet A-1 são as classificações de querosene de aviação mais comumente usados na aviação comercial, e em sua composição, possuem de 8 a 16 átomos de carbono por molécula. O Jet B possui de 5 a 15 átomos de carbono por molécula e tem como principal vantagem o melhor desempenho em temperaturas baixas se comparado com os combustíveis anteriores.

3.1.1 Produção dos combustíveis aeronáuticos convencionais

Os combustíveis aeronáuticos convencionais (Qav) são produzidos a partir de um processo complexo e altamente controlado nas refinarias. A produção inicia-se com o petróleo bruto, que passa por uma etapa de eliminação de água e sais minerais a fim de preparar a matéria-prima para as próximas etapas.

Em seguida, durante a etapa da destilação, o petróleo é fracionado de acordo com o diferente ponto de ebulação de cada subproduto. Por fim, ocorrem as etapas de refino, onde são extraídos componentes indesejáveis, e o hidrocraqueamento, processo onde o petróleo passa por uma conversão de gasóleo pesado em hidrocarbonetos mais leves [Figura 3.1].

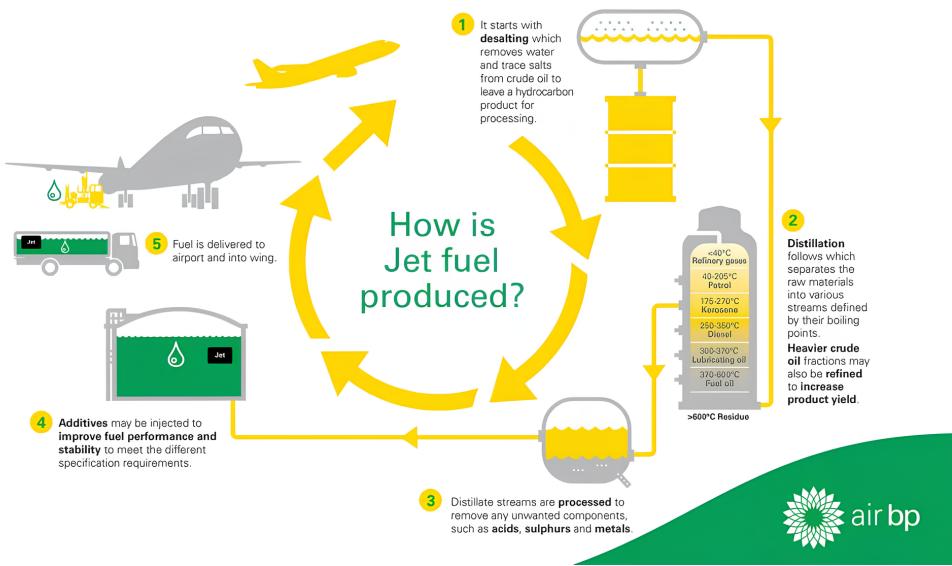


Figura 3.1: How is Jet fuel produced?

Fonte: BP Global, 2022

Uma vez concluídos esses processos, são adicionados vários aditivos para aumentar o desempenho e a estabilidade do combustível de acordo com os diferentes requisitos de especificação. No total, os combustíveis de aviação representam quase 6% da produção total de combustíveis a nível mundial.

A principal diferença entre os tipos de combustível Jet A e Jet A-1 está em seu ponto de congelamento. O Jet A-1 congela a -47 °C ou menos, enquanto o Jet A congela a -40 °C ou menos. Esta diferença no desempenho é essencial para rotas de voo específicas – por exemplo, uma rota polar de Washington a Tóquio precisa que o ponto de congelamento do combustível seja considerado (AIR BP, 2020).

Em termos de produção nacional, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos no que tange à autossuficiência em atender a demanda desses combustíveis. Cerca de 20% do querosene consumido no território nacional é proveniente de importações, conforme relata a PETROBRAS (2023). Essa estatística ressalta a dependência parcial do mercado interno em relação às importações para suprir a demanda crescente por esse combustível. Segundo dados da ANAC (2019), o consumo médio anual de querosene aeronáutico atingiu a marca de 5,5 bilhões de litros, evidenciando a importância estratégica desse recurso para o funcionamento contínuo da indústria da aviação no Brasil.

3.1.2 Vantagens dos combustíveis aeronáuticos convencionais

Os combustíveis de aviação tradicionais, como Jet A-1 ou Jet A, têm algumas qualidades significativas, que os tornaram um produto básico na indústria da aviação. Dentre essas qualidades, as mais importantes são:

1. Alta densidade de energia: Comparado com outros combustíveis, o combustível de aviação tem um alto teor de energia por unidade de volume, o que o torna muito eficaz para voos longos;
2. Disponibilidade: Como produto da refinação do petróleo, estes combustíveis estão difundidos e disponíveis a nível mundial, garantindo que as aeronaves possam ser reabastecidas em qualquer parte do mundo;
3. Qualidade e Padrões: Os combustíveis de aviação são produzidos de acordo com padrões internacionais rigorosos que garantem um desempenho confiável e previsível em diversas condições;
4. Desempenho em baixas temperaturas: Esses combustíveis têm excelente desempenho em baixas temperaturas. Como mencionado anteriormente, o Jet A-1, por exemplo, mantém a sua fluidez em temperaturas muito baixas (até -47 graus Celsius), uma característica crucial para voos polares ou de alta altitude;
5. Segurança: Jet A e Jet A-1 possuem altos pontos de fulgor (a temperatura na qual um líquido pode se inflamar), o que os torna mais seguros de manusear do que outros tipos de combustível;
6. Compatibilidade: Os motores de aeronaves modernas são projetados especificamente para funcionar com esses combustíveis. Mudanças no tipo de combustível podem exigir modificações dispendiosas.

3.1.3 Emissão de GEE - Combustíveis aeronáuticos convencionais

Com base nos dados da calculadora de emissões da Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO, 2023), uma aeronave gera, em média, 3,16 toneladas de CO₂ para cada tonelada de combustível Jet A queimado. Sabendo disso, é possível realizar o cálculo de emissão de GEE que será gerado em uma viagem aérea.

Considerando um Boeing 777-300ER, um dos modelos de aeronave mais comumente utilizados em voos internacionais, que pode transportar até 392 passageiros e abrigar cerca de 181 mil litros de combustível, obtendo um alcance máximo de até 13.600km. Este cenário pode ser representado por um voo saindo do Aeroporto Internacional de Dallas (DFW) em direção ao Aeroporto Internacional de Dubai (DXB), cidades separadas por aproximadamente 13 mil km (Figura 3.2). Baseando-se nestes parâmetros, é possível determinar que:

- 13,3 litros de combustível são consumidos por quilômetro percorrido;
- Cada passageiro é responsável pela queima de 462 litros de combustível;
- Isso significa que 1.167,87 toneladas de CO₂ são gerados por passageiro;
- O voo em si produziria uma emissão total de 457.568 toneladas de CO₂.

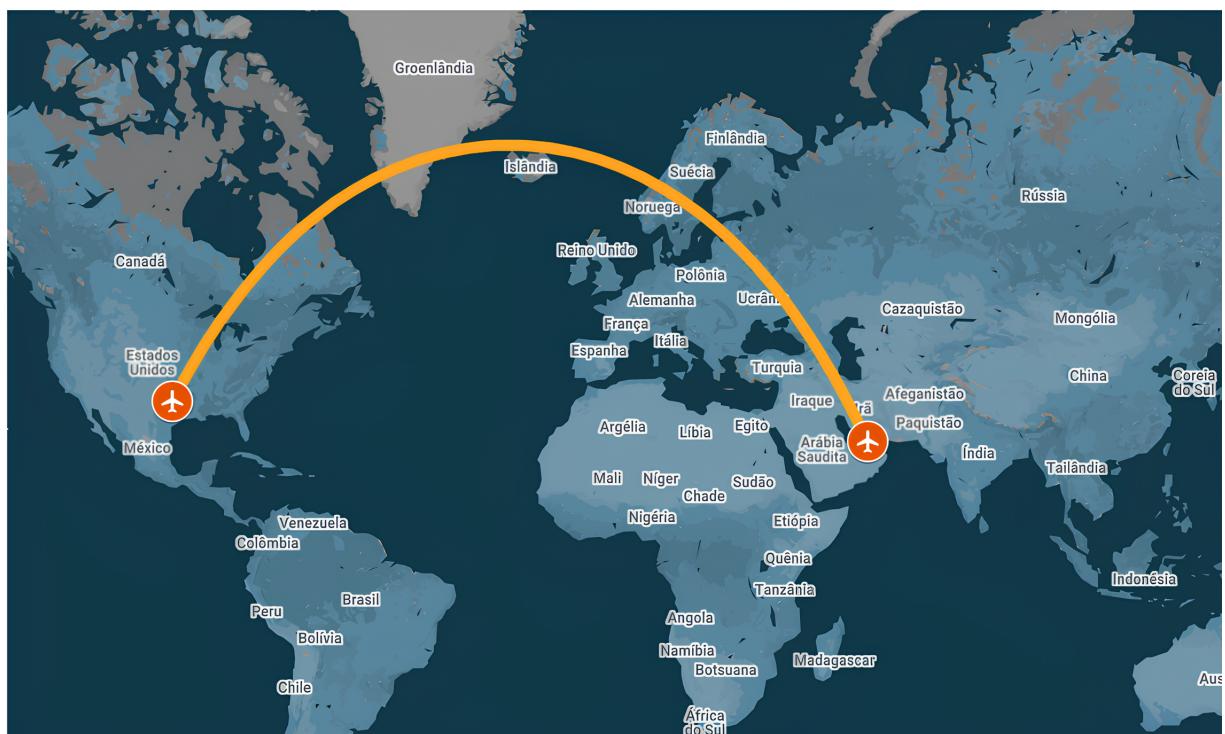


Figura 3.2: Mapa do trajeto de Dallas Fort Worth International Airport (DFW) até Dubai International Airport (DXB).

