



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

Pedro Aloy Macedo

O USO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS NA AVIAÇÃO COMERCIAL
BRASILEIRA: FACTIBILIDADE, DESAFIOS E PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES

Rio de Janeiro

2022

Pedro Aloy Macedo

**O USO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS NA AVIAÇÃO COMERCIAL
BRASILEIRA: FACTIBILIDADE, DESAFIOS E PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de curso no curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal Do Rio de Janeiro, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Economia.

Orientador: Prof. Helder Queiroz Pinto Jr.

Rio de Janeiro

2022

PEDRO ALOY MACEDO

O USO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS NA AVIAÇÃO COMERCIAL
BRASILEIRA: FACTIBILIDADE, DESAFIOS E PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Rio de Janeiro, 04 de julho de 2022.

HELDER QUEIROZ PINTO JR. - Presidente
Professor Dr. do Instituto de Economia da UFRJ

WILLIAM ADRIAN CLAVIJO VITTO
Doutor em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento pela UFRJ

MARCELO COLOMER FERRARO
Professor Dr. do Instituto de Economia da UFRJ

Dedico esse trabalho à minha família e amigos
que me acompanharam ao longo destes últimos anos de
estudos e trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores do curso de graduação em Ciências Econômicas da UFRJ, que fizeram parte de importante da minha formação enquanto profissional.

Quero também agradecer aos meus amigos e colegas do curso de graduação que estiveram ao meu lado durante a jornada do curso. Ademais, agradeço aos meus demais amigos que me acompanham desde a infância e tanto me apoiam nos meus projetos ao longo da vida.

Por fim, agradeço à minha família por me prover um lar e me deram todo o tipo de apoio para a minha formação, não só enquanto um aluno e profissional, mas também como um cidadão.

RESUMO

Este trabalho possui como objetivo discutir os principais desafios inerentes à implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) na indústria de aviação comercial brasileira. Cinco áreas principais foram levantadas ao longo deste estudo para que houvesse um melhor agrupamento destes desafios. Investigamos, primeiramente, quais são os desafios principais a serem vencidos em cada uma dessas áreas e onde estão os principais bloqueios no caminho para a implementação dos SAF a nível mundial. A partir da compreensão destes desafios, buscamos elucidar qual a situação do caso brasileiro sobre a questão do uso dos SAF na indústria local, assim como seus principais obstáculos dentro das cinco áreas destacadas. Este ensaio revela que há uma pluralidade de desafios no panorama mundial, porém que eles estão principalmente atrelados à disponibilidade de matéria-prima, técnicas de refino e certificação dos SAF. Em particular, no caso brasileiro, observam-se desafios relacionados à implementação dos novos combustíveis que estão principalmente ligados à ainda ausência de produção nacional, assim como em outras questões secundárias a serem delineadas ao longo deste trabalho.

Palavras-chave: Economia da inovação; Economia da energia; Sustentabilidade; Combustíveis Sustentáveis de Aviação; SAF

ABSTRACT

This paper aims to discuss the main challenges inherent in the implementation of sustainable aviation fuels (SAF) in the Brazilian commercial aviation industry. Five main areas were raised throughout this study in order to better group these challenges. We first investigated what are the main challenges to be overcome in each of these areas and where are the main blockages on the path to implementation of SAF worldwide. From the understanding of these challenges, we seek to elucidate what the situation is in the Brazilian case on the issue of the use of SAF in the local industry, as well as its main obstacles within the five areas highlighted. This essay reveals that there is a plurality of challenges in the global scenario, but that they are mainly related to the availability of raw material, refining techniques and certification of SAF. In particular, in the Brazilian case, challenges related to the implementation of the new fuels are observed that are mainly linked to the still absence of national production, as well as in other secondary issues to be outlined throughout this work.

Keywords: Innovation economics; Energy economics; Sustainability; Sustainable Aviation Fuels; SAF.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Emissões de CO₂ ao longo da cadeia de valor do consumo do SAF..... **Erro! Indicador não definido.**33
- Figura 2 – Visão geral da logística de distribuição de combustíveis no Brasil**Erro! Indicador não definido.**50
- Figura 3 - Regulamentação da ASTM D4054 para a certificação de combustíveis.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Prós e contras das cada tecnologia de refino de SAF para o Brasil.....	47
Tabela 2 - Rotas de conversão e porcentagem máxima de mistura.....	52
Tabela 3 - Quadro-Síntese de fatores determinantes e Barreiras.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEAR – Associação Brasileira de Empresas Aéreas
ANP – Agência Nacional do Petróleo
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
ATJ – *Alcohol to Jet*
BP – *British Petroleum*
BSB – Aeroporto Internacional de Brasília
CAPEX – *Capital Expenditure*
CO – Fórmula molecular do monóxido de carbono
CO₂ – Fórmula molecular do gás dióxido de carbono
DSHC – *Direct Sugar to Hydrocarbon*
EASA – *European Aviation Safety Agency*
FP – *Fast Pyrolysis*
GEE – Gases do Efeito Estufa
GFT – Gaseificação e Fischer-Tropsch
H₂ – Fórmula molecular do hidrogênio (em forma estável)
HEFA – *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*
IATA – *International Air Transport Association*
ICAO – *International Civil Aviation Authority*
ICCT – *International Council on Clean Transportation*
OEM – *Other Equipment Manufacturer*
OPEX – *Operational Expenditure*
PtL – *Power-to-Liquids*
SAF – *Sustainable Aviation Fuels*
UCO – *Used Cooking Oil*

SUMÁRIO

1	Introducao	21
1.1	Objetivos.....	24
1.2	Metodologia e estrutura do trabalho	25
2	Objetivos da indústria no longo prazo e a importância dos SAF	26
2.1	A Escala dos SAF hoje	30
3	Características técnico-economicas dos SAF	32
4	Desafios para o uso dos SAF	35
4.1	Matéria-prima	35
4.1.1	O caso geral das matérias-primas disponíveis para o SAF.....	35
4.1.1.1	Resíduos de gorduras e óleos.....	36
4.1.1.2	Resíduos lignocelulósicos.....	37
4.1.1.3	Plantas de cobertura de solo (ou em inglês, cover crops).....	39
4.1.1.4	Eletro combustíveis.....	40
4.1.1.5	Gases de combustão industriais	40
4.1.2	O caso brasileiro	41
4.1.2.1	Políticas de tratamento de dejetos.....	41
4.1.2.2	A questão logística.....	42
4.1.2.3	Uso do solo	43
4.2	Técnicas de refino.....	43
4.2.1	O refino dos combustíveis <i>drop-in</i>	44
4.3	Infraestrutura e Logística.....	48
4.3.1	Infraestrutura e logística de combustíveis de aviação no Brasil.....	48
4.4	Controle de qualidade e marco regulatório.....	51
4.4.1	Condições regulatórias e institucionais no Brasil.....	55
4.5	A taxaço sobre combustível: um desafio adicional no Brasil?	56
4.5.1	O caso Europeu: um incentivo para o combustível verde através de taxaço	57
5	Fatores Determinantes e Barreiras à expansáo dos SAF no Brasil: uma síntese .	60
6	Considerações finais	66
	Referências	68

(Página intencionalmente deixada em branco)

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria aeronáutica mundial vem sendo uma das que mais sofre pressão para a redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Além das acusações mais recentes relacionando o ambiente confinado à transmissão de vírus e doenças, jatos modernos vêm sendo apontados muitas vezes como um dos grandes vilões na deterioração do clima, aquecimento global e degradação ambiental.

Conseqüentemente, reações por parte de governos, veículos de comunicação e, principalmente, por parte dos próprios consumidores do serviço podem ser observadas nos últimos anos. Reações essas que incluem desde novas práticas estratégicas – como por exemplo o anúncio do fim das operações de voos domésticos pela aérea francesa *Air France* para dar lugar a modais mais sustentáveis de transporte nestes trechos – até o surgimento de fenômenos sociais um tanto curiosos, como o *flightshaming* – termo do inglês que caracteriza a “condenação” daqueles que utilizam o transporte aéreo, dada a sua insustentabilidade ambiental.

Por outro lado, o que é muito conhecido pelos agentes da própria indústria, mas que pode ser relativamente pouco intuitivo para o público amplo é o alto e volátil custo dos combustíveis fósseis e seu peso na distribuição de despesas de uma companhia aérea comercial. Durante o ano de 2012, quando o mercado internacional via uma alta no preço do barril de petróleo, linhas aéreas tiveram em média aproximadamente 32% de seus custos atrelados ao querosene de aviação. Em 2020, ano de baixa no valor do óleo, esta relação ficou na casa dos 16%, o que mostra a exposição do setor de aviação comercial à commodity que serve de matéria prima ao seu combustível e minimiza os efeitos da qualidade do management de uma empresa aérea, por melhor que seja (STATISTA, 2022). Isso tudo sem mencionar o fato de as despesas com combustíveis – assim como diversas outras categorias de custos no mercado de aviação – serem praticadas em dólares americanos, expondo ainda mais o setor de países como o Brasil a oscilações significativas de rentabilidade, dada a volatilidade cambial.

Diante desta situação, os grandes operadores de aeronaves comerciais mundo a fora se veem numa luta constante para se livrar da dependência do combustível fóssil, insustentável, caro e poluente. Ademais, mesmo que não fossem suficientes uma suposta consciência ambiental e a pressão de instituições governamentais, mídia e do público em geral, um ingrediente um tanto “salgado” já bastaria para tornar a busca por um combustível alternativo uma prioridade por parte das linhas aéreas: a volatilidade do preço do barril do petróleo.

Neste sentido, pergunta-se: também não é de interesse da própria indústria buscar ganhos de eficiência energética e reduzir o consumo do combustível fóssil?

Claro que devemos reconhecer que a atividade aeronáutica é grande contribuidora para as emissões de CO₂, já que, sem aeronaves comerciais, elas seriam aproximadamente 2% menores. Ademais, mesmo isento de qualquer estatística, pode-se intuitivamente deduzir que não é baixo o impacto na atmosfera de um número incontável de motores de aviação de, em média, 70 mil libras de empuxo trabalhando simultaneamente queimando toneladas de combustível fóssil. Por outro lado, avanços tecnológicos já vêm permitindo a indústria da aviação comercial – inclusive por uma motivação econômica – a se beneficiar de equipamentos mais eficientes.

Para se ter uma noção, houve entre o ano de 1970 e o ano de 2020, uma queda em aproximadamente 41% no consumo médio de combustível de aeronaves comerciais de transporte regular ou o equivalente a uma taxa de crescimento anual composta de aproximadamente -1% ao ano (ZHENG e RUTHERFORD, 2020). Há de se reconhecer, por outro lado, que o *boom* da demanda por serviço aéreo nos últimos sessenta anos mascarou e amenizou na prática a níveis agregados as consequências ambientais positivas de uma mudança tecnológica como esta. Ainda assim, a níveis marginais, há uma diminuição significativa no consumo de combustível fóssil por aeronave.

Por outro lado, seja qual forem as reais motivações, ainda há muito a se fazer na busca por uma aviação verdadeiramente sustentável, em termos tanto ambientais quanto econômicos. Dado que soluções como aeronaves movidas a hidrogênio, eletricidade e / ou energia solar se mostram ainda em estágio preliminar de pesquisa e desenvolvimento, e bastante distantes da realidade e escala operacional da aviação do século XXI, o mundo se pergunta: qual seria uma saída realmente sustentável para uma das indústrias das quais mais dependemos?

É neste contexto que emerge o debate sobre a viabilidade técnico-econômica e ambiental de soluções tecnológicas que poderiam aliviar a dependência do setor com relação ao petróleo. Os denominados combustíveis sustentáveis de aviação – *SUSTAINABLE AVIATION FUELS* ou ‘*SAF*’ surgem, assim, como alternativa para reduzir o consumo de dos combustíveis fósseis tradicionais: querosene e gasolina de aviação.

Segundo a British Petroleum BP, os SAF são definidos como aqueles produzidos a partir de matérias-primas sustentáveis, incluindo entre outras, culturas energéticas cultivadas em terras marginais, resíduos agrícolas, florestais ou urbanos, assim como outras matérias-primas novas, como biomassa microbiana. Adicionalmente, os SAF muitas vezes não se

constituem num combustível completamente novo, pois em muitos casos podem se assemelhar, em termos de sua composição química àquela do querosene de aviação tradicional, aos chamados “Jet-A”, possuindo, porém, uma queima muito mais sustentável e limpa, além de não depender da disponibilidade de uma *commodity* (BRITISH PETROLEUM, 2022).

Este tipo de combustível alternativo similar ao tradicional é chamado de “*drop-in*”, termo do inglês que implica a ideia de pronta-utilização, sem necessidade alterar os equipamentos (no caso, as aeronaves) que tradicionalmente usam o combustível fóssil. Em outras palavras, os SAF são quase como um *prêt-à-porter* dos combustíveis, e podem ser utilizados pelos mesmos veículos ou máquinas que utilizam o combustível tradicional, sem exigir grandes adequações nos seus equipamentos. Neste trabalho, é aos SAF tipo “*drop-in*” que daremos foco nesta análise, sem deixar de mencionar brevemente os desafios adicionais dos combustíveis alternativos tipo não *drop-in*.