Fonte: Autoria própria.

Ao observar a quantidade de dióxido de carbono gerada por passageiro em um voo de longa distância, o impacto sobre o meio ambiente é significativamente notável. De acordo com dados divulgados pelo Global Carbon Project (2019), a média global de emissão de CO₂ per capita em 2019 foi de cerca de 4,8 toneladas. Portanto, ao avaliar que uma única viagem

de Dallas para Dubai em um Boeing 777-300ER potencialmente resulta em aproximadamente 1,167.87 toneladas de CO₂ por passageiro, percebe-se que quase 25% da cota média anual global de emissão de carbono por pessoa é atingida em um único voo.

Ademais, é vital reconhecer que, para a correta mensuração da emissão de poluentes por voo, deve-se levar em questão também cada etapa do voo nas emissões de CO₂, bem como a distância do voo em questão. De acordo com o International Council on Clean Transportation (ICCT), uma ONG dedicada ao desenvolvimento de pesquisas voltadas à sustentabilidade nos meios de transporte, existe uma grande disparidade entre as emissões de CO₂ de aeronaves de passageiros com base na distância de voo, com uma proporção significativa das emissões ocorrendo em voos de curta e média distância.

Segundo o ICCT, cerca de dois terços das emissões totais de CO₂ dos passageiros ocorreram em voos de curta e média distância, ou seja, com até 4.000 km, enquanto o terço restante das emissões aconteceu em voos de longa distância, com mais de 4.000 km (ICCT, 2018). Voos regionais com menos de 500 km, que são aproximadamente a distância onde as aeronaves competem diretamente com outros modos de transporte de passageiros, representaram cerca de 5% das emissões totais de CO₂ dos passageiros, cenário este representado na Figura 3.3

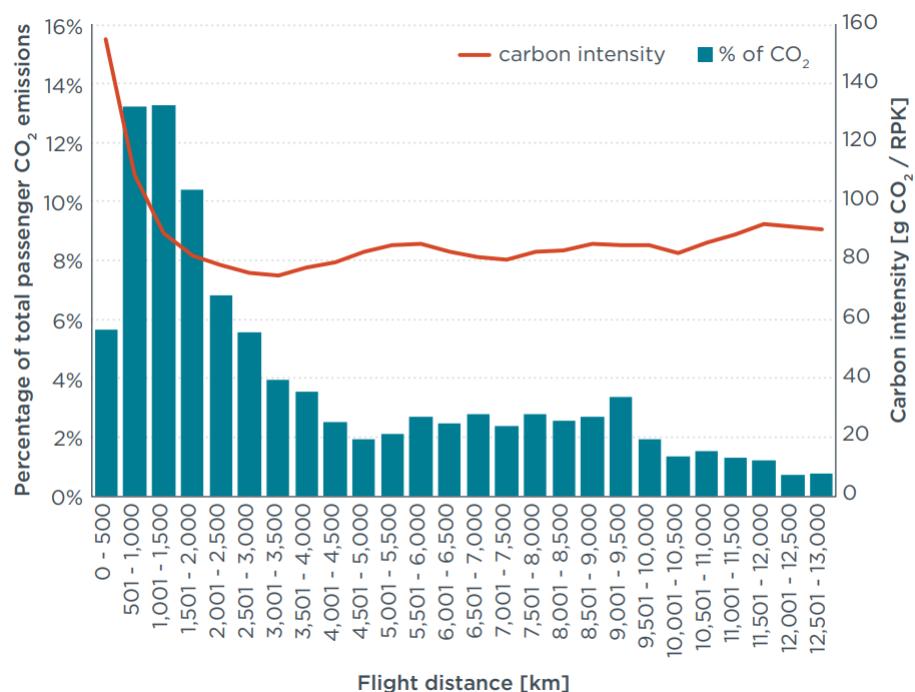


Figura 3.3: Emissões de CO₂ por distância de voo em km

Fonte: ICCT (2018, p.8)

3.2 Combustíveis aeronáuticos sustentáveis (SAFs)

Os Combustíveis de Aviação Sustentáveis (*Sustainable Aviation Fuels*, ou SAFs) são uma das estratégias mais promissoras de compensação de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) na indústria da aviação. Os SAFs são uma categoria abrangente de combustíveis aeronáuticos alternativos que podem ser misturados diretamente com combustível de avião convencional em diferentes proporções, para atender aos mais diversos requisitos.

Desenvolvidos como uma resposta ao aumento das preocupações globais com as mudanças climáticas, os SAFs têm o potencial de substituir os combustíveis aeronáuticos tradicionais, minimizando a pegada de carbono da aeronáutica, e alinhando a indústria da aviação com as metas de sustentabilidade globais. Apesar de serem uma alternativa revolucionária, esses combustíveis ainda enfrentam barreiras que podem limitar sua ampla adoção na aviação atualmente.

3.2.1 Produção dos SAFs

Esses combustíveis são criados a partir de matérias-primas renováveis, como resíduos urbanos, resíduos agrícolas, resíduos de lipídios e do próprio CO₂ da atmosfera. Através do processo de refino dessas matérias-primas, o combustível sintético resultante possui as mesmas propriedades de desempenho dos combustíveis derivados do petróleo (BRAUN et al, 2024, p. 2).

O produto final desse processo de refino continua sendo um hidrocarboneto que, quando queimado, libera gás CO₂ na atmosfera. Portanto, para que os SAFs sejam verdadeiramente sustentáveis, sua produção deve utilizar recursos que não prejudiquem o meio ambiente e assegurando que eles não venham a competir por recursos consumidos por comunidades locais.

Quando produzidos e utilizados de forma sustentável, os SAFs podem resultar em reduções significativas das emissões de GEEs em todo o ciclo de vida. Dentre as diversos caminhos para a produção de SAF, estão o HEFA (Hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos), o FT (Fischer-Tropsch), a *Power to Liquid*, o ATJ (Alcool-para- Combustível-a-Jato) e o SIP.

O processo HEFA envolve a transformação de óleos vegetais ou gorduras animais através da hidrogenação e refino das matérias-primas em hidrocarbonetos que são similares aos encontrados no querosene de aviação convencional. Já o processo FT é uma tecnologia que

converte gás de síntese, derivado de matérias-primas como biomassa, resíduos sólidos ou gás natural, em hidrocarbonetos líquidos. Esses hidrocarbonetos são então refinados para produzir uma variedade de produtos, incluindo combustíveis de aviação. O FT é conhecido por sua versatilidade na produção de uma gama de combustíveis e é frequentemente considerado como uma opção das opções mais vantajosas para a produção de SAF (BRAUN et al, 2024, p. 2).

Quando aliada ao processo de FT, a tecnologia "Power to Liquid" (ou PtL) é a forma que gera a maior remoção de CO₂ da atmosfera, permitindo uma diminuição de 94% na emissão de dióxido de carbono. Durante a transformação *Power to Liquid*, o CO₂ é retirado diretamente do ar ou diretamente de suas fontes de emissão ("captura de carbono direta do ar", ou DAC) para ser combinado com moléculas de hidrogênio, obtidos a partir da ruptura da molécula de água por meio da eletrólise, produzindo o metano sintético (CH₄) ou gás de síntese (BRAUN et al, 2024, p. 2). Em seguida, o metano é transformado em querosene parafínico sintético pelo processo de Fischer-Tropsch, para converter o gás de síntese em hidrocarbonetos líquidos (Figura 3.4).

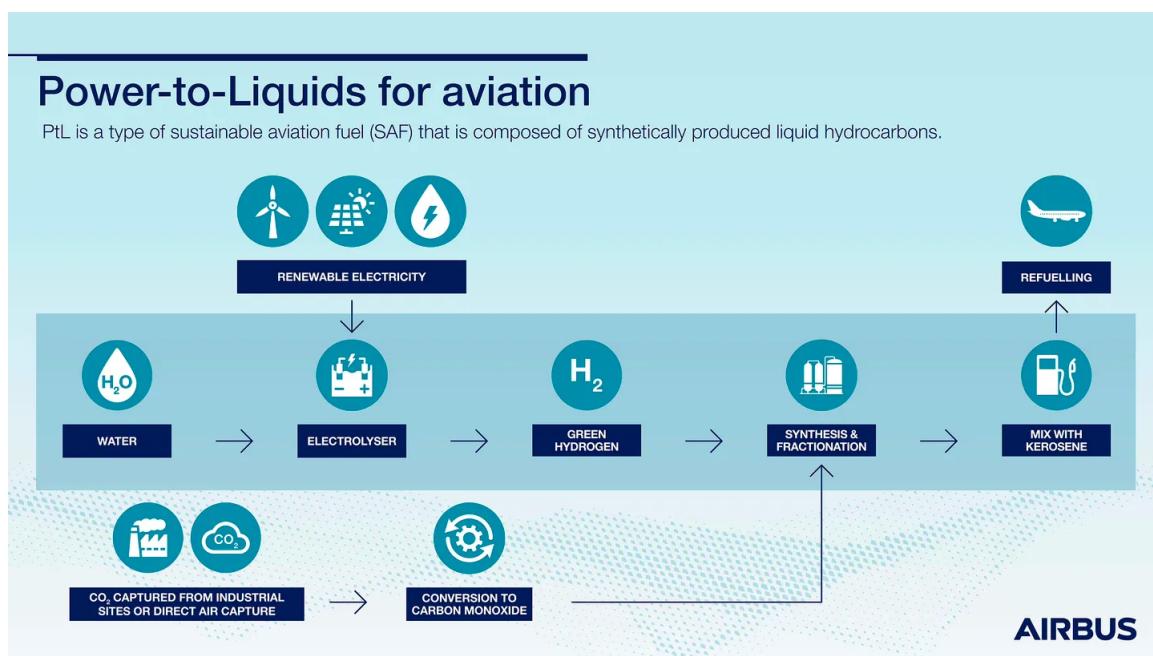


Figura 3.4: Power-to-Liquids, explained
Airbus (2021)

O processo ATJ envolve a conversão de álcoois renováveis, como etanol ou metanol, em hidrocarbonetos que são adequados para uso como combustíveis de aviação. Este processo normalmente inclui etapas de desidratação, oligomerização e hidrogenação para transformar

os álcoois em hidrocarbonetos mais complexos, que possuem características de desempenho semelhantes ao querosene de aviação tradicional. O ATJ está emergindo como uma alternativa promissora na produção de SAF, especialmente devido à disponibilidade de matérias-primas renováveis.

Por fim, no processo SIP, açúcares derivados de biomassas renováveis, como resíduos agrícolas ou vegetais, são fermentados por microorganismos geneticamente modificados para produzir hidrocarbonetos específicos, conhecidos como iso-parafinas. Essas iso-parafinas são então refinadas e misturadas para criar SAFs a serem usados em motores de aeronaves convencionais.

Estes processos geram hidrocarbonetos quase neutros em termos de carbono, uma vez que o CO₂ emitido durante a futura queima do combustível é praticamente o mesmo volume que foi retirado da atmosfera durante a etapa produção do combustível. Porém, para obter-se a maior neutralidade de carbono possível, durante o processo deve-se utilizar fontes renováveis a fim de poupar recursos naturais e não gerar poluentes adicionais.

No Brasil, destacam-se os resíduos agrícolas. Dentre eles, encontram-se o bagaço de cana (subproduto que é gerado durante a etapa de moagem da cana-de-açúcar), a palha da cana (que é recuperada da colheita da cana) e os resíduos de madeira (que são resíduos gerados durante as operações de colheita de eucalipto, geralmente deixados no campo), que são futuramente convertidos em SAF através do processo FT ou do processo *Alcohol to Jet* (ATJ), onde a matéria-prima é primeiramente convertida em etanol por hidrólise enzimática e, posteriormente, refinada em cadeias de hidrocarbonetos conforme a necessidade (RSB, 2021).

Além dos resíduos agrícolas, o Brasil beneficia-se da abundância de resíduos lipídicos, como sebo bovino e o óleo residual de fritura em domicílios ou comerciais. Essas matérias-primas são processadas pelo método de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA), onde as gorduras são tratadas com hidrogênio para remover o oxigênio e ajustar a estrutura química, tornando-as semelhantes ao querosene de aviação convencional. Após a quebra em fragmentos menores e a adequação das propriedades, os diferentes combustíveis resultantes são separados, sendo um deles o SAF (RSB, 2021).

O SAF resultante pode ser misturado com combustíveis de aviação tradicionais em proporções de até 50%, sem necessidade de modificações nos motores das aeronaves. Os combustíveis resultantes destes processos são formulados para atender os rigorosos requisitos das normas técnicas que abrangem especificamente os SAFs, como é o caso da

ASTM D7566, especificação que descreve os requisitos para a produção de combustível de aviação não baseados em petróleo (PRUSSI et al., 2021, p. 3).

3.2.2 Vantagens dos SAFs

Embora a introdução dos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) na indústria aeronáutica seja relativamente recente, eles carregam um potencial disruptivo que promete transformar significativamente o setor. Os SAFs destacam-se por suas propriedades benéficas e as possibilidades que oferecem, as quais incluem:

1. Os SAFs derivados da tecnologia PtL são ilimitados em termos de disponibilidade de matéria-prima, já que sua produção necessita apenas de energia elétrica, hidrogênio – obtido, por exemplo, através da eletrólise da água – e carbono, que pode ser capturado do dióxido de carbono através da captura direta de ar (Rojas-Michaga et al, 2023, p. 9);
2. Os SAFs oferecem uma solução para o armazenamento de energia renovável, oriunda de locais remotos onde a rede local não pode utilizá-la plenamente, transformando-a em combustível líquido para uso em diversas aplicações. Este recurso é particularmente útil para resolver desafios relativos à intermitência e à sobreprodução de fontes de energia renováveis, melhorando a eficiência geral do sistema.
3. Diversas fontes de energia elétrica, como eólica, solar, maremotriz e hidráulica, podem ser empregadas para produzir SAFs. Isso oferece flexibilidade na utilização da matriz energética, conforme a disponibilidade de cada local (Rojas-Michaga et al, 2023, p. 3).
4. O SAF também abre possibilidade para o uso de matérias-primas que tinham seu potencial de renovação pouco explorado, podendo ainda aproveitar normalmente desperdiçados, como o uso de água não-potável ou salgada para o processo de hidrólise durante a etapa de produção do combustível, representando um avanço notável, particularmente em regiões carentes de água doce.
5. Tecnologias como a PtL possuem a capacidade de remover CO₂ da atmosfera durante o processo de produção de combustível. A captura de carbono pode ser feita diretamente da atmosfera ou de processos industriais que de outra forma emitem CO₂, contribuindo para o processo de descarbonização global (BRAUN; GRIMME; OESINGMANN, 2024, p.4).

3.2.3 Produção no Brasil

A produção de SAF no Brasil ainda está em estágios iniciais e é considerada diminuta em comparação com a demanda potencial e a produção global. Somente em 2023 que o Brasil inaugurou sua primeira planta destinada à produção do combustível (MCTI, 2023). A planta está instalada no Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER), em Natal, Rio Grande do Norte.

A primeira planta piloto de combustível sustentável de aviação possui capacidade para produzir apenas 5 litros de SAF por dia, porém contribui para os objetivos brasileiros relacionados à descarbonização da economia, principalmente no setor de aviação.

O laboratório vai permitir que pesquisadores estudem a viabilidade da produção do combustível a partir de uma série de matérias-primas abundantes no Brasil, além de servir como base para a homologação da produção do combustível no país.

No entanto, apesar da produção de SAF no Brasil ser pequena, o país ainda tem um potencial significativo, já que dispõe de matérias-primas em abundância, como o óleo de soja, o sebo bovino, a glicerina e o bagaço de cana-de-açúcar, que podem ser convertidos em SAF. Além disso, o Brasil tem experiência na produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, o que deverá facilitar a transição para a produção de SAF.

Com o crescimento das preocupações com a descarbonização dos meios de transporte e o emergente mercado de SAF em nível mundial, o governo vem investindo em mais políticas de incentivo à pesquisa de combustíveis renováveis, como é o caso do projeto de lei PL 528/2020, dos “combustíveis do futuro”. Este projeto visa criar programas nacionais de diesel verde, biogás, combustível sustentável para aviação e biometano (LIAZIBRA, 2024).