Apesar de mais avançados em seu desenvolvimento do que outras soluções alternativas ao querosene de aviação, os combustíveis sustentáveis de aviação ainda se encontram em estágio elementar de utilização na indústria da aviação comercial. Dado que, em linhas gerais, a tecnologia já existe e se encontra disponível para a produção do SAF, o que falta, então, para que este novo combustível possa progressivamente ser usado nas aeronaves que carregam centenas de passageiros e volumes de carga todos os dias?

Na realidade são diversas as barreiras que ainda se encontram impostas a uma utilização mais abrangente dos combustíveis alternativos ao querosene. Para atender aos objetivos e escopo deste estudo, caracterizaremos os desafios ao uso do SAF em três esferas principais: institucional, produtiva, distributiva e operacional, cujas definições serão melhor elucidadas mais adiante.

Além do quadro geral apresentado acima, será examinada brevemente também a situação do caso brasileiro e os mais recentes projetos das partes interessadas locais na redução de emissões de CO₂ no ciclo de vida do combustível de aviação. Espera-se que os desafios inerentes ao Brasil na implementação dos SAF no mercado local sejam mais elevados do que os observados em outros países, especialmente os considerados mais “desenvolvidos”, como Reino Unido, Estados Unidos, Canada, Alemanha, França, entre outros. Buscaremos, por isso, mapear a situação a nível nacional e oferecer elementos de resposta à seguinte pergunta: o quão longe está o Brasil na utilização de combustíveis sustentáveis no mercado local de aviação comercial e quais os principais desafios a partir de agora?

1.1 OBJETIVOS

Como destacado anteriormente, o objetivo geral deste trabalho é mapear a situação da utilização de combustíveis sustentáveis de aviação (“SAF”) no Brasil, enquanto uma alternativa ao querosene de aviação, consumido comumente por aeronaves comerciais.

Abaixo se esclarecem os seguintes objetivos específicos deste ensaio:

- a) Identificar, de forma generalizada, os principais desafios para a produção, distribuição e utilização dos SAF, como substituto do querosene de aviação, em termos da cadeia de fornecimento (“*supply chain*”) desde a produção até a chegada nos tanques de aeronaves
- b) Encontrar e salientar desafios particulares ao caso brasileiro
- c) Sugerir de forma superficial o papel de partes interessadas, como agências reguladoras, distribuidoras de combustível e linhas aéreas comerciais na promoção da viabilidade do uso do SAF no Brasil

Aos dois primeiros objetivos específicos daremos o principal foco durante o desenvolvimento deste artigo, enquanto que o último será abordado de forma geral, como um pontapé inicial para uma discussão a ser seguida e estudada em passos futuros da pesquisa acadêmica acerca da temática do uso dos SAF.

1.2 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo será abordado através de uma pesquisa de abordagem exploratória, em que se buscará mapear os diversos desafios acerca do ‘SAF’ – *Sustainable Aviation Fuel* no mercado de aviação comercial brasileira enquanto substituto do Querosene de Aviação utilizado hoje na indústria.

Os procedimentos no tratamento desta pesquisa se darão através de pesquisa bibliográfica e documental, sendo a bibliografia completa relacionada ao final deste ensaio. Para a execução deste estudo, será feita a leitura de autores como CORTEZ, SOARES, PINTO JR, MARTINS e CHIARAMONTI, entre outros pensadores que contribuem para esta temática.

Partindo das contribuições dos autores supracitados, será feito um mapeamento dos principais conceitos acerca do SAF, para que seja então complementada a pesquisa acerca dos desafios à implementação deste na cadeia de valor e logística de abastecimento de aeronaves comerciais. Caracteriza-se, assim, um teor qualitativo para esta pesquisa, servindo dados quantitativos pontuais e gerais apenas como um suporte à complementação de ideias e conceitos.

Assim, esta monografia será composta da seguinte maneira. No capítulo seguinte, serão examinados os objetivos gerais da indústria para se entender o motivo de os SAF terem se tornado um tema de tamanha relevância atualmente. Concluído este capítulo, destacaremos as características técnico-econômicas do SAF. Por fim, passaremos à parte central deste trabalho, em que se buscará dar um panorama geral sobre os desafios à implementação e uso dos SAF no mundo, contrastando este panorama mundial com o caso brasileiro. Partiremos em seguida para a conclusão desta monografia e as considerações finais.

2 OBJETIVOS DA INDÚSTRIA NO LONGO PRAZO E A IMPORTÂNCIA DO SAF

Segundo CORTEZ *et al.* (2014), a indústria mundial da aviação mundial vem demonstrando um forte desejo de colaborar mais ativamente para mitigar as emissões de gases do efeito estufa, os chamados GEE. Em uma esfera prática, isso se traduz num esforço para a redução das emissões de CO₂. No ano de publicação do estudo citado acima, 2014, os objetivos da indústria da aviação no aspecto ambiental eram o de se atingir a neutralidade de carbono até o ano de 2020, o que pode ser considerado como uma primeira fase do processo de descarbonização.

Em um segundo momento, vê-se o surgimento de um novo objetivo para uma nova fase, planejada para iniciar a partir do ano de 2020: a redução de 50% nas emissões de CO₂ em relação aos níveis de 2005 até 2050, o que, de acordo com CORTEZ *et al.* (2014) é caracterizada como a segunda fase.

Em primeiro lugar, devemos reconhecer que o objetivo da primeira fase citada acima não foram alcançados ou pelo menos não na escala e amplitude suficientes para o tamanho da indústria da aviação comercial moderna. Não se podem, por exemplo, observar países cujas operações aéreas em escala nacional que possuam suas malhas completamente neutras de carbono. O mesmo vale para o âmbito de companhias aéreas, já que não há ainda uma que possua sua malha completamente zerada em termos de emissões de CO₂. Este atraso com o cumprimento dos objetivos de neutralidade de carbono até o fim de 2020 podem em muito estar atrelados à pandemia da COVID-19 que durante aquele ano representou uma ruptura inestimável nas operações de linhas aéreas comerciais, tornando como prioridade principal de gerentes e diretores garantir a sobrevivência financeira de empresas de aviação mundo a fora.

Por outro lado, devemos reconhecer que iniciativas têm sido levadas a cabo para que haja um cumprimento com o objetivo da segunda fase: redução a níveis líquidos das emissões de CO₂ em 50% até 2050 em relação a 2005.

Segundo CORTEZ *et al.* (2014), podemos dividir os fatores de transformação da indústria de aviação em três categorias diferentes: estrutural (ou de engenharia), operacional e energética. Enumeremos abaixo alguns exemplos para cada uma dessas categorias:

A) Estrutural (ou de engenharia)

A esta categoria pertencem os fatores estritamente técnicos e de engenharia, relacionados a estruturas de aeronaves, equipamentos e novas tecnologias

empregadas nos aviões ou em seus componentes que diminuem o consumo de combustível. São alguns exemplos:

- I. Motores mais eficientes (com melhor razão de *bypass*),
- II. Aeronaves de estruturas mais leves e / ou material compósito em substituição ao alumínio tradicional
- III. Uso de componentes que contribuem para uma melhor aerodinâmica, como por exemplo os chamados *winglets* nas pontas das asas

B) Operacional

Na categoria operacional, basicamente temos padrões operacionais revisados e atualizados, que basicamente tornam mais eficiente o consumo de combustível em cada trecho de voo operador por aeronaves comerciais. São exemplos destes procedimentos ou atualizações:

- I. Otimizações e redesenho do espaço aéreo
- II. Novos procedimentos de descida desde a altitude de cruzeiro diretamente até a aproximação final no aeroporto de chegada
- III. Equipamentos de precisão de aproximação, diminuindo no geral o número de voos alternados por tempo fechado

C) Energética

Nesta categoria encontram-se as soluções novas atreladas a novos combustíveis sendo utilizados, ou seja, uma novas substancias em uso como matriz energética para viabilizar o voo.

- I. Soluções energéticas menos agressivas ao meio ambiente, como aviões movidos a energia solar, hidrogênio, álcool ou outras formas de combustível (solução ainda em estágio inicial de desenvolvimento)
- II. Surgimento e adoção dos combustíveis sustentáveis de aviação “SAF” (*drop-in* ou não)

Sobre a primeira categoria (Estrutural), que abrange melhorias de engenharia nas aeronaves para ganhos de eficiência, podemos dizer que grandes passos vêm sendo dados constantemente desde o início da aviação no começo do século XX. Isso de uma forma gradual contribuiu, claro, para aeronaves menos consumidoras de combustível, mas, por outro

lado, já se prova insuficiente para contrabalancear o crescimento do setor de transporte aéreo ao longo desses últimos 100 anos.

Em segunda instância, referindo-se esta às melhorias operacionais, estas são pontuais e não possuem um tão grande impacto no consumo de combustível em geral. Fora isso, os efeitos e benefícios são muito mais ligados à eficiência e performance operacionais (aquelas atreladas a pontualidade de voos, interrupções, atendimento ao passageiro, segurança, etc.) do que efetivamente ambiental, apesar de gerar alguns benefícios identificáveis na redução de consumo de combustível e, conseqüentemente, de emissões de CO₂ (CORTEZ *et al.*, 2014).

Dessa maneira, nos resta a terceira esfera como alternativa para uma virada de chave em termos do tipo de matriz energética que é consumida para viabilizar o transporte aéreo. Em termos de potencial, efeito e alcance, é a categoria de inovações que hoje é vista como a mais efetiva a ser implementada nas próximas décadas. De acordo com a Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*), o CO₂ carbono originado de combustíveis fósseis é responsável por aproximadamente 65% da emissão de gases de efeito estufa no mundo. Analogamente, alterar o método de fabricação e utilização de matéria-prima para caminhos sustentáveis na fabricação do combustível permitirá por si uma redução significativa na emissão de CO₂, levando a uma redução de gases danosos ao meio ambiente. Segundo a British Petroleum, os SAF permitem uma redução de até 80% nas emissões de carbono ao longo do ciclo de vida do combustível, quando comparados às formas de combustíveis de aviação tradicionais (BRITISH PETROLEUM, 2022).

Soluções energéticas secundárias como, por exemplo, uso de hidrogênio, energia solar ou bioetanol encontram-se ainda em estágio de desenvolvimento, como citado anteriormente. É plausível que, à medida que o arcabouço tecnológico avança, essas soluções sejam mais e mais factíveis em termos de sua empregabilidade operacional com o decorrer das próximas décadas. Por outro lado, para efeitos mais imediatos, ainda não são consideradas alternativas viáveis ao querosene de aviação tradicional, uma vez que não possuem ainda a praticidade e empregabilidade à escala que a aviação mundial possui em 2022.

Por um lado, temos, claro, pesquisas em desenvolvimento e um grande interesse em alavancar o uso de combustíveis alternativos que não se enquadram dentro da categoria dos SAF, como colocam NASLAUSKI e HENKES (2021).

“A energia solar pode ser uma opção e testes já estão sendo feitos em aeronaves abastecidas com energia solar e com células de hidrogênio como fonte de suprimento de energia como demonstrado(...) O uso da célula de hidrogênio com pesquisas em

andamento poderá revolucionar a aviação com o uso do avião elétrico. De acordo com o avanço das pesquisas, tal energia poderá ser armazenada congelada e utilizada quando necessário, de forma a dar propulsão a motores a jato e diminuir sensivelmente as emissões de CO₂. (...) Em relação a produção de biocombustível, pode-se avaliar de que apenas 10% do consumo de Jet Fuel for substituído por biocombustível, haveria uma demanda de 27,9 bilhões de litros, o equivalente à produção brasileira de etanol em 2008/09.” (NASLAUSKI; HENKES, 2021, p. 20)

Como pode-se ver a partir do trecho citado acima, é evidente que há o interesse e pesquisa em andamento sobre o desenvolvimento de fontes alternativas de energia para a aviação que não se enquadram dentro da categoria dos SAF. Por outro lado, há ainda um longo caminho a ser percorrido para que este interesse se torne factível a nível e escala da aviação comercial.

“A Airbus está atualmente avaliando três conceitos para aviões movidos a hidrogénio, a fim de entender se estes poderão ser amadurecidos em produtos futuros viáveis, esperando que as suas primeiras aeronaves comerciais com emissões zero possam entrar em serviço até 2035(...). Dado que os aviões comerciais têm uma vida útil típica de 30 anos e que ainda serão necessários anos de desenvolvimento para as novas aeronaves a hidrogénio, o impacto na redução das emissões de gases com efeito de estufa será lento.” (SYNHELION, 2022)

A Synhelion coloca ainda que a situação é similar para outras formas alternativas de combustível que não os SAF, como aeronaves movidas a energia solar ou a baterias elétricas.