3.2.4 Emissão de GEE - SAFs

O uso de SAFs na aviação tem o potencial de reduzir drasticamente o impacto ambiental associado a voos comerciais. É possível constatar essa redução ao considerar o mesmo trajeto saindo do Aeroporto Internacional de Dallas (DFW) em direção ao Aeroporto Internacional de Dubai (DXB) como visto anteriormente, porém adotando-se o uso estritamente de SAF.

Embora o consumo de combustível por quilômetro percorrido (13,3 litros) e o total de combustível queimado por passageiro (462 litros) permanecem constantes independente do tipo de combustível, atualmente, a utilização de SAFs pode reduzir as emissões de CO₂ em até 94% em comparação com os combustíveis fósseis convencionais. Isso significa que para cada

passageiro, a emissão poderia baixar de centenas de quilogramas para algo substancialmente menor, enquanto as emissões totais do voo poderiam declinar de milhares de toneladas para apenas uma fração desse valor.

Considerando que a aeronave esteja abastecida com combustível 100% SAF, e adotando o percentual máximo de redução de CO₂, que é de 94%, nota-se que:

- 70,07 toneladas de CO₂ serão gerados por passageiro, ao invés de 1.167,87 toneladas usando combustíveis tradicionais;
- O voo em si produziria uma emissão total de 27.454,08 toneladas de CO₂, ao invés de 457.568 toneladas usando combustíveis tradicionais.

Capítulo 4

Metodologia

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o potencial do Brasil na produção de SAFs e investigar os principais métodos de produção disponíveis no país. Neste âmbito, a pesquisa focou em aprofundar o conhecimento sobre os impactos sociais e ambientais dos SAF e identificar as rotas de produção mais promissoras no contexto brasileiro. Para isso, foram coletados dados quantitativos sobre a produção atual de SAF, projeções futuras de produção e o consumo atual de querosene aeronáutico convencional.

Em seguida, foi desenvolvido um *website* no domínio <https://safbrasil.online> para apoiar o desenvolvimento da do estudo científico e também servir como amparo para pesquisas futuras a respeito do tema. O *website* possui ainda um fator social, com o intuito de difundir a tecnologia dos combustíveis sustentáveis, ajudando o campo de estudo de SAF a ganhar maior reconhecimento.

O *website* utiliza as tecnologias de HTML, CSS e JavaScript e possui código fonte aberto, que pode ser encontrado no repositório do projeto no GitHub, em https://github.com/k1asdfh/Projeto_TCC. O conteúdo está disposto em três páginas, sendo a primeira responsável por informar ao leitor informações importantes sobre os combustíveis aeronáuticos sustentáveis, seus impactos na aviação e seus meios de produção (Figura 4.1). A página foca na exposição do tema para o público geral, e busca explicar, de forma simplificada, pontos importantes dos SAFs para conscientização dos leitores.

A segunda página apresenta uma calculadora de SAF, onde o usuário deverá informar a matéria-prima, a rota de produção, o tipo e distância de transporte (da refinaria onde é produzido o combustível até o aeroporto de destino). O programa calcula, então, os dados de



Importância da Redução de Emissão de CO₂ na Aviação

A aviação é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO₂, contribuindo para as mudanças climáticas. A redução dessas emissões é crucial para mitigar os impactos ambientais e alcançar as metas de sustentabilidade global.

A implementação de Sustainable Aviation Fuels (SAFs) representa uma importante estratégia para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na aviação comercial. No contexto brasileiro, enquanto alguns avanços têm sido feitos, desafios significativos ainda persistem, exigindo uma avaliação criteriosa das implicações técnicas, logísticas e ambientais envolvidas na produção e distribuição de SAFs.

Atualmente, no Brasil, a produção de SAFs é incipiente, com poucas refinarias engajadas nesse segmento. Destacam-se, entre essas refinarias, unidades como a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), localizada no Paraná, e a Refinaria Henrique Lage (REVAP), situada em São Paulo. Essas refinarias, entre outras, têm desempenhado como pioneiras na produção de SAFs, apontando para um potencial significativo de crescimento e diversificação no setor.

Crises de Petróleo e Flutuação de Preços

As crises de petróleo e a constante flutuação de preços afetam a economia global e a estabilidade dos mercados de energia. Um supply chain bem formado de SAF pode mitigar esses problemas ao oferecer uma alternativa mais estável e sustentável aos combustíveis fósseis, reduzindo a dependência de recursos não-renováveis e aumentando a resiliência energética.

Figura 4.1: Página inicial de conscientização em SAF do website

Fonte: safbrasil.online

emissão de CO₂ do combustível (comparado com o querosene aeronáutico tradicional), poluição gerada pelo transporte, percentual de melhoria real e teórico (Figura 4.2).

Para a realização dos cálculos de emissão de CO₂ por tipo de SAF e por rota, foi adaptada a tabela de Potencial de redução de CO₂ do ciclo de vida do SAF de GRIMME (2023).

Para a realização dos cálculos de emissão de Dióxido de Carbono gerado no transporte rodoviário, foi utilizada a média de emissão do caminhão mais vendido do Brasil no ano de 2023, o Volvo FH 540 (VOLVO GROUP, 2023). De acordo com a ficha técnica oficial da montadora, o caminhão percorre 2,84 km por litro de diesel. Utilizando o fator médio de emissão de 2.682 gramas de CO₂ por litro de diesel (GASOGENIO, 2023), sua emissão de Dióxido de carbono pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Emissão de CO}_2 \text{ por km} = \frac{2.682 \text{ g de CO}_2}{2.84 \text{ km/l}} = 944 \text{ g de CO}_2 \text{ por km}$$

Contrastando com o transporte marítimo, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), um navio cargueiro típico emite aproximadamente 15 gramas de CO₂ por tonelada-quilômetro. Em outras palavras, para cada quilômetro percorrido por um navio transportando uma tonelada de carga, são emitidos 0,015 kg de CO₂. Esses dados são então substituídos

SAF Conscientização Principal Calculadora de SAF Gráfico de SAF

Resumo:

- ※ Matéria Prima: Cana de Açúcar
- ※ Rota de Produção: ATJ (Etanol)
- ※ Tipo de Transporte: Dutos
- ※ Distância (km): 150.0
- ※ Estimativa de emissão de CO₂ por MJ de Combustível de Aviação: 32.80g
- ※ Emissão de CO₂ por kg de Combustível de Aviação: 3.16kg
- ※ Estimativa de emissão de CO₂ por kg do SAF: 1.41kg
- ※ CO₂ emitido durante o transporte: 0.00kg
- ※ Estimativa de emissão total de CO₂ do SAF (incl. transporte): 1.41kg
- ※ Percentual de redução de emissão de CO₂-eq real em comparação com Combustível de Aviação: 55.37%

O combustível em questão, com rota de produção ATJ (Etanol), representa uma melhora em relação aos combustíveis tradicionais. Isso gera uma redução de 40.69g de CO₂ por megajoule de combustível, se comparado com o Jet A, combustível aeronáutico tradicional.

Figura 4.2: Página contendo a calculadora de emissões de SAF do website
Fonte: safbrasil.online

nas fórmulas do programa desenvolvido para calcular os resultados de acordo com os dados selecionados pelo usuário.

Por fim, na terceira página, o usuário deverá informar os dados históricos de demanda de querosene aeronáutico e de produção de SAF, para que o sistema calcule uma previsão linear dos valores futuros de demanda de QAV e produção de SAF até o ano de 2037 (Figura 4.3). O sistema retorna, então, um gráfico com os dados previstos e uma saída ao usuário, mostrando se a produção de SAF atingirá a demanda de QAV e se atenderá as metas de descarbonização na aeronáutica determinadas pelo governo até 2037 (BRASIL, 2023).

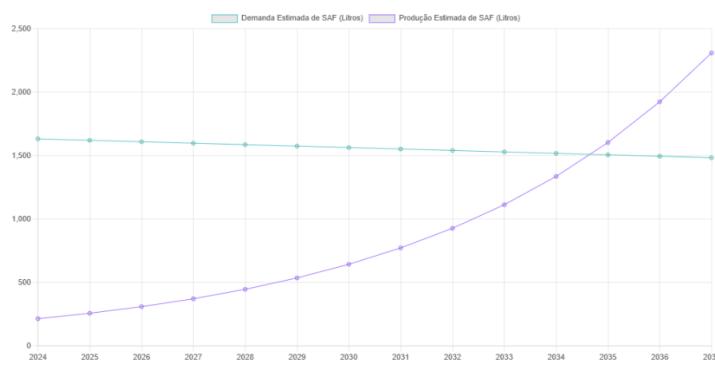


Figura 4.3: Exemplo de gráfico gerado no website
Fonte: safbrasil.online

A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica em sites especializados, artigos científicos e bancos de dados públicos, garantindo a obtenção de informações relevantes

e atualizadas. A análise estatística dos dados foi conduzida utilizando ferramentas do Google, que são acessíveis e eficientes para o tratamento e análise de grandes volumes de dados.

Para assegurar a validade e a confiabilidade dos resultados, foi realizada uma validação cruzada das fontes, comparando os dados obtidos de diferentes publicações e bancos de dados. Essa etapa foi crucial para confirmar a consistência das informações e para minimizar o risco de desvios ou erros na interpretação dos dados.

Capítulo 5

Resultados e discussões

5.1 Estratégias para Otimização da Produção de SAF no Brasil

O Brasil é, atualmente, um dos maiores produtores de biocombustíveis no mundo, encontrando-se atrás apenas dos Estados Unidos (BIODIESELBR, 2023). Em 1975, com a criação do Proálcool, programa federal de incentivo à produção e uso de biocombustíveis, o país teve fortes investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de combustíveis alternativos. Apesar de estar na vanguarda da produção de combustíveis renováveis dedicados aos veículos terrestres, o país enfrenta dificuldades para se destacar no setor aeronáutico, sobretudo no que se diz respeito à produção de SAF.

A transição para SAF no Brasil requer uma abordagem sistêmica que considere as especificidades econômicas, tecnológicas e ambientais do país. Analisando-se as diversas rotas tecnológicas para a produção de SAF, os dados indicam que a gaseificação de resíduos sólidos urbanos e a conversão de álcool para *jet fuel* (ATJ) utilizando resíduos de cana-de-açúcar são vias promissoras (RSB, 2021).

É importante ressaltar a planta-piloto inaugurada no Rio Grande do Norte, com capacidade de produção de 5 litros/dia de Syncrude a partir de glicerina, ilustra o potencial de subprodutos industriais na produção de SAF (BIODIESELBR, 2023a). Contudo, para que essas rotas sejam otimizadas, é necessário um investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento, bem como a criação de infraestrutura que permita a escalabilidade industrial dessas tecnologias. Ademais, a viabilidade econômica dessas rotas depende

especialmente de incentivos políticos que reduzam os custos operacionais e de capital, como evidenciado pelo estudo de Wang et al. (2021).

5.2 Disponibilidade de Matéria-Prima para SAF no Brasil

Segundo os dados de RSB (2021), o Brasil possui uma vasta disponibilidade de matérias-primas adequadas para a produção de SAF, o que representa uma vantagem competitiva significativa. A glicerina ($C_3H_8O_3$), por exemplo, subproduto da produção de biodiesel e uma das possíveis matérias-primas para produção de SAF, é produzida em quantidades substanciais devido à crescente demanda do combustível. No ano de 2022, a produção nacional alcançou aproximadamente 551.940,85 metros cúbicos de glicerina (ANP, 2023), dos quais apenas 166.226,56 metros cúbicos são destinados ao mercado interno (BIODIESELBR, 2023b), como pode-se observar nas figuras 5.1 e 5.2

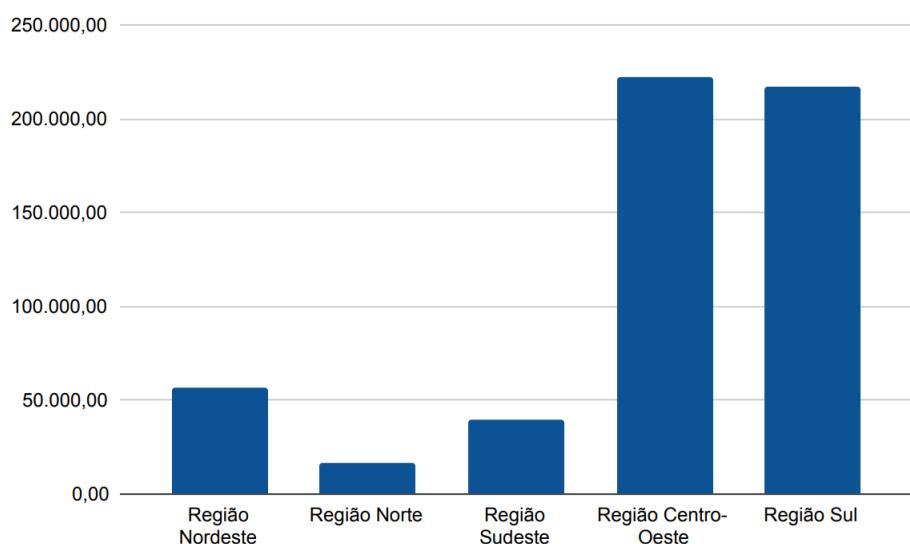


Figura 5.1: Produção de glicerina por estado do Brasil em 2022

Fonte: Autoria própria

Além da glicerina, o óleo de cozinha usado e os resíduos de madeira também têm o potencial de serem matérias-prima para a geração de SAF, potencialmente produzindo 1,9 e 8,6 bilhões de litros do combustível, respectivamente (RSB, 2021). No entanto, para garantir a sustentabilidade dessa produção, é essencial que sejam implementadas práticas de manejo sustentável das matérias-primas, evitando a competição por terras e recursos naturais e garantindo a preservação da biodiversidade.

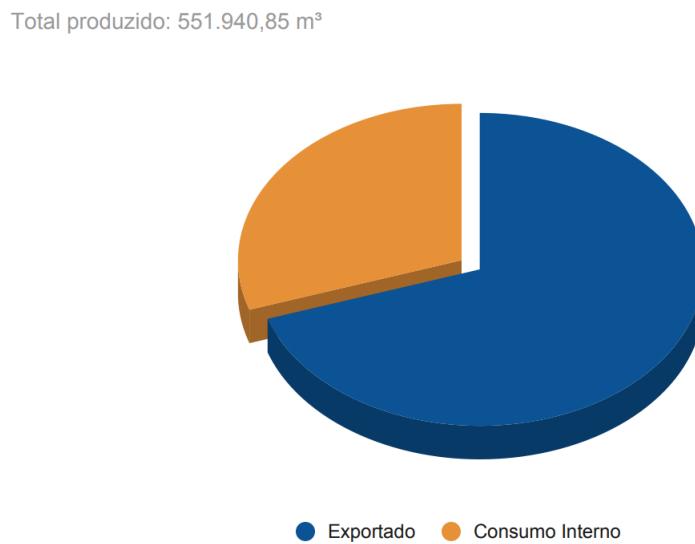


Figura 5.2: Consumo vs exportação de glicerina no Brasil em 2022
Fonte: Autoria própria

5.3 Desafios na Logística de Distribuição de SAF

Diferente do modal terrestre, que é abastecido em postos de combustíveis dispersos por todas as cidades do país, o modal aéreo depende do abastecimento realizado nos aeroportos. Atualmente, os aeroportos de Guarulhos, em São Paulo, e do Galeão, no Rio de Janeiro, são os únicos terminais do Brasil que recebem o combustível que abastece os aviões diretamente por dutos subterrâneos vindos das refinarias (CNT, 2018). Os outros aeroportos do país, entretanto, recebem o combustível pelo modal rodoviário e marítimo.

Este desafio logístico torna-se ainda mais relevante ao levar em consideração a constante preocupação com a redução de emissão de CO₂ durante todo o ciclo de vida do SAF, e não apenas a emissão gerada por sua queima. Um SAF pode se tornar uma alternativa desvantajosa do ponto de vista de emissões de carbono ao levar em conta a emissão de Dióxido de Carbono durante do combustível, da refinaria ao aeroporto.

Para refletir esse cenário, pode-se levar em consideração a produção de SAF com a matéria prima de beterraba açucareira. Segundo Grimme (2023), quando refinada pela rota de produção SIP, o combustível resultante gera uma emissão de 1.87kg de CO₂ por kg do combustível, enquanto o combustível de aviação tradicional gera 3.16kg de CO₂, em média. Porém, ao considerarmos a emissão de CO₂ emitida em um transporte de 1500 km no modal rodoviário, percebemos que a emissão bruta do combustível será de 3.29kg de CO₂, uma piora de 4,14% nas emissões de CO₂, se comparado com o combustível de aviação tradicional (Figura 5.3).