Dessa forma, fica evidente a grande importância que têm os combustíveis sustentáveis de aviação no SAF para a virada de chave da indústria da aviação na direção de uma pegada sustentável e amigável a aspectos ambientais. Ao contrário de outras fontes de energia, a tecnologia para produção destes novos combustíveis existe e não é de certa forma extremamente complexa e já se encontra em uso por diversas companhias aéreas mundo afora. Além disso, possuem como benefício a sua aplicabilidade aos tanques e sistemas de aeronaves tradicionais (para os casos de combustíveis *drop-in*) dada a sua similaridade química ao querosene tradicional de aviação, porém são capazes de reduzir em aproximadamente até 80%² as emissões de CO₂ em seu ciclo de produção e consumo, como será elucidado no capítulo 3 deste estudo.

Mesmo com alguns desenvolvimentos ainda pendentes e um caminho a ser percorrido para a implementação do uso verdadeiramente amplo dos SAF, podemos perceber que esta

sim é uma solução que combina uma boa aplicabilidade e relativa praticidade para adoção como matriz energética, com impactos significativos de redução de emissões dos gases efeito estufa. Isto fez a indústria global cada vez mais enxergar os novos combustíveis sustentáveis como um pivô para o alcance dos objetivos a longo prazo.

2.1 A ESCALA DOS SAF HOJE

Uma vez que elucidamos a importância fundamental dos SAF, destacaremos brevemente para fins de contextualização o quanto de combustíveis sustentáveis de aviação é utilizado hoje mundo afora.

Segundo FRAGOUL (2022), em 2021 foram utilizados 100 milhões de litros de SAF por aeronaves comerciais em 2021. Por outro lado, a demanda mundial por combustíveis de aviação naquele ano foi de aproximadamente 60 bilhões de galões americanos, ou aproximadamente 227 bilhões de litros (STATISTA, 2022). Assim, podemos ver que de longe a utilização dos SAF ainda se encontra muito incipiente.

FRAGOUL (2022) ainda adiciona que a IATA estima ainda que 14 bilhões de litros de SAF já foram encomendados por companhias aéreas. No mais, a Associação prevê ainda que, em 2025, 7,9 bilhões de litros de SAF serão produzidos no mundo, o que corresponderá a aproximadamente 2% da demanda por combustíveis utilizados na aviação comercial mundial. Por outro lado, também é esperado que 449 bilhões de litros de SAF sejam produzidos em 2050, o que já corresponderia a 65% da demanda da indústria por combustíveis, tudo isso, claro, assumindo que suporte e incentivos governamentais apropriados serão providos. A IATA coloca ainda, sem citar números concretos, que os países em que há produção mais intensa de SAF são os Estados Unidos e Canadá, assim como países europeus como França, Alemanha e Reino Unido (FRAGOUL, 2022).

Dessa forma, fica evidente que, mesmo que haja eventualmente outros fatores pontuais suprimindo a demanda, como preço, por exemplo, a expectativa de longo prazo é de que a procura pelos SAF por parte de seus consumidores finais (companhias aéreas) cresça ao longo do tempo.

Dado este pequeno destaque ao caso mundial, nos voltemos agora ao caso brasileiro. Em se tratando de Brasil, deve-se salientar que é o primeiro país latino americano a colocar à frente um plano concreto de produção de SAF. Apesar de se tratar de uma iniciativa de investidores brasileiros, é planejado que a primeira planta de produção de SAF da região seja instalada na fronteira do país com o Paraguai. Por outro lado, não há atualmente produção

local de combustíveis sustentáveis para aviação e toda o combustível que é utilizado é importado, como ocorre nos demais países latino americanos (ARGUS, 2022). Por outro lado, mesmo sendo um dos expoentes regionais a dar os primeiros passos na construção de uma planta de SAF, há de se indagar o que falta ainda para uma difusão mais ampla dos novos combustíveis de aviação em um país como o Brasil, que possui histórica e geograficamente uma matriz energética e uma ampla gama de recursos naturais.

Dessa forma, retomamos então a questão central desta monografia. Se existe uma projeção de crescimento da demanda a longo prazo no cenário mundial, cabe a nós investigar o que falta para haver uma ampliação da produção dos SAF. Em outras palavras, onde estão os desafios principais para a ampla produção e utilização dos SAF na aviação comercial mundial e brasileira?

3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICO-ECONÔMICAS DO SAF

Ultimamente, inúmeros tipos e categorias de combustíveis de caráter sustentável vêm surgindo. Isto não é uma proeza do ramo da aviação, mas sim de qualquer um dentro da indústria dos transportes. Como exemplo temos desde aquelas mais conhecidas pelo público amplo, a exemplo dos novos automóveis movidos a eletricidade.

Fato é que é fácil se confundir com os diversos tipos de combustíveis sustentáveis que hoje existem, sejam eles recicláveis, alternativos, sustentáveis, biodegradáveis ou atrelados a tantos outros conceitos que vêm surgindo com os debates climáticos cada vez mais acalorados desde a virada do milênio. Assim sendo, nos dedicaremos aqui a definir brevemente o que são os combustíveis sustentáveis de aviação.

Para tal, partiremos de um princípio bem intuitivo. Devemos entender os SAF como uma categoria de combustíveis que podem ser vistos como um *gamechanger* tanto para a indústria da aviação quanto para o planeta devido a uma característica primordial: sua sustentabilidade. Podemos dizer isso uma vez que pode ser derivado de praticamente qualquer tipo de material, incluindo, por exemplo, plantas – em especial as plantas halófitas que crescem debaixo d'água –, óleo de cozinha usado ou lixo urbano incluindo partes de árvores podadas, roupas jogadas fora ou até plásticos recicláveis.

De forma análoga, devemos entender, por outro lado, que os SAF não devem ser derivados de substâncias de escassez ambiental, como água, e sua fabricação não deve incluir procedimentos que inflijam a lógica da sustentabilidade, como desmatamento, por exemplo.

Dessa forma, chegou-se a um dos benefícios primordiais do SAF, ou seja, a sua capacidade de diminuir as emissões de CO₂ em aproximadamente até 80%, em termos de emissões durante o ciclo de vida (*lifecycle emissions*). Para ilustrar como isso se dá na prática, observemos a figura 1, ilustrada abaixo (BRITISH PETROLEUM, 2022).

A dinâmica e consume de emissões de CO₂ dos SAFs

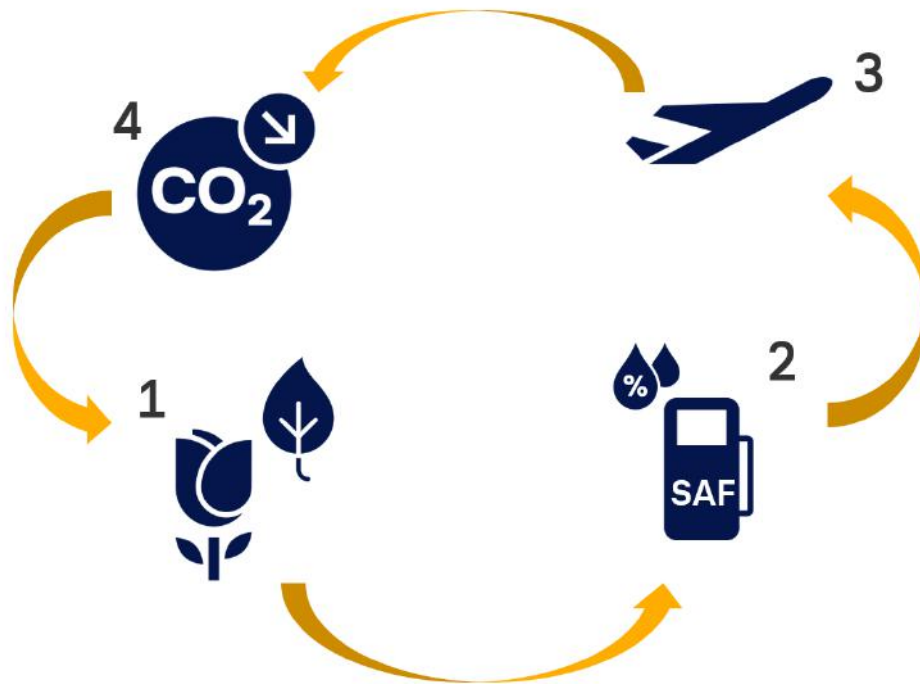


Figura 1: Emissões de CO₂ ao longo da cadeia de valor do consumo do SAF

Fonte: CORTEZ, Luís *et al.* (2014)

Explicaremos a seguir brevemente as intuições do esquema representado na figura 1.

Seguindo as enumerações dos estágios ilustrados acima, iniciaremos pelo de número 1. Nele ocorre a transformação dos resíduos como plantas em combustível sustentável de aviação (estágio 2). A seguir, o combustível é abastecido e queimado por aeronaves comercial, o que gera a emissão de gases na atmosfera, incluindo CO₂. (estágios 3 e 4). No entanto, este CO₂ que foi gerado é consumido novamente pelas plantas que futuramente serão transformadas em SAF.

Apesar de estas plantas que ao iniciar novamente o ciclo não consomem todo o gás carbônico gerado no estágio 4, uma boa parte é consumida. Como consequência, temos os anteriormente referidos 80% (aproximadamente) de redução de consumo. Em outras palavras, o uso do SAF coloca a própria operação das aeronaves como um pivô para se atingir a neutralidade de carbono com uma certa facilidade (CORTEZ *et al.*, 2014).

Para os casos dos SAF *drop-in*, aqueles aos quais daremos foco neste estudo, tem-se ainda o benefício de que estes possuem uma estrutura molecular muito parecida com aquela

do querosene de aviação tradicional. Isto significa que tanques de aeronaves e sistemas de combustíveis não precisam sofrer adaptações para que o combustível sustentável de aviação venha a ser utilizado. Além disso, tem-se ainda que os SAF podem ser misturados com o querosene tradicional, gerando uma espécie de combustível híbrido, à imagem da gasolina automotiva vendida no Brasil com volumes de etanol, também sem a necessidade de modificações nas aeronaves ou em seus motores.

Adicionalmente os SAF *drop-in* também podem aproveitar de estruturas de armazenamento, transporte e distribuição similares às daquelas dos combustíveis tradicionais. Sobre este tema e alguns empecilhos atrelados à distribuição de combustíveis sustentáveis discutiremos mais a fundo ao longo deste estudo.

Em termos de escala, por outro lado, há ainda muito o que se fazer na implementação do SAF em um aspecto amplo, o que possui diversas implicações para as muitas partes interessadas nesta relação. No entanto, diversos desafios ainda estão por vir no decorrer deste processo, desafios estes que serão objeto deste estudo.

4 DESAFIOS PARA O USO DO SAF

Agora que definimos o que são os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), podemos passar a tratar dos diversos requisitos e desafios que eles implicam. Em outras palavras, buscaremos responder neste capítulo quais as premissas subjacentes que devem estar bem colocadas para que a produção, distribuição e comercialização dos SAF possa acontecer, assim como colocaremos em contraste os principais desafios do cenário internacional e do cenário brasileiro. Para este ensaio, faremos uma divisão dessas premissas e desafios em cinco categorias, que detalharemos também nesta seção: Matéria-prima, Técnicas de refino, Infraestrutura e logística, Controle de qualidade e Marco regulatório, e, por fim, Taxação sobre combustível.

4.1 MATÉRIA-PRIMA

Em primeira instância, delinearemos as opções de matéria-prima mais comuns para a fabricação de uso de SAF. Como elucidado anteriormente, são diversas as opções de matéria-prima para a produção de SAF. Estas opções incluem plantas, óleo de cozinha usado, lixo urbano, entre outras. Fato é: a matéria-prima deve possuir um método de produção que tenha o caráter sustentável para que todo o intuito da produção destes novos combustíveis alternativos não seja comprometido. Isso por si só já se define como um dos grandes limitadores da produção de matéria-prima para os SAF, já que envolver no processo produtivo aspectos como utilização de grandes quantidades de água, destruição de florestas ou extração mineral já tiraria todo o caráter sustentável destes novos combustíveis.

4.1.1 O caso geral das matérias-primas disponíveis para o SAF

Passemos agora a delinear mais concretamente quais as opções de matéria-prima para a fabricação dos SAF. Durante esta análise, nos basearemos no *working paper* de MALLEY, PAVLENKO e SEARLE, publicado pelo *International Council on Clean Transportation* (ICCT) em marco de 2021.

Segundo MALLEY *et al.* (2021), são cinco os principais grupos de matérias-primas que podem ser empregados amplamente na produção dos SAF:

- 1) Resíduos de gorduras e óleos

- 2) Resíduos lignocelulósicos
- 3) Plantas de cobertura de solo (ou em inglês *cover crops*)
- 4) Eletrocombustíveis
- 5) Gases de combustão industriais

Passaremos em seguida a esclarecer brevemente quais matérias-primas mais especificamente estão incluídas em cada um desses grupos, além de buscar mapear onde estão os principais desafios na obtenção das substâncias de cada um dos grupos.

4.1.1.1 Resíduos de gorduras e óleos

Óleos usados, incluindo, por exemplo, óleos de cozinha descartados, gorduras animais ou outros ácidos viabilizam, segundo MALLEY, *et al.* (2021) a produção mais fácil e economicamente acessível à produção de SAF, dado arcabouço tecnológico atual, já que os ésteres hidrogenados e os combustíveis de ácidos gordos (também chamados de HEFA) são as alternativas mais comumente utilizadas. Em 2018, a União Europeia possuía uma capacidade produtiva de aproximadamente de 360.000 toneladas (PADELLA, O'CONNELL, & PRUSSI, 2019) destes tipos de combustíveis sustentáveis. Além disso, os combustíveis HEFA são produzidos a partir da hidrogenação de resíduos e óleos vegetais e pode ser misturada até 50% em volume com querosene à base de petróleo (PAVLENKO, 2019).