SAF Conscientização		SAF Conscientização
Resumo:		Resumo:
※ Matéria Prima: Dióxido de Carbono (CO2)		※ Matéria Prima: Dióxido de Carbono (CO2)
※ Rota de Produção: FT		※ Rota de Produção: FT
※ Tipo de Transporte: Rodoviário		※ Tipo de Transporte: Rodoviário
※ Distância (km): 0.0		※ Distância (km): 3200.0
※ Estimativa de emissão de CO2 por MJ de Combustível de Aviação: 5.30g		※ Estimativa de emissão de CO2 por MJ de Combustível de Aviação: 5.30g
※ Emissão de CO2 por kg de Combustível de Aviação: 3.16kg		※ Emissão de CO2 por kg de Combustível de Aviação: 3.16kg
※ Estimativa de emissão de CO2 por kg do SAF: 0.23kg		※ Estimativa de emissão de CO2 por kg do SAF: 0.23kg
※ CO2 emitido durante o transporte: 0.00kg		※ CO2 emitido durante o transporte: 3.02kg
※ Estimativa de emissão total de CO2 do SAF (incl. transporte): 0.23kg		※ Estimativa de emissão total de CO2 do SAF (incl. transporte): 3.25kg
※ Percentual mínimo de emissão de CO2-eq em comparação com Combustível de Aviação: 94.00%		※ Percentual de aumento total de CO2 em comparação com Combustível de Aviação: 2.81%
※ Percentual de redução de emissão de CO2-eq real em comparação com Combustível de Aviação: 92.79%		✖ O combustível em questão, com rota de produção FT, não representa uma melhora em relação aos combustíveis tradicionais.
<input checked="" type="checkbox"/> O combustível em questão, com rota de produção FT, representa uma melhora em relação aos combustíveis tradicionais. Isso gera uma redução de 68.19g de CO2 por megajoule de combustível, se comparado com o Jet A, combustível aeronáutico tradicional.		

Figura 5.3: Diferenças entre as emissões brutas de CO2 de um mesmo SAF

Fonte: Calculadora de SAF

Portanto, a distribuição eficiente do SAF é um componente crítico para a sua adoção em larga escala. Pode-se tomar como exemplo a região Sudeste do Brasil, especialmente o estado de São Paulo, que é identificado como um local estratégico para a produção e distribuição de SAF. A região se beneficia da alta disponibilidade de matéria-prima, elevada demanda por querosene de aviação (RSB 2021) e a proximidade com grandes aeroportos da região, ao passo que aeroportos localizados em estados com menor densidade populacional (como na região Norte do Brasil, Figura 5.4), representam um maior desafio para a adoção do SAF em larga escala.

Esses fatos demonstram a necessidade de expandir e adaptar a infraestrutura logística existente para garantir a eficiência no transporte do SAF das refinarias até os aeroportos, assegurando a fiabilidade do abastecimento dos aeroportos com novo combustível. Tais mudanças requerem um planejamento detalhado e investimentos em infraestrutura de produção, transporte e armazenamento, considerando a crescente demanda por combustíveis aeronáuticos.

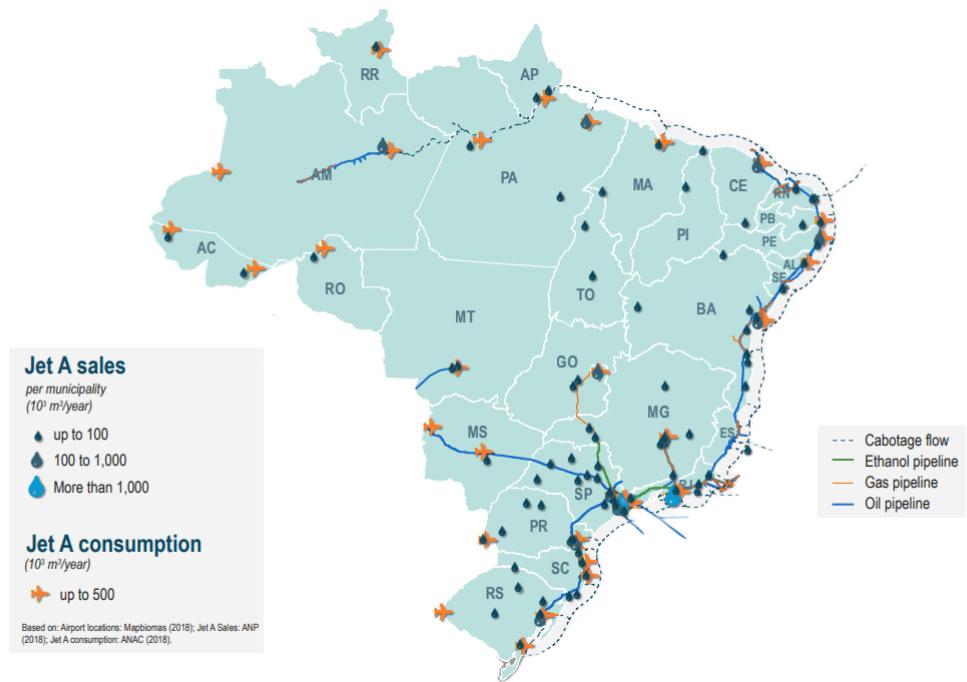


Figura 5.4: Mapa do consumo e distribuição dos combustíveis no Brasil
Fonte: RSB (2021)

5.4 Impacto da Produção de SAF na Utilização de Terras e Recursos Naturais no Brasil

A expansão da produção de SAF no Brasil deve ser cuidadosamente avaliada para evitar impactos negativos sobre o uso de terras e recursos naturais. Tanto a produção de suas matérias-prima quanto seu refino incluem riscos e desafios, tais quais:

1. Competição por Terras Agrícolas: A produção de SAF pode exigir grandes quantidades de biomassa, que muitas vezes é cultivada em terras agrícolas. Isso pode levar a uma competição direta com a produção de alimentos, potencialmente aumentando os preços dos alimentos e exigindo mais recursos hídricos e dos solos para o plantio;
2. Uso de Água e Impacto nos Ecossistemas: A irrigação necessária para o cultivo de matérias-primas para o SAF pode aumentar a demanda por água, afetando a disponibilidade de água para outros usos e impactando ecossistemas aquáticos e terrestres da região;
3. Desmatamento e Perda de Biodiversidade: A expansão das áreas de cultivo para a produção de SAF pode levar ao desmatamento e à degradação de habitats naturais,

resultando em perda de biodiversidade e exacerbando os impactos da mudança climática proveniente do desmatamento;

4. Emissões Indiretas de Gases de Efeito Estufa: As emissões indiretas associadas à produção de SAF, como potencialmente o uso de energias não-renováveis para seu refino e o seu transporte via modal rodoviário, podem diminuir ou até mesmo anular os benefícios climáticos do uso de SAF em comparação com os combustíveis fósseis.
5. Desafios Técnicos e Escalabilidade: A produção de SAF enfrenta desafios técnicos, incluindo a necessidade de desenvolver tecnologias de conversão eficientes e escaláveis que possam processar uma variedade de matérias-primas e integrar-se às infraestruturas existentes.
6. Conflitos Socioeconômicos: A produção de SAF pode gerar conflitos socioeconômicos localizados, especialmente em regiões onde a terra é um recurso escasso e há competição entre diferentes grupos de interesse, como comunidades locais, agricultores e empresas privadas.
7. Concorrência com outros modais: O setor da aviação precisa estar atento à possível concorrência de demanda de outros modos de transporte. Em particular, o transporte marítimo, que recorre cada vez mais ao uso de combustíveis sustentáveis, dadas as limitações para descarbonizar a operação de grandes navios de contêineres. Isso destaca a importância de considerar as dinâmicas inter-setoriais mais amplas ao planejar e implementar estratégias de combustíveis sustentáveis dentro da indústria da aviação.

Para mitigar os possíveis impactos sociais e ambientais provenientes da produção do SAF, o uso de resíduos e subprodutos (como a glicerina e o bagaço de cana, Figura 5.5), oferece uma alternativa sustentável, pois não exige novas áreas de cultivo e pode reduzir a pressão sobre os ecossistemas naturais. A produção de biodiesel, que gera cerca de 89% da glicerina disponível no país, exemplifica como a indústria pode contribuir para a produção de SAF sem comprometer a sustentabilidade ambiental (BIODIESELBR, 2023a).

Por fim, para mitigar a concorrência intermodal oriunda do crescimento da adoção do SAF, estratégias integradas de desenvolvimento de mercado e precificação devem ser consideradas. Isso inclui o investimento em tecnologias de produção mais eficientes, a

colaboração com outros setores para desenvolver políticas de incentivo que promovam a produção e o uso de SAF de maneira equitativa, além da própria diversificação das fontes de matérias-primas para SAF.

» Potential production of SAF in Brazilian states from each feedstock (in billions of litres).