Como elucidado anteriormente, PAVLENKO (2019) estima que os combustíveis produzidos a partir de ácidos gordos são provavelmente a fonte mais barata de SAF, dada a disponibilidade tecnológica atual. O autor estima que os custos de produção são de aproximadamente duas vezes o do combustível produzido a partir do petróleo, enquanto que os SAF produzidos a partir de outras matérias-primas podem possuir um custo de fabricação de até oito vezes mais do que os combustíveis tradicionais MALLEY, *et al.* (2021).

Segundo MALLEY *et al.* (2021), o óleo de cozinha é o exemplo mais comum de matéria-prima originada de ácidos gordos. Existe no óleo usado de cozinha a grande vantagem de poder ser recolhido de fontes comerciais tais como restaurantes e / ou de lares da população. Os autores citam o caso da União Europeia, em que o óleo de cozinha usado não pode ser utilizado na alimentação do gado e não tem qualquer utilização benéfica fora do setor dos biocombustíveis. Esta situação não é similar quando se analisa o caso dos Estados Unidos, em que o óleo de cozinha usado (apelidado de UCO, do inglês *Used Cooking Oil*) pode ser reaproveitado para outros fins, que não a produção de combustíveis alternativos.

Nesse sentido, a utilização do UCO como matéria-prima de SAF é ligeiramente mais popular na Europa do que nos Estados Unidos (MALLEY *et al.*, 2021).

Ainda sobre o caso Europeu, *benchmark* que os autores tomam como referência para produção de SAF a partir de gorduras, óleos utilizados e UCO reaproveitado, temos que esta matéria-prima já é também utilizada para a produção de outros combustíveis, como é o caso do biodiesel. Não é elucidado pelos autores sobre o trade-off entre utilizar o UCO para biodiesel ou para produção de SAF. No entanto, sem se aprofundar nesta questão, há de se reconhecer que, apesar de haver uma grande praticidade e baixo custo na obtenção de UCO como matéria-prima para SAF, a utilização desta substância na fabricação de outros combustíveis pode ser um fator a limitar a sua disponibilidade para serem empregados na conversão dos combustíveis alternativos de aviação. Para este debate, cabe uma análise mais aprofundada em outro momento.

Por outro lado, não só o *Used Cooking Oil* ou óleos vegetais usados podem ser empregados na fabricação dos SAF. Como citado anteriormente, gordura animal também se apresenta como uma alternativa de matéria-prima viável. Por outro lado, há uma vasta utilização de subprodutos como banha de porco, gordura de frango ou sebo de vaca na fabricação de outros bens de consumo, como por exemplo alimentos para animais domésticos, ração para gado ou fabricação de sabonetes. Apesar de possuir um custo baixo em relação aos óleos vegetais (TOLDRÁ-REIG *et al.*, 2020), as gorduras animais, além de já serem atualmente utilizadas na fabricação de outros bens muitas vezes nem sequer se enquadram nas políticas de biocombustíveis de muitos países. Segundo MALLEY *et al.* (2021), a Alemanha, por exemplo, não permite a utilização de gordura animal para fabricação de biocombustíveis, devido à sua preocupação com a oferta desta matéria-prima para a geração de outros produtos, como os citados anteriormente. Assim, vemos que o desafio maior na utilização de gorduras animais está atrelado aos outros fins que esta substância já possui atualmente.

4.1.1.2 Resíduos lignocelulósicos

Dentro desta categoria de matérias-primas, nos referimos a substâncias lignocelulósicas provenientes de resíduos agrícolas, florestais e de resíduos municipais. Estas substâncias possuem uma técnica de conversão ao combustível sustentável de aviação mais complexa do que a conversão de óleos, por exemplo (MALLEY *et al.*, 2021), o que está atrelado à composição química desta matéria-prima. As conversões destas substâncias

ocorrem através de técnicas como a gaseificação por Fischer-Tropsch ou o processo apelidado de “Alcohol to Jet”, ao qual voltaremos ao longo deste capítulo.

Por outro lado, há uma abundância muito maior destas substâncias do que óleos reaproveitados como o UCO. Além disso, o potencial de redução de emissões de carbono ao longo do ciclo de vida desta matéria-prima é significativamente baixo (ICAO, 2019). Segundo MALLEY *et al.* SEARLE (2021), técnicas modernas de colheita permitem que a maioria dos materiais descartados permaneçam *in situ*, fornecendo nutrientes e umidade para uma melhor qualidade do solo. Se os resíduos agrícolas forem colhidos a níveis que evitem impactos de deslocamento, estes materiais utilizados na produção de biocombustíveis poderiam proporcionar elevados níveis de poupança de gases do efeito estufa (SEARLE *et al.*, 2014).

Por outro lado, apesar de considerarem uma alta disponibilidade e potencial de poupança de emissão de gases danosos ao meio ambiente, os autores consideram os resíduos agrícolas que têm utilizações existentes noutras indústrias – como, por exemplo, cultivo de cogumelos, horticultura, e alimentação e cama de gado – como não disponíveis para a produção de biocombustível. Os resíduos agrícolas são também utilizados na produção de calor e eletricidade. Segundo MALLEY *et al.* (2021), estima-se que as quantidades demandadas para esses fins aumentem nos anos futuros, o que podemos concluir como uma forma de competição ao uso de dejetos agrícolas na produção de SAF.

Os resíduos florestais são as copas das árvores e os ramos que sobram de eventuais práticas de abate de árvores ou desmatamento para produção de outros fins, como fabricação de celulose. Essas matérias-primas possuem baixo valor econômico e podem ser recolhidas e utilizadas para aquecimento e energia. Fora isso, podem ser empregadas, claro, na produção de SAF (SEARLE e MALINS, 2016).

Segundo SEARLE e MALINS (2016), a disponibilidade de resíduos florestais pode ser calculada como uma identidade à oferta de resíduos agrícolas, subtraindo as quantidades de resíduos que são utilizados para tratamento e fertilidade do solo. Segundo MALLEY *et al.* (2021), há relativamente pouca informação ou investigação empírica sobre os impactos da remoção de resíduos florestais na saúde do solo. Por outro lado, SEARLE e MALINS (2016) assumem que um mínimo de 50% dos resíduos disponíveis deve permanecer *in situ* em todos os casos, de forma a garantir a manutenção da saúde do solo fértil, o que já se torna um segundo grande fator limitados para a disponibilidade desta matéria-prima, sendo o primeiro a concorrência com uso destes resíduos para outros fins, como produção de calor e eletricidade, conforme citado anteriormente (MALLEY *et al.*, 2021).

Tendo tratado dos resíduos agrícolas e florestais, discorreremos brevemente sobre a situação dos resíduos municipais recolhidos de fontes domésticas, comerciais e industriais, que possuem um elevado índice biogénico. Quando descartados em aterros, os resíduos municipais e industriais podem gerar metano a partir de decomposição anaeróbica. Não enviar os resíduos a aterros e utilizá-los para a produção de biocombustíveis pode assim gerar poupanças significativas de emissões (SEARLE *et al.*, 2017). Devido às novas diretivas e incentivos observados mundo afora sobre separação de lixo, reciclagem, reutilização e redução de desperdício, os autores assumem que a redução dos resíduos e o aumento das capacidades de compostagem e reciclagem reduzirão a quantidade de resíduos disponíveis em 2030 em 50% devido a políticas como aquelas presentes na União Europeia, por exemplo (MALLEY *et al.*, 2021).

4.1.1.3 Plantas de cobertura de solo (ou em inglês, *cover crops*)

Segundo MALLEY *et al.* (2021), as culturas de cobertura, também chamadas culturas intermitentes, são cultivadas durante o inverno e colhidas na primavera, antes da sementeira das principais culturas. Estas culturas podem potencialmente servir de matéria-prima para a produção de SAF, embora a sua contribuição potencial futura seja incerta. As culturas de cobertura comum incluem leguminosas e gramíneas de baixo teor de amido, incluindo trevo carmesim e azevém, bem como alimentos culturas como a aveia e colza (MAGDOFF e VAN ES, 2010).

Apesar de populares em regiões da América do Norte, as culturas de cobertura são relativamente pouco comuns na Europa (DEL GATTO *et al.*, 2015). Além disso, as culturas de cobertura também são utilizadas muitas vezes como uma espécie de forragem do solo para viabilizar atividades de pecuária temporárias sobre o solo, sem que haja danos causados pelos animais ao solo. Alternativamente, o desvio de culturas de cobertura de forragem para o gado exigiria produção adicional de ingredientes para ração animal, tais como trigo, com emissão maior de gases do efeito estufa associada.

No entanto, não se conhece ao certo na atualidade o quão intensamente essa prática é levada a cabo, o que adiciona ainda mais à incerteza associada à utilização desta matéria-prima na fabricação de SAF. Além disso, há uma grande ausência de dados e transparência na prática de culturas de cobertura. Por este motivo, considera-se esta uma alternativa menos plausível para os SAF.

Para viabilizar um real entendimento e planeamento da utilização de plantas de cobertura de solo na fabricação de novos combustíveis, mais estudos e dados são demandados

nesta área. Para fins desta monografia, consideramos esta matéria-prima de viabilidade técnica factível, porém de viabilidade logística e de oferta ainda muito incerta para ser considerada aceitável como uma solução concreta para o mundo dos SAF (MALLEY *et al.*, 2021).

4.1.1.4 Eletro combustíveis

Maneiras não-biológicas também se apresentam como uma alternativa à produção dos SAF, segundo MALLEY *et al.* (2021). Nesse contexto, os eletro combustíveis, também chamados *Power-to-Liquids* (PtL), se colocam como um caminho potencialmente de baixo teor de carbono, mas de recursos intensivos para produzir SAF. Para gerar combustível de aviação (querosene), as moléculas de água são divididas em hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio é então sintetizado num reator com carbono dióxido para produzir hidrocarbonetos líquidos ou gasosos ou álcoois (BALDINO *et al.*, 2019).

Segundo MALLEY *et al.* (2021), a quantidade de “PtL” que teoricamente poderia estar disponível para SAF é muito grande porque os recursos físicos necessários são principalmente as matérias-primas para a construção solar painéis e turbinas eólicas e terreno para a colocação das instalações. No entanto, é improvável, segundo os autores, que este potencial teórico seria atingido, uma vez que custos altíssimos de produção estão atrelados a este processo. Fora isso, é necessário tempo e experiência para viabilizar comercialmente esta nova metodologia emergente. Desta maneira, coloca-se que o principal desafio para utilização de eletro combustíveis para fabricação de SAF é basicamente receber os devidos incentivos e apoios das entidades reguladoras, governos e outras partes interessadas. Sem isso e sem haver uma viabilidade para o investimento nesta nova técnica, não se estima que haja uma grande disponibilidade de eletro combustíveis como matéria-prima para a derivação de qualquer subtipo de matriz energética, devido às limitações fortes relacionadas aos altos custos de produção.

4.1.1.5 Gases de combustão industriais

Os gases de combustão industriais, principalmente portadores de energia como o CO e o H₂, podem ser capturados, fermentado e convertidos em SAF, segundo MALLEY *et al.* (2021). Neste processo, chamado de Lanzatech, nas instalações industriais ricas em carbono, como siderurgia os gases de combustão capturados de fontes industriais, tais como siderurgias, são submetidos a fermentação para produzir um intermediário de etanol

(BAZANELLA e AUSFELDER, 2017). Etanol é depois convertido em etileno por desidratação e oligomerizado para formar um sintético hidrocarboneto (PAVLENKO, 2019). Na ausência deste processo, o gás de combustão é frequentemente queimado, daí a possibilidade de se economizarem toneladas de emissão de gases do efeito estufa.

Por outro lado, grande parte destes gases são utilizados como forma de para recuperação de energia no processo produtivo (MALLEY *et al.*, 2021). A proporção da quantidade de gases que é utilizada para recuperação de energia chega a aproximadamente 70% do total de gases de combustão emitidos. Dessa forma, também há um grande limitador de oferta e disponibilidade desta matéria-prima.

4.1.2 O caso brasileiro

De maneira geral, as tendências gerais que citamos neste capítulo até agora – onde tratamos na maioria das vezes de benchmarks dos casos norte americano e / ou da União Europeia – se repetem no caso brasileiro (CORTEZ *et al.*, 2014).

Por outro lado, existem alguns aspectos que são particulares do caso brasileiro, devido às condições de política de tratamento de dejetos, logística e uso do solo. Passaremos a discorrer brevemente sobre estas três esferas, em que vemos aspectos particulares para o caso brasileiro, para obtenção de matéria-prima para uso do SAF.

4.1.2.1 Políticas de tratamento de dejetos

Primeiramente, devemos frisar que as soluções de uso de lixo e / ou dejetos urbanos revelam-se factíveis também no Brasil, dada a existência de grandes cidades e áreas conturbadas, como as das capitais federais e de estados como Rio de Janeiro e São Paulo, segundo CORTEZ *et al.*, 2014. Dessa forma, a utilização de matéria-prima derivada de dejetos urbanos poderia ser uma boa alternativa para se obter uma boa quantidade de substâncias para fabricação de SAF.

Por outro lado, CORTEZ *et al.*, 2014 também coloca que o fator limitador está atrelado basicamente à postura de governos e autoridades locais no tratamento de lixo urbano e dejetos, dado que não ocorre a nível nacional a utilização de lixo urbano na fabricação de biocombustíveis.

4.1.2.2 A questão logística

É natural achar que a logística no mercado de produção e distribuição de combustíveis em qualquer país é um desafio à parte. No caso brasileiro, no entanto, as barreiras podem ser ainda maiores, dado o cenário de infraestrutura e, claro, as grandes distâncias potenciais entre áreas de produção, de refinaria e de distribuição, segundo CORTEZ *et al.* (2014). A estas questões inerentes à logística do combustível sustentável de aviação em si ao longo de sua cadeia de valor, daremos maior ênfase na seção 4.3 que será desenvolvida a seguir. No entanto, é também parte desta cadeia de valor todo o processo logístico da matéria-prima do SAF, assunto que discutiremos brevemente neste item.

Para o cenário mundial assumiremos aqui que existe uma grande variedade em termos de características locais como extensão territorial e arcabouço de infraestrutura, assim como o uso de outros tipos de matéria-prima, diferentes daquela originária de biomassa agrícola. Dessa forma, consideraremos para fins de simplificar a presente análise que os desafios são extremamente diversos no panorama global acerca da logística de matérias-primas, dada a heterogeneidade de países e suas condições locais. Por outro lado, podemos ser mais objetivos sobre o caso brasileiro, a partir das colocações de CORTEZ *et al.* (2014).

Segundo CORTEZ *et al.* (2014), logísticas de matérias-primas possuem um papel fundamental na sustentabilidade dos combustíveis, dada a sua emissão alta de CO₂ e elevada capacidade de influenciar nos custos de produção. O autor coloca que, no Brasil, existe uma grande dependência do modal de transporte rodoviário, enquanto que modais de transporte considerados menos agressivos ao meio ambiente, como o ferroviário, por exemplo, não possui uma estrutura bem desenvolvida. De acordo com as colocações de CORTEZ *et al.* (2014), isso configura como um grande empecilho logístico no deslocamento das matérias-primas e se apresenta como um desafio à parte ao Brasil para transportar de forma verdadeiramente sustentável as matérias-primas ao longo do território nacional.

Fora isso, CORTEZ *et al.* (2014) ainda considera que em um país como o Brasil, cujo território possui uma dimensão continental, há um potencial de necessidade de se deslocarem em grandes distâncias as matérias-primas, desde plantações ou aterros sanitários até as refinarias e eventuais plantas de SAF. Como atualmente ainda não há uma planta de SAF em funcionamento no território brasileiro, não é possível quantificar este desafio em números. No entanto, sem dúvida, através de uma análise dedutiva, pode-se concluir, a partir dos apontamentos de CORTEZ *et al.* (2014), que a ausência de uma estrutura ou de modais alternativos de transporte em um país de tamanho tão vasto territorialmente se colocará provavelmente como um grande desafio para a obtenção de matéria-prima de SAF.

4.1.2.3 Uso do solo

Em países com uma limitação territorial, vemos a presença forte do debate alimento versus combustível em vigor, isto é, debate-se a seguinte pergunta: plantar para alimentar ou plantar para comer? Isso se dá à medida que o uso da terra deve ser racionado e entra em cena *trade-off* entre o plantio de vegetais para finalidade alimentícia ou para a fabricação de biocombustíveis (CORTEZ *et al.*, 2014). Por outro lado, quando olhamos o caso brasileiro, vemos, a dimensão continental do território nacional atrelada ao clima favorável como um potencial fator motivador do uso de matérias-primas originadas do cultivo de biomassa, como é o caso da utilização de plantas para a produção de SAF.

Ademais, segundo CORTEZ *et al.* (2014), o Brasil possui uma combinação bastante particular de uma quantidade significativa de terra disponível para a agricultura, um setor agrícola bastante dinâmico, uma quantidade grande de vegetação nativa protegida legalmente, leis fortes de conservação, assim como leis de proteção à saúde e segurança do trabalhador rural equivalentes àquelas vigentes para os trabalhadores urbanos. Assim sendo, no caso do Brasil, segundo CORTEZ *et al.*, (2014), temos um cenário extremamente favorável e com potencial de disponibilidade de matéria-prima para produção de SAF muito mais vasta do que em outros países, inclusive os do caso europeu, em que há restrições climáticas e territoriais muito mais fortes. É importante ter em mente que falamos aqui de matérias-primas pertencentes às categorias 1 e 2 delineadas anteriormente, ou seja, resíduos de gorduras e óleos, assim como resíduos lignocelulósicos, principalmente os florestais.

Surpreendentemente, todas essas condições unidas no mesmo país colocam o Brasil como um bom ambiente para o cultivo de matéria-prima e para que um ótimo programa de desenvolvimento de biocombustíveis seja levado a cabo, caso as políticas adequadas sejam colocadas em prática. Ademais, um programa fundado em requisitos e princípios de responsabilidade ecológica e social deve ser desenvolvido.

4.2 TÉCNICAS DE REFINO

Segundo RYE *et al.* (2010), o querosene tradicional de aviação continuará ainda ser utilizado na indústria por muitos anos, já que satisfaz todas as necessidades técnicas, de infraestrutura e de frota de aeronaves tanto civis quanto militares. Isso pode ser visto como o grande diferencial dos combustíveis *drop-in* – aqueles que possuem características moleculares iguais ou muito próximas à dos combustíveis tradicionalmente utilizados – sobre

os não *drop-in*, já que o primeiro pode garantir a não necessidade de se adaptar um número imenso de aeronaves, tanques de armazenagem e sistemas de distribuição e abastecimento de combustível, evitando altíssimos custos diretos e indiretos, além de interrupções de operações (RYE *et al.*, 2010).

Como citado anteriormente, neste estudo daremos ênfase aos combustíveis *drop-in*, já que estes são os que se encontram em estágio mais avançado de desenvolvimento técnico e aplicabilidade para toda a frota e escala da aviação comercial do século XXI. Segundo a IATA (2022), o termo de combustível *drop-in* é usado para descrever um combustível alternativo que é indistinguível do combustível convencional, implicando em nenhuma necessidade de mudanças em aeronaves, motores ou infraestrutura de distribuição. É justamente sobre este subtipo de combustíveis SAF que discorreremos a seguir.

4.2.1 O refino dos combustíveis *drop-in*

O refino de combustíveis petroquímicos é uma atividade crucial para a economia mundial moderna e no último século se constituiu como um dos ramos em que grandes empresas multinacionais se instituíram. Trata-se de um processo extremamente complexo, porém de alta eficiência quando se atingem as dimensões necessárias para se conseguirem economias de escala. A aviação se coloca como um dos grandes consumidores dos produtos originários do refino petroquímico, tendência que provavelmente não se alterará abruptamente nos próximos anos.

Por outro lado, vemos o surgimento de novas tecnologias viabilizando a produção e comércio de combustíveis alternativos como o SAF, não só de maneira factível do ponto de vista técnico, mas também do ponto de vista de aplicabilidade para o tamanho da indústria atual.

Basicamente, o processo produtivo dos SAF *drop-in* se dá por três fases de operação (CORTEZ *et al.*, 2014): 1) pré-tratamento da biomassa (matéria-prima), 2) conversão e 3) processo tecnológico para se obter o combustível. Há uma variedade de processos que se distinguem um do outro ao longo de cada uma das três fases. Cada processo específico para transformar diferentes tipos de biomassa possui sua eficiência e seu rendimento. Abaixo citamos alguns exemplos para cada um dos procedimentos disponíveis para cada fase, de acordo com as contribuições de CORTEZ *et al.* (2014):

1) **Pré-tratamento da biomassa:**

Explosão de vapor ou Hidrólise de lignocelulose

2) **Conversão**

Fermentação de álcoois ou lipídios, gaseificação, liquefação de solvente ou reações catalíticas diretas para se converterem açúcares em combustíveis

3) **Processo tecnológico para se obter o combustível**

Síntese de Fischer-Tropsch, HEFA ou oligomerização

A maioria dessas novas tecnologias são consideráveis factíveis do ponto de vista técnico, porém ainda estão sendo desenvolvidas para aplicabilidade de escala e validação. No entanto, consideraremos durante este estudo, para fins de simplificação que são três as principais categorias de técnicas de refino que seriam aplicáveis ao caso brasileiro, de acordo com FAA (2014), GELEYNSE *et al.* (2018) e CORTEZ *et al.* (2014):

1. **“Alcohol to Jet”** – Trata-se de um processo de conversão de álcoois para uma mistura alternativa de combustíveis de aviação baseado em etapas catalíticas historicamente utilizadas pela indústria de refinação de petróleo e petroquímica
2. **Fermentação direta de açúcares para hidrocarbonetos (“DSHC”)** – processo de fermentação microbi-catalítica de matérias-primas renováveis de açúcar, resultando em uma molécula de hidrocarboneto do tipo farneseno, que é depois transformada numa molécula de um único alcano moderadamente ramificado, podendo dar origem a combustíveis alternativos ao querosene de aviação e ao diesel
3. **Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Gordos (“HEFA”)** – também chamado HVO (“Hydrotreated Vegetable Oil”), é um combustível renovável que pode ser produzido a partir de uma vasta gama de óleos e gorduras vegetais

Para serem efetivamente mapeadas todas as barreiras do ponto de vista de produção e refino dos SAF tipo *drop-in*, um estudo mais aprofundado sobre cada tema deve ser executado. No entanto, reproduzimos abaixo uma versão adaptada da tabela de CORTEZ *et al.* (2014), para fins de um entendimento geral e holístico das vantagens e desvantagens de cada processo hoje disponível.

Prós e contras das alternativas de tecnologias de refino				
Tecnologias de refino disponíveis	Aspectos técnicos		Aspectos financeiros / comerciais	
	Prós	Contras	Prós	Contras
“Alcohol to Jet”	Tecnologia disponível para implementação	Nenhum plano comercial ainda desenvolvido Muito mais álcool deve ser produzido	Nenhuma necessidade de utilização de equipamentos de alto custo Álcool no Brasil é atualmente produzido a partir de cana-de-açúcar e há planos de desenvolvimento da tecnologia genética para produção de álcool	Nenhum
Fermentação direta de açúcares para hidrocarbonetos (“DSHC”)	Primeira geração de plantas comerciais já disponível no Brasil DSHC já é utilizada no Brasil	Esterilização padrão é necessária	Nenhum equipamento de alto custo é requerido na produção, porém o desenvolvimento da tecnologia	Álcool no Brasil é produzido a partir de cana-de-açúcar e se espera que a produção a partir de

			possui alto custo	tecnologia genética seja amplamente utilizada
Ésteres Hidro processados e Ácidos Gordos (“HEFA”)	Comercialmente disponíveis	Requer uso de hidrogênio (altos custos), porém integrar este processo a plantas / refinarias já existentes poderia reduzir estes custos de hidrogenação	Processo eficiente	Alto custo de matéria prima. Algas e lipídios poderiam ser uma solução a este alto custo no longo prazo

Tabela 1: Prós e contras das cada tecnologia de refino de SAF para o Brasil

FONTE: CORTEZ *et al.*, 2014

Como se pode ver, cada tipo de processo possui suas vantagens e desvantagens. A tabela acima foi preparada e elucidada para o caso brasileiro em particular. Por outro lado, basicamente, não podemos realizar grandes contrastes aqui entre a situação observada no Brasil com aquela observada no exterior, uma vez que em um contexto globalizado, existe um bom intercâmbio de tecnologia conhecida entre os diversos países.

Poucas exceções para isso existem. Em particular, no processo supracitado chamado Fermentação direta de açúcares em hidrocarbonetos. Para este, é mencionado na tabela a diferença em termos de estágio de desenvolvimento no Brasil, em comparação a outros países, uma vez que, a nível nacional, temos as plantas disponíveis próprias para primeira geração do processo de conversão, isto é, a conversão de cana-de-açúcar em álcool, e não o uso de tecnologia genética (“*Gen. Technol.*”).

Ademais, outras diferenças entre o caso local e o estrangeiro existem, porém que não estão relacionadas diretamente ao processo de refinamento em si, mas à matéria-prima disponível, assunto que tratamos no item 4.1 deste ensaio. Um exemplo para casos como este é o uso de lixo urbano para a produção de SAF, para que não existem grandes iniciativas hoje no Brasil.

Tirando estes exemplos, podemos dizer que os desafios do cenário mundial em muito se assemelham aos do caso brasileiro.