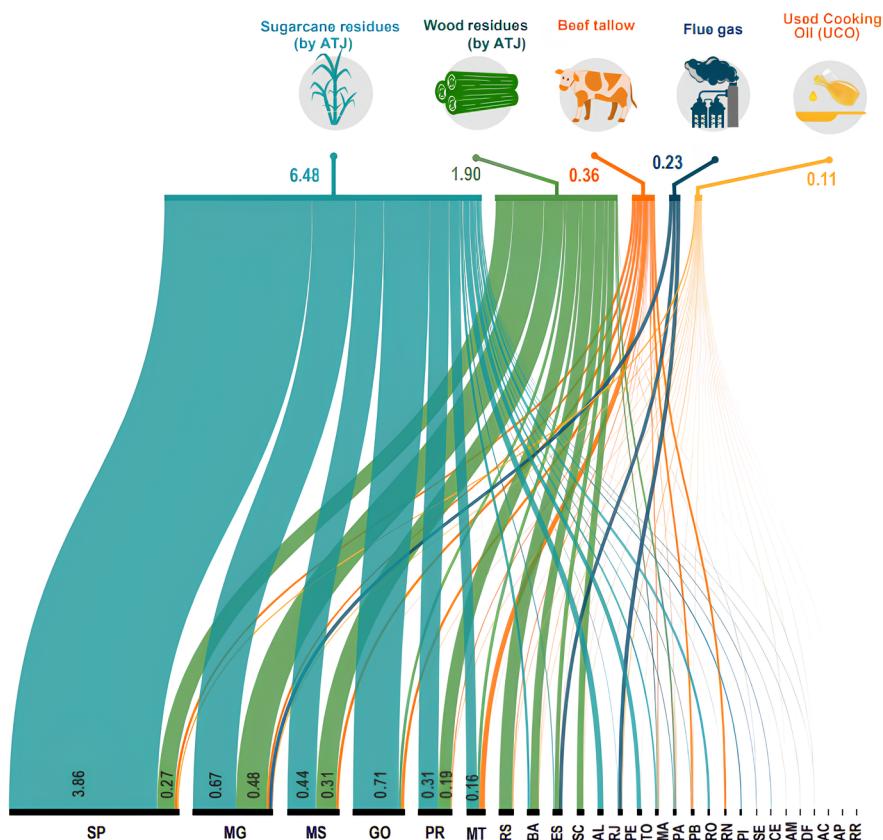


Figura 5.5: Caminhos para produção de SAF no Brasil
Fonte: RSB (2021)

5.5 Análise Comparativa da Produção Atual e Futura de SAF Frente à Demanda

Atualmente, a produção de SAF é limitada para atender a demanda global da aviação e atender aos objetivos futuros de descarbonização do setor. Em 2022, a produção global de SAF foi de apenas 0,24 milhões de toneladas, que representa apenas 0,1% do volume total de *jet fuel* produzido no mesmo período (IATA, 2023a).

A Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) projeta que, para alcançar a meta de cobrir 2% da demanda total de combustível da indústria aérea em 2025, serão necessários cerca de 7,9 bilhões de litros de SAF (ZAPAROLLI, 2022). Diante deste cenário, observa-se que:

- A produção atual de SAF no Brasil é de 5 litros por dia, ou 1.825 litros por ano (BIODIESELBR, 2023a);
- A previsão de produção de SAF no Brasil é de até 9 bilhões de litros por ano (RSB, 2021);
- A produção atual de SAF mundial é de 600 milhões de litros por ano (IATA, 2023b);
- A demanda atual de Jet Fuel no Brasil é de 4,72 bilhões de litros por ano (ANAC, 2019);

Ao confrontar os dados de produção de SAF no Brasil com o histórico de consumo de querosene aeronáutico no país (BNDES, 2021 e IBP, 2024), pode-se observar que a produção atual não irá alcançar a demanda por QAV. Ademais, ao considerar a nova meta de descarbonização proposta pelo governo, que impõe que as empresas aéreas ficam obrigadas a reduzir emissão de CO₂ entre 1% a partir de 2027, e com a expectativa de chegar a 10% em 2037 (BRASIL, 2023), o cenário é mais alarmante ainda, como representado na Figura 5.6.

✗ A produção de SAF não atenderá a demanda até 2037.

✗ A produção de SAF não atingirá a meta de redução de 1% de CO₂ até 2037.

✗ A produção de SAF não atingirá a meta de redução de 10% de CO₂ até 2037.

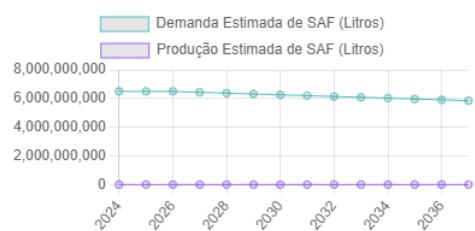


Figura 5.6: Demanda de QAV versus produção de SAF
Fonte: Calculadora de SAF

Em contraste, com base nesses dados mencionados previamente, é possível também avaliar o potencial competitivo do Brasil na produção do SAF. Comparando-se a produção nacional esperada e a produção internacional do combustível renovável (conforme ilustrado na Figura 5.7), o Brasil teria a capacidade de atender à sua demanda interna por SAF e

também de contribuir significativamente com exportações do combustível para o mercado internacional.

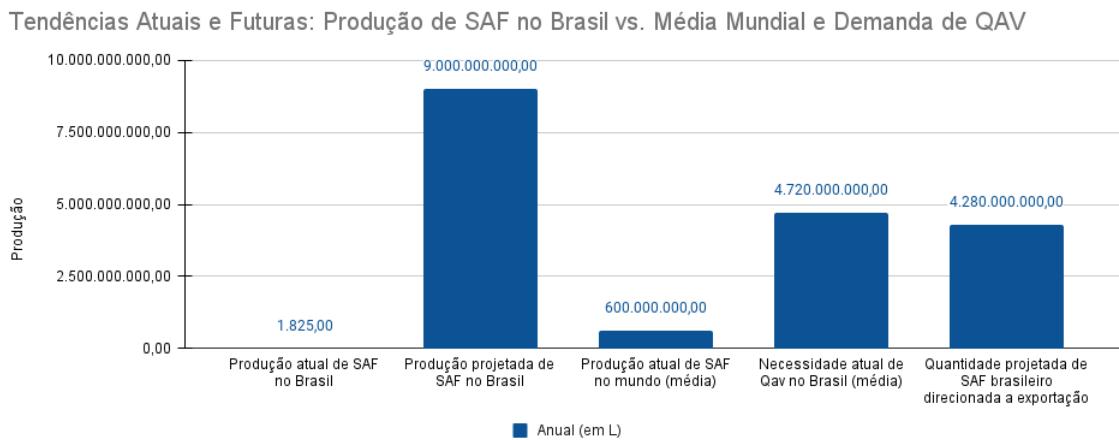


Figura 5.7: Tendências Atuais e Futuras para a Produção de SAF no Brasil versus a Média Mundial e a Demanda de QAV
Fonte: Autoria própria

Com uma projeção de produção de 9 bilhões de litros anuais, o país poderia exportar aproximadamente 4,28 bilhões de litros de SAF. Este volume representa mais de sete vezes a produção mundial atual, destacando o papel estratégico que o Brasil pode desempenhar no fornecimento de SAF.

5.6 Políticas de Incentivo ao SAF: Catalisadores para a Aviação Sustentável

O estudo colaborativo de Wang et al. (2021) revela que, sem intervenção política, as tecnologias de produção de SAF não são lucrativas, necessitando de incentivos que reduzam o custo do SAF de 1,92 dólares por litro (IATA, 2023a) para valores na faixa de 0,07–0,71 dólares por litro. A pesquisa mostra que a troca de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis é de extrema importância para a redução do impacto global causado pelos meios de transporte, porém sem o devido incentivo federal, o sucesso dos projetos que envolvem os SAFs torna-se incerto.

Em um nível global, os incentivos governamentais e regulatórios permitem acelerar as pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias, tornando o SAF mais eficiente e competitivo em preço, principalmente quando comparado aos combustíveis tradicionais. Tais

medidas estimulam a formação de um mercado robusto para o SAF, impulsionando o avanço tecnológico e a sustentabilidade aeronáutica.

Além disso, as políticas de incentivo ao SAF apoiarão a diversificação da matriz energética do transporte aéreo, diminuindo a sua dependência dos combustíveis fósseis e aumentando a segurança energética. Com essas medidas, os governos demonstram liderança na luta contra as mudanças climáticas, ao mesmo tempo que desempenham um papel estratégico na transição global para uma economia de baixo carbono.

Como benefício adicional, nota-se que a adoção do SAF também pode impulsionar a criação de empregos em diversos setores, desde a agricultura para a produção de biomassa até a pesquisa e a manufatura de novos combustíveis.

Vale ressaltar ainda que a consciencia e a demanda social também desempenham um papel fundamental na defesa para a redução das emissões e descarbonização do setor. Atualmente, o conhecimento científico e a demanda social por aeronaves de baixas emissões não são suficientemente fortes, pois a população como um todo não está consciente dos impactos nocivos das emissões da aviação no clima global. Atualmente, a pressão social sinaliza o governo, que então tomará as ações necessárias, depois de confirmar cientificamente o problema (SINGH E SHARMA, 2015).