4.3 INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

São diversas as situações de países mundo afora em termos dos desafios logísticos e de infraestrutura. Como exemplo temos de um lado países europeus, que possuem sistemas de conectividade de ferrovias altamente desenvolvidos em muitos casos, e de outro lado países que favorecem o sistema rodoviário, como os Estados Unidos. Em outra instância existem países com alto grau de desenvolvimento de infraestrutura, como o Canadá, e outros como países da África subsaariana em que a situação é oposta. Além disso, há também uma grande influência do fator político na situação de infraestrutura e logística de um país, dado que muitas vezes é cenário institucional de um Estado quem promove ou não fatores desenvolvimento de infraestrutura, monopólios ou não de distribuição de combustíveis, conectividade e transporte, entre outras questões (CORTEZ *et al.*, 2014).

Assim sendo, assumiremos, como em outros momentos deste ensaio, que o cenário mundial possui uma vasta diversidade no que diz respeito aos seus próprios desafios logísticos e de infraestrutura no que diz respeito à produção e distribuição de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). Neste caso, para os fins deste trabalho, discorreremos basicamente sobre o caso brasileiro e os desafios do Brasil nesta área particularmente, e deixaremos de lado a situação de outros países.

4.3.1 Infraestrutura e logística de combustíveis de aviação no Brasil

Segundo CORTEZ *et al.* (2014), as características da logística de distribuição de combustível de aviação tradicional no Brasil são, no geral, bem definidas e organizadas. Há, claro uma grande concentração no consumo de combustível em grandes aeroportos internacionais. Contudo, estes estão situados, em via de regra, próximos a refinarias, o que facilita o processo logístico. Por outro lado, por menor que seja a sua representatividade no consumo total de combustíveis, aeroportos regionais brasileiros somente podem ser acessados por vias aéreas e / ou marítimas durante parte do ano, o que é visto como uma barreira

logística. Além disso, ainda menciona que os aeroportos de algumas regiões brasileiras somente são abastecidos por combustíveis de aviação importados.

Para dar um panorama geral sobre a distribuição de combustíveis de aviação no Brasil, citamos a seguir algumas características do mercado local. Em primeiro lugar, temos uma situação de monopólio de produção e importação de combustível no Brasil, dado que a PETROBRAS é a única empresa autorizada a realizar tais atividades dentro do país. Ademais, existem quatro distribuidores e 13 pontos de distribuição, 9 incluindo refinarias, 5 terminais marítimos e 173 revendedores autorizados (CORTEZ *et al.*, 2014). O consumo se dá principalmente em aeroportos da região sudeste, a que se juntam os aeroportos de Brasília e de capitais do Norte e Nordeste, aonde só há acesso por ar e vias marítimas durante boa parte do ano. Isto demanda, para este último caso, que combustível fique estocado por um tempo médio maior do que a média.

O mesmo que hoje vale para combustíveis tradicionais, também será, muito provavelmente a realidade quando os combustíveis alternativos caírem como principal fonte energética da aviação comercial. Para isso, essas características supracitadas devem ser vistas como os desafios logísticos também para os SAF do futuro. Quaisquer iniciativas ou políticas a serem implementadas acerca do uso de biocombustíveis de aviação devem também considerar estas barreiras.

No mais, assim como no cenário global, todas (ou a maioria) das barreiras atreladas à conversão de tanques de combustível, armazenagem, motores de aeronaves, sistemas de distribuição etc. caem por terra quando a escolha é feita de se utilizarem combustíveis essencialmente *drop-in*. O mesmo valerá para a infraestrutura que os aeroportos precisam ter e manter. Um cenário um pouco diferente ocorreria inicialmente, quando os combustíveis não chegariam prontamente aos aeroportos como um querosene de aviação, já que a mistura (“*blend*”) dos SAF com os combustíveis tradicionais não ocorreria anteriormente. Por outro lado, a expectativa é que o desenvolvimento da indústria nos leve ao ponto em que o *blend* dos dois tipos de combustível – tradicional e sustentável – ocorra em outro ponto da cadeia de valor e distribuição: os chamados *blending points*.

Apesar de isso significar que não serão necessárias adaptações infra estruturais nos equipamentos já existentes, a existência de um novo passo na cadeia de valor deverá ser levado a cabo em dois possíveis lugares: na própria refinaria (onde uma seção de mistura deverá ser criada) ou em uma nova estrutura, de preferência adjacente aos aeroportos, onde este passo intermediário será executado. Assim, vê-se uma adição infra estrutural importante que, mesmo para os combustíveis não-*drop-in* será necessária, que viabilizará que os

consumidores finais em aeroportos já recebam um combustível mais verde que é composto em parte por SAF, em parte por combustível fóssil tradicional. Os *blending points* garantem, dessa forma, que o líquido já reconhecido como *Jet Fuel* chegue enquanto substância homogênea e uniforme, sem distinção das partes que a compõem.

Retomemos agora à questão logística. Segundo CORTEZ *et al.* (2014), os 13 maiores aeroportos do Brasil consomem aproximadamente 85% do combustível de aviação no país. 10 deles são abastecidos por refinarias que se encontram em áreas adjacentes, enquanto 2 são abastecidos por vias marítimas. Para fins de nossa análise, assumiremos que não houve grandes mudanças nessas configurações nos últimos anos. A figura 2, adaptada de CORTEZ *et al.* (2014) ilustra o quadro geral de distribuição de combustíveis de aviação no Brasil:

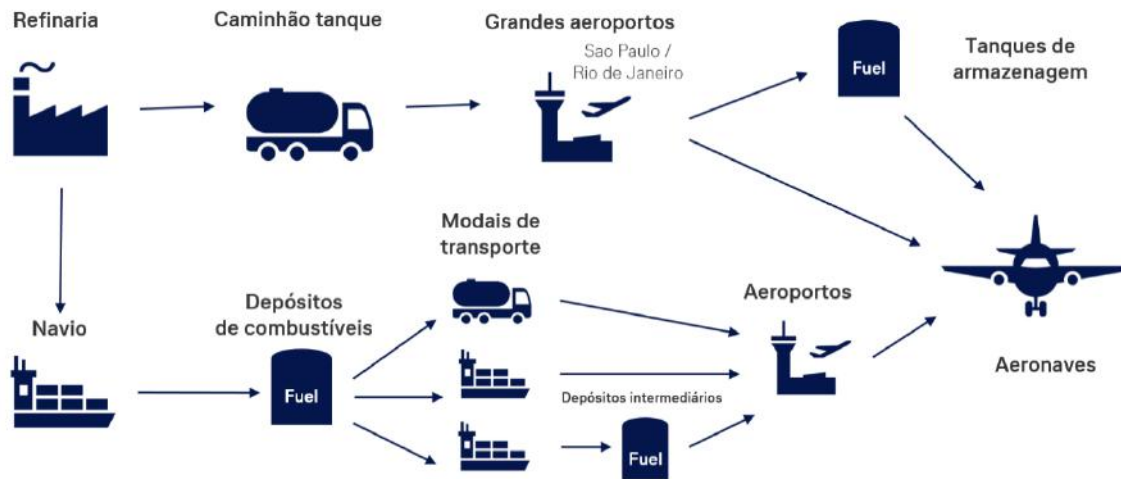


Figura 2: Visão geral da logística de distribuição de combustíveis no Brasil
Fonte: CORTEZ, Luís *et.al* (2014)

No entanto, temos ainda um grande aeroporto nesta lista que não se adequa a nenhuma dessas categorias: o Aeroporto Internacional de Brasília, também chamado de terminal BSB, cujo combustível é entregue por vias terrestres (transporte principalmente rodoviário). As viagens para abastecimento de combustíveis a BSB chegam a ter em média 700 km que se estendem entre as refinarias mais próximas e o aeroporto da capital federal.

Dado que Brasília se situa em uma região de forte possibilidade de cultivo de matéria-prima para SAF *drop-in*, um possível grande benefício econômico e de eficiência para a cadeia de distribuição de combustíveis a BSB poderia ser a instalação de uma refinaria ou *blending point* nos arredores da cidade. Por outro lado, um outro desafio já citado neste ensaio entra em vigor neste caso: a baixa rentabilidade do negócio de refino de combustíveis (fóssil ou alternativo) quando economias de escala não são alcançadas, dados altos custos de

certificação. Por mais que Brasília consuma grandes quantidades de combustível de aviação por ano, segundo CORTEZ *et al.* (2014), aproximadamente 500 milhões de litros, em média, provavelmente seu volume demandado não seria o suficiente para superar de forma eficiente os altos níveis de custos de capital (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) demandados para tal investimento. É um desafio a se considerar em especial para este aeroporto, porém que se trata de uma consideração extremamente importante, dada o tamanho da terminal e o atendimento a uma cidade de tamanha importância política para o Brasil (CORTEZ *et al.*, 2014).

Dessa forma, elucidamos os principais desafios inerentes ao Brasil e suas disposições de infraestrutura, distribuição e logística dos combustíveis SAF. Passaremos agora aos aspectos de controle de qualidade e marco regulatório.

4.4 CONTROLE DE QUALIDADE E MARCO REGULATÓRIO

A indústria da aviação comercial é notoriamente conhecida como a provedora do serviço de transporte de longa distância mais seguro do mundo (IATA, 2022). Isso está relacionado a diversas diretrizes, leis, regulamentações e processos ligados a Segurança de voo e operações aéreas, que são seguidos à risca por empresas do ramo e constantemente auditados por órgãos reguladores, em geral Autoridades de Aviação Civil nacionais, como é o caso da *Federal Aviation Administration* (FAA) nos Estados Unidos, *European Aviation Safety Agency* (EASA) na União Europeia e da ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil – no Brasil.

Por outro lado, vemos uma questão adicional sendo levantada atualmente: a sustentabilidade ambiental do transporte aéreo. Segundo SOARES *et al.* (2021), “A necessidade de conciliação entre os objetivos de segurança energética e de redução de emissões de gases de efeito estufa constitui o ponto focal dos debates atuais sobre política energética”. Nesse sentido, vemos o surgimento da necessidade de se atualizarem práticas – incluindo as de consumo de combustível da indústria da aviação – ao novo contexto de redução de impactos ambientais.

Dentro deste contexto, vemos o papel de agências reguladoras na regulamentação e certificação dos SAF, já que estes se apresentam como uma das principais alternativas à diminuição de emissões de gases do efeito estufa para a aviação comercial no curto e médio prazo (SOARES *et al.*, 2021). Por este motivo, passaremos agora a brevemente esclarecer os desafios principais atrelados às certificações dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).

Segundo SOARES *et al.* (2021), combustíveis de aviação seguem os padrões internacionais definidos pelo documento chamado ASTM D1655 – Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. Traduzindo ao pé da letra: especificação de padrões para combustíveis para turbinas de aviação. Desta forma, uma quantidade considerável de padrões de qualidade é definida para que os combustíveis de aviação possuam um nível similar e aceitável de confiabilidade e segurança.

Segundo, CORTEZ *et al.* (2014), os padrões devidos neste documento basicamente estão atrelados aos conceitos de rastreabilidade, uma vez que considera que os combustíveis são fabricados e distribuídos em lotes. Por outro lado, o autor também cita, além da ASTM D1655 no cenário mundial, uma resolução imposta pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) para o caso Brasileiro. Trata-se da Resolução ANP Nr. 37/2009, que dita as regras para fabricação de querosene de aviação, baseando-se nos padrões internacionais.

Por outro lado, vemos o surgimento de um novo documento regulador dos combustíveis alternativos sintéticos enquanto um novo regulador internacional dos padrões de produção de combustíveis novos, incluindo os SAF. Trata-se do documento ASTM D7566 (RUMIZEN, 2018; SOARES *et al.*, 2021).

Reproduziremos a seguir a tabela preparada por SOARES *et al.* (2021), que resume a cobertura de tipos de conversão de SAF dos anexos que se somam ao ASTM D7566.

Anexo	Ano	Rota de conversão	% Máxima da mistura	Matérias-primas possíveis
Anexo 1	2009	Querosene parafínico sintetizado hidroprocessado Fischer-Tropsch (FT)	50%	Carvão, gás natural e biomassa
Anexo 2	2011	Querosene parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocessados e ácidos graxos (HEFA)	50%	Bio-óleo, gordura animal e óleo reciclado
Anexo 3	2014	Isoparafinas sintetizadas a partir de açúcares fermentados hidroprocessados (SIP)	10%	Biomassa
Anexo 4	2015	Querosene sintetizado com aromáticos derivados por alquilação de aromáticos leves de fontes não petrolíferas (FT-SKA)	50%	Carvão, gás natural e biomassa
Anexo 5	2016	Álcool para querosene parafínico sintético (“Alcohol to Jet”)	50%	Etanol e isobutanol
Anexo 6	2020	Combustível de hidrotermólise catalítica (CHJ)	50%	Óleo vegetal
Anexo 7	2020	Querosene parafínico sintetizado a partir de ésteres hidroprocessados de hidrocarbonetos e ácidos graxos (HC-HEFA-SPK)	10%	Algas

Tabela 2: Rotas de conversão e porcentagem máxima de mistura**FONTE:** SOARES *et al.*, 2021

Através da tabela 2, fica evidente que o escopo de regulamentação já está em vigor para as principais matérias-primas e técnicas de refino que foram mencionadas ao longo deste estudo. Uma vez esclarecido isto, passemos ao tema dos combustíveis alternativos e sua regulamentação para entender os principais desafios regulatórios e de controle de qualidade.

No entanto, enquanto um tipo novo de combustível, os desafios não param por aí. Basicamente o que temos na legislação vigente hoje, é que as especificações técnicas para a produção de combustível se dão muito mais acerca dos métodos de fabricação do que acerca da necessidade de comprovação da qualidade da composição química em lotes (CORTEZ *et al.*, 2014). Neste caso, se o combustível não provem de modelos tradicionais de fabricação ou processos especificamente aprovados, não haverá a aprovação daquele combustível. Dessa forma, poderíamos deduzir que esta condição já representaria um grande desafio acerca da certificação dos SAF, uma vez que estes, é claro, não seguem a mesma lógica ou métodos de fabricação dos combustíveis tradicionais. Dessa maneira, como se daria o processo de certificação dos SAF?

Para responder a essa pergunta, CORTEZ *et al.* (2014) coloca que os SAF estão também sujeitos também aos padrões do ASTM D4054 – *Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives*, documento que regula os padrões para a implementação de novos combustíveis de aviação e / ou seus aditivos. Este documento não visa regulamentar os SAF enquanto um produto final, mas sim o processo, de maneira geral, que fabricantes de sistemas, componentes e combustíveis devem configurar e testar seu método produtivo. O foco é dado ao processo de produção e testagem, não ao produto final (ASCENT, 2020; SOARES *et al.*, 2021).

Como podemos ver na figura 3, que reproduz o esquema de CORTEZ, Luís *et al.* (2014), a testagem de novos combustíveis por parte de fabricantes de sistemas de aeronaves (chamados de OEM – *Original Equipment Manufacturer*), incluindo fabricantes de motores, deve ser parte do pacote de certificação de novos combustíveis. Dessa forma, apontamos que, apesar de envolverem novos processos de produção, em termos de certificação, os SAF possuem já um marco regulatório bem embasado, à medida que as diretrizes dos documentos ASTM e seus anexos já se encontram em prática.

Mesmo estando sujeito a uma diversidade de requisitos impostos por ambos os documentos mencionados nesta seção (isso sem mencionar seus anexos e adendos), uma coisa

é certa. Apesar de complexo no cenário mundial, os SAF, dado que respeitem uma certa metodologia de refino, podem ser fabricados e comercializados. No mais, os documentos ATSM e seus anexos cobrem de maneira relativamente ampla os métodos de fabricação e novos combustíveis enquanto produtos finais, uma vez que, segundo os autores citados ao longo deste capítulo.

Por outro lado, deve-se observar que a grande complexidade do processo produtivo, sua testagem e comprovação de eficácia demandam diferentes etapas do processo de certificação. Arelado a isso, há necessidade de se produzir o produto, quando certificado, em enormes quantidades, de forma que economias de escala possam ser atingidas. Dessa forma, SOARES *et al.* (2021) coloca que “as exigências de grandes escalas produtivas durante o processo de certificação constitui uma grande barreira, principalmente para as pequenas empresas, pois há a necessidade de vultuosos investimentos, inclusive em capacidade produtiva, em processos que levam anos e com o risco de o combustível alternativo não ser aceito” (SOARES *et al.*, 2021).

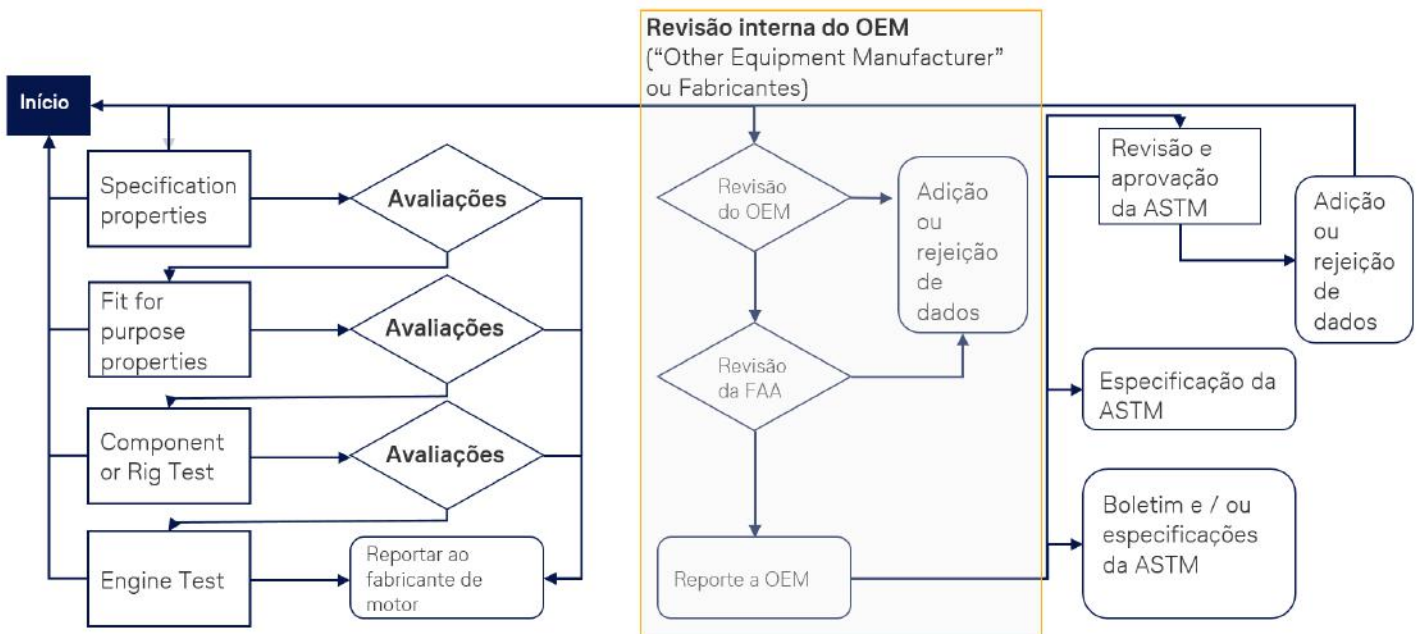


Figura 3: Regulamentação da ASTM D4054 para certificação de combustíveis

FONTE: CORTEZ, Luís *et al.*, 2014

Diante disso, fica evidente que os desafios para a certificação de biocombustíveis no cenário existem e não são poucos, uma vez que há métodos novos e produtos novos sendo fabricados. Além da certificação complexa, altos custos de investimento são esperados, exigindo que grandes escalas produtivas sejam atingidas, conforme elucidado anteriormente.

4.4.1 Condições regulatórias e institucionais no Brasil

É a Agência Nacional do Petróleo quem gere as regulamentações e diretivas acerca da certificação e controle de qualidade de combustíveis de aviação no Brasil. Consequentemente, também estão sob responsabilidade da ANP as regulamentações acerca da fabricação e distribuição comercial de biocombustíveis no país (SOARES *et al.* 2021).

No geral, pode-se dizer que as regulamentações da ANP são uma tradução ao caso brasileiro das disposições colocadas pelos documentos da ASTM, assim como de outras partes interessadas enquanto agências reguladoras, como é o caso da Agência Internacional de Transporte Aéreo (IATA). Até o ano de 2012, a legislação que imperava era a Resolução da ANP 37 / 2009, que, como mencionado, muito se espelhava nos padrões internacionais tradicionais.

Naquele ano, porém, foi levada a cabo uma grande revisão dos padrões tradicionais, com o intuito de se incluírem no guarda-chuva da legislação os novos combustíveis. Neste ato, foram considerados, por exemplo, as diretrizes da ASTM7566, que passaram a ser colocadas como requisitos mínimos da ANP para os novos biocombustíveis de motores de aeronaves a turbina, ou seja, aqueles que substituem o querosene de aviação tradicional (CORTEZ *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2021). Além disso, buscou-se tanto uma redefinição das atribuições de partes interessadas na cadeia de valor de produção e distribuição de combustíveis para que o papel do *blender* (ou agente que misturará o querosene tradicional ao biocombustível), assim como se virou à definição de melhores práticas e *guidelines* para importação de SAF do exterior para o Brasil. Como resultado deste trabalho, constitui-se a resolução da ANP 20 / 2013 (CORTEZ *et al.*, 2021).

Entretanto, segundo SOARES *et al.* (2021), vemos uma atualização na legislação que hoje rege os padrões para distribuição comercial de bioquerosene no Brasil:

“A Resolução ANP nº 20 de 2013 foi substituída pela Resolução ANP nº 63 de 2014. Esta manteve o alinhamento com os padrões internacionais para as especificações dos SAF como também desenhou a sua estrutura de comercialização no Brasil. Em 2019, as regras para a comercialização do QAV-1 e dos combustíveis alternativos foram reunidas na resolução 778 da ANP, que determina as obrigações de cada agente da cadeia dos combustíveis de aviação. Ao produtor de um SAF fica

a responsabilidade de garantir a qualidade do produto, que deve seguir as especificações determinadas. Nesta etapa, a comercialização do SAF só é possível após a emissão do certificado de qualidade feito pela ANP. Destaca-se que o produtor deve informar as diferentes matérias-primas utilizadas e, caso seja utilizada mais de uma, a proporção de utilização de cada uma delas.” (SOARES *et al.*, 2021, p. 48)

SOARES *et al.* (2021) cita ainda que as resoluções da ANP seguem, em geral, os critérios colocados pelo ASTM D7566, conforme elucidado acima. Ademais, adiciona um outro problema fundamental. No Brasil, não há capacidade produtiva de SAF instalada (IATA, 2022; SOARES *et al.*, 2021). Também segundo SOARES *et al.* (2021), isso pode ser visto como um desafio adicional ao caso regulatório dos SAF no Brasil, uma vez que a falta de capacidade produtiva instalada obscurece as previsões que podem ser feitas mais concretamente acerca dos desafios gerais inerentes à implementação dos SAF, sob a ótica do marco regulatório. Assim, o autor conclui ainda que, no Brasil, caberá às autoridades certificadoras o papel de seguir ou quase que transpor os regulamentos, já bem delineados e apresentados pelo ASTM. No mais, os desafios principais se darão em torno da discussão de investimento em laboratórios, oficinas, fábricas e demais itens de infraestrutura, onde os processos e produtos SAF de fabricação brasileira poderão ser testados e acreditados pelas autoridades competentes.

4.5 A TAXAÇÃO SOBRE COMBUSTÍVEL: UM DESAFIO ADICIONAL NO BRASIL?

De acordo com CORTEZ *et al.* (2014), um aspecto bastante importante tratado pela comissão que tratou da elaboração da resolução ANP 20 de 2013, foi a questão tributária sobre o combustível no Brasil. Ali foi levado a cabo um estudo que concluiu que, enquanto voos internacionais não sofriam as consequências de altos impostos, os combustíveis de voos domésticos no Brasil chegavam a ser compostos por aproximadamente 25% do seu preço final ao consumidor somente por impostos.

Segundo a ABEAR (2022), há, de fato, uma disparidade entre os regimes de taxaço do combustível de voos domésticos e aquele de voos nacionais, conforme a citação disponibilizada no Website da instituição que reproduziremos abaixo.

“Nos primórdios da aviação, autoridades dos diversos países perceberam a necessidade de acordos para que as companhias aéreas recebessem um tratamento idêntico onde quer que fosse. (...)”

Para usufruir dos benefícios econômicos do setor, era preciso integrar as aviações nacionais. Assim, por exemplo, não se poderia cobrar de uma companhia francesa e de uma companhia brasileira valores diferentes pelo combustível nos voos entre os dois países. Esse foi um acordo fundamental da aviação internacional.

Porém, a história é diferente nos voos domésticos. No Brasil, o combustível usado nesses trajetos é taxado com uma alíquota do ICMS que varia de 12% a 25%, de acordo com a unidade federativa. Isso eleva custos e encarece desproporcionalmente as viagens aéreas nacionais.

É preciso corrigir essa distorção, em benefício de milhões de brasileiros. A redução ou eliminação da alíquota do ICMS sobre o combustível dos voos domésticos diminuiria significativamente os custos, abrindo espaço para tarifas ainda mais econômicas.” (ABEAR, 2022)

Assim sendo, consideramos aqui que o preço do combustível no Brasil principalmente relacionado à sua taxaçoão pode sim ser um desafio em particular, porém que por esta ótica, cujos maiores ônus são repassados ao consumidor final. Outras reivindicações em adição àquelas de taxaçoão exagerada, há ainda uma crítica ferrenha ao próprio sistema de taxaçoão de combustíveis em prática no Brasil, considerado ultrapassado e não adequado às necessidades de players e dinâmicas de mercado modernas.

No que tange ao SAF, não são esperados que muitos desafios à sua implementação em si surjam, dado que, como dito anteriormente, a oneração maior vai ao consumidor final do combustível. A missão das refinarias e distribuidoras é basicamente garantir que os custos de produção não se elevem devido às peculiaridades do mercado brasileiro já citadas ao longo deste ensaio, levando então a um combustível ainda mais caro do que aquele hoje já comercializado, o que levaria a uma completa insatisfaçoão de diversas partes interessadas da indústria local.