Capítulo 6

Conclusões

Em conclusão, o Brasil possui um potencial significativo para se tornar um líder global na produção de SAF, mas para que isso se concretize, é necessário um compromisso coletivo para superar os desafios técnicos, econômicos e logísticos. Com políticas adequadas e colaboração entre os setores público e privado, o SAF pode desempenhar um papel fundamental na redução da pegada de carbono da aviação e na promoção de um futuro mais sustentável.

Ademais, políticas e incentivos fiscais bem estruturados, que considerem as dinâmicas de mercado e as metas de descarbonização de longo prazo, serão fundamentais para garantir que a aviação possa competir efetivamente no mercado de combustíveis sustentáveis, sem comprometer seus objetivos ambientais e de sustentabilidade.

Por fim, é possível constatar que a computação e as técnicas de programação oferecem uma ampla gama de ferramentas e técnicas que podem ser aplicadas para estudar e promover o uso de SAFs no Brasil. De modelagens e simulações até a análise de dados e o desenvolvimento de plataformas de compartilhamento de conhecimento, o uso da tecnologia pode ajudar a enfrentar os desafios associados à transição para combustíveis de aviação mais sustentáveis.

Capítulo 7

Levantamento bibliográfico

SIMÕES, Bernardo José Fonseca. The Impact of COVID-19 on the Airline Industry: TAP Air Portugal Pedagogical Case Study. ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, Set. 2023. Disponível em: https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/29915/1/master_bernardo_fonseca_simoes.pdf. Acesso em: 01 Jul. 2024.

NASA. What is the greenhouse effect? Mar. 2024. Disponível em <https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta? Jan. 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/voce-sabe-como-os-gases-de-efeito-estufa-aquecem-o-planeta>. Acesso em: 24 mar. 2024.

ICCT. CO2 emissions from commercial aviation, 2018. 2018. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf. Acesso em: 03 abr. 2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability - Summary for Policymakers. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Climate change 2013: The Physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

NASA. Planes, Shipping Lanes & Automobiles. 30 mar. 2023. Disponível em: <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/planes-shipping-lanes-and-automobiles/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. Relatório Anual do Conselho - 2020. 2020. Disponível em: <https://www.icao.int/annual-report-2020/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE AÉREO. International passenger demand recovery continues but at slower pace. 31 jan. 2024. Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-01-31-02/>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BP GLOBAL. What is sustainable aviation fuel (SAF) and why is it important? Jun. 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/what-is-sustainable-aviation-fuel-saf-and-why-is-it-important.html>. Acesso em: 25 mar. 2024.

ICAO. ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology. 2023. Disponível em: <https://applications.icao.int/icec/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

GLOBAL CARBON PROJECT. Global Carbon Budget 2019 [Conjunto de dados]. 2019. Disponível em: <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>. Acesso em: 08 abr. 2024.

PRUSSI, M. et al. CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006833>. Acesso em: 25 mar. 2024.

AGÊNCIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). Biocombustíveis para aviação: resumo tecnológico. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 25 mar. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Sustainable Aviation Fuel. Abr. 2023. Disponível em: https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable_aviation_fuel.html. Acesso em: 25 mar. 2024.

AIR BP. Jet Fuel. 2020. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/air-bp/aviation-fuel/jet-fuel.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

BRAUN, Matthias; GRIMME, Wolfgang; OESINGMANN, Katrin. Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. *Journal of Air Transport Management*, v. 117, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699724000450>. Acesso em: 15 abr. 2024

ROJAS-MICHAGA, M. F.; MICHAILOS, S.; CARDOZO, E.; AKRAM, M.; HUGHES, K. J.; INGHAM, D.; POURKASHANIAN, M. Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. *Energy Conversion and Management*, v. 292, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423007732>. Acesso em: 17 abr. 2024

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico 2023. Tabela 2.56. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario-estatistico-2023>. Acesso em: 08 maio 2024.

BIODIESELBR. Senai inaugura planta-piloto que vai produzir de SAF a partir de glicerina. 06 set. 2023a. Disponível em: <https://www.biodeselbr.com/noticias/biocombustivel/bioqav/senai-inaugura-planta-piloto-que-vai-produzir-de-saf-a-partir-de-glicerina-> Acesso em: 08 maio 2024.

ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS. Feedstock availability for sustainable aviation fuels in Brazil. 2021. Disponível em: <https://rsb.org/wp-content/uploads/2021/04/RSB-SAF-Feedstock-availability-in-Brazil.pdf>. Acesso em: 08 maio 2024.

WANG, J. et al. Quantitative Policy Analysis for Sustainable Aviation Fuel Production Technologies. *Frontiers in Energy Research*, [s.l.], v. 9, 08 dez. 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.751722/full>. Acesso em: 09 maio 2024.

BIODIESELBR. Exportações de glicerina encerram ao ano em estabilidade. 25 jan. 2023b. Disponível em: <https://www.biodeselbr.com/noticias/usinas/glicerina/exportacoes-de-glicerina-encerram-ao-ano-em-estabilidade-250123>. Acesso em: 09 maio 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Saiba como funciona o abastecimento em dois dos maiores aeroportos do Brasil. 27 jul. 2018. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/saiba-como-funciona-abastecimento-maiores-aeroportos>. Acesso em: 09 maio 2024.

IATA. Sustainable aviation fuel output increases, but volumes still low. [S.l.]: IATA, 1 set. 2023a. Disponível em: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/sustainable-aviation-fuel-output-increases-but-volumes-still-low/>. Acesso em: 09 maio 2024.

ZAPAROLLI, Domingos. Airline industry strives to eliminate its carbon footprint. Revista Pesquisa Fapesp. Jul. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/airline-industry-strives-to-eliminate-its-carbon-footprint/>. Acesso em: 10 maio 2024.

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). 2019. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil. Atualizado em 2024. Recuperado de <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil>. Acesso em: 11 maio 2024.

IATA. SAF Volumes Growing but Still Missing Opportunities. [S.l.]: IATA, 6 dez. 2023b. Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>. Acesso em: 11 maio 2024.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Planta-piloto para produzir combustível sustentável de aviação contribui para descarbonização da economia. [S.l.], 06 set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/09/planta-piloto-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao-contribui-para-descarbonizar-economia>. Acesso em: 12 maio 2024.

LIAZIBRA, Luiz Felipe. Projeto dos "combustíveis do futuro" chega ao Senado. Senado Notícias, [S.l.], 22 mar. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2024/03/22/projeto-dos-combustiveis-do-futuro-chega-ao-senado>

projeto-dos-combustiveis-do-futuro-ja-esta-no-senado. Acesso em: 12 maio 2024.

GRIMME, Wolfgang. The introduction of sustainable aviation fuels—A discussion of challenges, options and alternatives. *Aerospace*, Basel, v. 10, n. 3, p. 218, 25 feb. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/218>. Acesso em: 25 maio 2024.

BNDES. Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. Revista BNDES, n. 56, p. 382, dez. 2021. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22048/1/PR_Biocombustiveis%20de%20Avia%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil_Revista%20BNDES_n.%2056.pdf. Acesso em: 27 maio 2024.

IBP. Boletim dos Combustíveis de Aviação. Fevereiro de 2024. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2024/02/boletim-dos-combustiveis-de-aviacao-i-fevereiro-de-2024.pdf>. Acesso em: 27 maio 2024.

BRASIL. Governo Federal lança Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação. gov.br, 10/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2023/09/governo-federal-lanca-programa-nacional-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao>. Acesso em: 27 maio 2024.

SINGH, Vedant; SHARMA, Somesh Kumar. Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. *European Transport Research Review*, v. 7, n. 2, p. 5, 8 Abr. 2015. Disponível em:

<https://etrr.springeropen.com/articles/10.1007/s12544-015-0160-x>. Acesso em: 27 maio 2024.

VOLVO GROUP. Volvo FH 540 segue líder no mercado brasileiro de caminhões em 2023. Jun. 2023. Disponível em: <https://www.volvogroup.com.br/news-and-media/news/2023/jun/Volvo-FH-540-segue-lider-no-mercado-brasileiro-de-caminhoes-em-2023.html>. Acesso em: 27 maio 2024.

GASOGENIO. Emissões de CO₂ por tipo de combustível. Maio 2023. Disponível em: <https://gasogenio.com.br/>

//gasogenio.com/pt/blog/emissoes-de-co2-por-tipo-de-combustivel/.

Acesso em: 27 maio 2024.

IEA. International Shipping. Jul. 2023. Disponível em:
<https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping>.

Acesso em: 27 maio 2024.

KPMG. Net Zero Readiness Report 2023. Nov. 2023. Disponível em <https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2023/09/net-zero-readiness-report-2023.html>.

Acesso em: 01 jul. 2024.

PETROBRAS. Suprimento de QAV Da Produção e Importação aos Aeroportos. Ago. 2023.
Disponível em https://www2.fab.mil.br/celog/images/workshop/WorkShop_Petrobras.pdf.

Acesso em: 01 jul. 2024.