4.5.1 O caso Europeu: um incentivo para o combustível verde através de taxaçoão

Um caso que analisaremos brevemente antes de passarmos às conclusões deste ensaio é o cenário da União Europeia e a decisão da Comissão Europeia de dar um fim à taxação de combustíveis de aviação no continente.

Segundo ABNETT (2021), a Comissão Europeia elaborou planos para estabelecer uma alíquota mínima de imposto para combustíveis de aviação poluentes. A instituição do velho continente entende hoje que não mais cabe isentar um insumo tão poluente quanto o querosene de aviação e anunciou que irá elaborar um pacote de medidas para dar fim a esta política, que segue em prática no panorama europeu, um cenário muito diferente do brasileiro.

No entanto, a Comissão Europeia não para por aí e adiciona ainda que as regras fiscais da UE promovem os combustíveis fósseis em detrimento das fontes de energia verdes. Dessa forma, a nova proposta a ser posta em prática imporá um nível mínimo de imposto sobre produtos energéticos fornecidos como combustível para aeronaves para voos dentro da UE.

O projeto ocorreria de tal maneira que em 2023, a taxa mínima de imposto para o combustível de aviação começaria a zero e seria aumentada gradativamente ao longo de 10 anos, até se chegar à nova alíquota integral proposta, a qual não foi divulgada pela Comissão (ABNETT, 2021).

Aqui, então nos perguntamos: mas como isso pode contribuir para a quebra de algumas barreiras para o uso do SAF? Se falamos sempre de mais oneração, a questão não se torna apenas um debate fiscal e não um debate ecológico?

Como resposta, temos a parte mais interessante desta iniciativa: os combustíveis sustentáveis, incluindo os biocombustíveis avançados, não teriam de enfrentar impostos mínimos da UE durante esse período de 10 anos. Basicamente o que vemos é um grande empurrão para serem consumidos os combustíveis verdes de aviação, em detrimento do combustível fóssil tradicional. É algo que aparenta ser bastante inteligente e estar atualizado com as tendências de descarbonização da indústria que vemos hoje.

No entanto, é claro que uma série de outras questões estão envolvidas, principalmente aquelas relacionadas à oferta de combustível verde. Antes de uma iniciativa similar ser proposta para um país como o Brasil no intuito de se derrubarem barreiras, diversos outros fatores, principalmente aqueles considerados neste estudo devem ser estudados.

Dito isto, passaremos agora às conclusões e um breve sumário dos pontos principais elaborados neste ensaio, assim como uma enumeração dos principais desafios do cenário

geral e internacional, assim como do caso brasileiro em particular, na implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação – SAF.

5 FATORES DETERMINANTES E BARREIRAS À EXPANSÃO DOS SAF NO BRASIL: UMA SÍNTESE

Para concluirmos este estudo, retomaremos a pergunta primordial, citada na introdução, isto é: o quão longe está o Brasil na utilização de combustíveis sustentáveis no mercado local de aviação comercial e quais os principais desafios a partir de agora?

Dadas as informações, raciocínios e análises refletidas ao longo deste estudo, discutiremos sobre a seguinte tabela, que busca sumarizar os pontos principais de cada seção.

Área de desafio	Panorama Mundial	Caso brasileiro
Matéria-prima	<ul style="list-style-type: none"> • Desafio em manter a produção de matéria-prima também em caráter sustentável, sem utilização de recursos hídricos, fósseis ou desmatamento, sem comprometer sustentabilidade social • Debate sobre o uso do solo (plantar para alimentar ou plantar para abastecer?) • Resíduos lignocelulósicos e resíduos de gorduras e óleos mais factível. Desafio ainda na utilização de demais formas de matérias-primas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão continental do território nacional do Brasil e clima muito favoráveis ao cultivo de biomassa como matéria-prima • Grande quantidade de terra disponível para plantio, atrelada a boas leis de segurança trabalhista para os agricultores • Atualmente, há baixa utilização de recursos como lixo urbano, gases ou resíduo florestal
Técnicas de refino	<ul style="list-style-type: none"> • Diversas técnicas de refino de SAF estão disponíveis, incluindo álcool para jato “Alcohol to Jet (ATJ)”, açúcar direto para hidrocarbonetos (DSHC), pirólise rápida (FP) e gaseificação e Fischer- 	<p>São três as principais técnicas a serem utilizadas e sua situação para uso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boa situação da técnica “Alcohol to Jet”, dados os baixos níveis de investimento requeridos e

	<p>Tropsch (GFT)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cada uma possui suas peculiaridades na produção e nos custos atrelados, o que pode variar de acordo com a região / país, implicando diferentes vantagens ou desvantagens de cada técnica de refino 	<p>tecnologia disponível.</p> <p>Falta um plano comercial palpável e abrangente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fermentação de açúcares para hidrocarbonetos já é utilizada no país, porém o desenvolvimento adiante da tecnologia possui altos custos • Ésteres processados e ácidos gordos (para HEFA) estão disponíveis no mercado, porém a técnica requer altos custos na utilização de hidrogênio, o que pode ser amenizado pela integração deste processo em refinarias já existentes
<p>Infraestrutura e logística</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Por um lado, há países europeus, que possuem sistemas de conectividade de ferrovias altamente desenvolvidos em muitos casos, e de outro lado países que favorecem o sistema rodoviário, como os Estados Unidos. • Em outra instância existem países com alto grau de desenvolvimento de infraestrutura, como o Canadá, e outros como países da África 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande concentração no consumo de combustível em grandes aeroportos internacionais, situados próximos a refinarias, facilitando processo logístico • Aeroportos regionais brasileiros somente podem ser acessados por vias aéreas e / ou marítimas durante parte do ano, o que é visto como uma barreira logística • Aeroporto de Brasília, assim como outros aeroportos

	<p>Subsaariana em que a situação é oposta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disposição geográfica de cada país varia consideravelmente, o que também influencia na questão logística 	<p>menores estão situados no interior do país, longe de refinarias</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para o caso referido acima, o SAF pode se apresentar como uma solução, caso um cadeia de valor / supply chain adequada e bem planejada seja implementada
<p>Controle de qualidade e marco regulatório</p>	<ul style="list-style-type: none"> • O ASTM D4054 é o documento dos órgãos responsáveis nos Estados Unidos que baliza todas as diretrizes legais mundiais para a fabricação dos SAF • Todos os combustíveis que respeitam técnicas de refino tradicionais estão de acordo com essas diretrizes • No entanto, outras técnicas que não se originam de métodos tradicionais demandaram a criação de Anexos ao documento original, que regularizam diversas novas técnicas que surgem • Técnicas de refino mais populares já são cobertas pelos anexos 	<ul style="list-style-type: none"> • A ANP 17 / 2009 e a ANP 20 / 2013 são as duas resoluções que gerem os combustíveis de aviação e os SAF no Brasil assim como sua fabricação, distribuição e método • Os documentos no Brasil focam bastante nas diretrizes para importadores, produtores e comércio e menos em aspectos técnicos das metodologias de refino e / ou produção • No entanto, o documento faz referência direta ao ASTM D4054, informando que a produção a partir de certas técnicas deve ser feita nos mesmos moldes e recomendações da regulamentação internacional • Não há grande desafio para o Brasil a não ser replicar os padrões internacionais neste

		sentido
Taxação de combustíveis	<ul style="list-style-type: none"> • Como em todos os casos, há variedade no cenário de taxaço de combustíveis • Tomando o caso da União Europeia como referência, tem-se que na UE, existe uma isenço a taxas sobre combustíveis da aviao • A Comissao Europeia propoe atualmente que essas isençoes fiscais sejam removidas e que o querosene seja taxado • Por outro lado, os SAFs receberiam ainda uma alquota muito inferior ou isençoes consideráveis como forma de incentivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Não podemos nos referir ainda ao caso do SAF em particular, porém o sistema de precificação e taxaço do querosene de aviao é muito questionado pelos players da indústria • Por outro lado, soluçoes como aquelas similares ao caso europeu poderiam ser uma saída

Tabela 3: Quadro-Síntese de fatores determinantes e Barreiras

Elaboração própria do autor para este estudo

Dessa forma, resumizamos os pontos e argumentos principais de cada seção deste estudo. Passemos agora a responder à pergunta inicial, de forma a enumerar os desafios que podemos concluir que atualmente são inerentes ao caso brasileiro para a implementação dos combustíveis sustentáveis de aviao (“SAF”) no país para a sua utilização em maior escala do que a observada hoje.

Em primeiro lugar, fica claro que, em termos de matéria-prima, o desafio principal é organizacional. Isto porque o Brasil possui os recursos para a produção ampla de biomassa, o que já é realizado e não afeta de forma tão impactante como em outros países na produção de alimentos ou atividades agrícolas com outros fins. Ademais, apesar de não realizado, há sim potencial de utilização de dejetos urbanos como matéria-prima existe, dado o porte médio a grande das cidades brasileiras, sem mencionar as grandes metrópoles. Assim vê-se que o desafio principal está na organização das partes interessadas (governo, empresas privadas,

consumidores, etc.) para que 1) a produção da biomassa ocorra quando houver demanda e 2) a utilização de resíduos urbanos seja factível.

Em uma segunda instância, o desafio principal em termos de técnicas de refino não está relacionado à técnica em si. Na verdade, ele está basicamente atrelado a aspectos de custos e como estes se dão ao longo do processo produtivo. Como mencionado anteriormente, consideramos que 3 técnicas de refino são as que mais se adequariam ao caso brasileiro, tendo em vista a matéria-prima utilizada, tecnologia e insumos empregados. Há, por outro lado, uma série de maneiras de estes custos se mitigarem através de ganhos de sinergia na cadeia de valor e produção. Quando não houver saída aos altos custos, havendo interesse do Estado na sustentabilidade, este poderia entrar com formas de subsídio, isenções ou outras políticas, de forma a compensar inicialmente uma eventual perda de mark-up dos *players*.

Logo adiante, vemos a questão logística surgindo no Brasil enquanto um desafio. No caso de grandes aeroportos, dada a sua proximidade aos centros de produção de combustíveis, isso poderia não ser nem se quer considerado um desafio. Por outro lado, para os aeródromos situados no interior, temos um cenário oposto, dado que há a já hoje a dificuldade em fazer chegar de forma eficiente e barata os combustíveis tradicionais. Por outro lado, como no exemplo citado sobre o aeroporto de Brasília, soluções como a instalação de *blending points* adjacentes aos aeroportos – que por sua vez estão localizados próximos a áreas de atividade agrícola – que poderiam amenizar os efeitos desta barreira logística e geográfica.

Em termos de controle de qualidade e marco regulatório, podemos talvez considerar que existe já uma legislação vigente e que ela, de certa forma, não possui grandes diferenças em termos técnicos sobre a produção de SAF. Por outro lado, algumas restrições sobre quem produz, importa, exporta e distribui podem ser vistas ainda como um obstáculo, o que na realidade está atrelado a um caráter muito mais comercial e sobre o papel do estado, do que sobre a factibilidade técnica dos SAF no Brasil.

Por fim, chegamos à questão fiscal, que é sempre um desafio no Brasil, dada a complexidade do sistema tributário e as altas taxas sobre combustíveis, em especial o de aviação. Que isso é um desafio inerente à produção de quase qualquer tipo no Brasil, já sabemos. Por outro lado, como citamos acima, a depender da diretriz estatal, os incentivos certos e fiscalmente sustentáveis podem ser alcançados.

Com este trecho, passamos à conclusão final deste ensaio, à medida que se busca chamar atenção de um ponto fundamental sobre a questão da implementação dos combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil. Obstáculos e desafios existem e serão um empecilho na chegada dessa nova modalidade de matriz energética. No entanto, já é

amplamente conhecida a situação climática e ambiental mundo afora, o que demanda mudanças e ações em particular de governos, cidadãos e empresas. Apesar de haver desafios, é claro que saídas e soluções existem.

Nesse sentido faz-se necessário uma ação governamental bem embasada e articulada, que deve liderar um processo de redesenho da matriz energética (não só da aviação, mas completa), e que envolve todas as partes interessadas neste processo. Assim, caminha-se para o cenário e o debate de sustentabilidade e respeito ao meio-ambiente, que tanto é levado a cabo hoje no cenário internacional. Situar o Brasil neste debate é que é o primeiro passo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema das SAF vem se tornando um dos mais relevantes no debate acerca da sustentabilidade ambiental do transporte aéreo moderno. Por outro lado, a indústria ainda enfrenta diversos desafios e barreiras à implementação dos novos combustíveis sustentáveis da aviação no Brasil e no mundo. Nesse sentido, buscamos ao longo deste trabalho mapear estes desafios sob uma perspectiva da indústria aérea, especificamente para o caso do Brasil.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho geral pode ser considerado cumprido, uma vez que, para as diversas áreas estudadas – Matéria-prima, Técnicas de refino, Infraestrutura e logística, Controle de qualidade e marco regulatório e Taxação sobre combustíveis – pudemos identificar, de maneira geral, os desafios mais latentes à implementação do uso dos SAF na aviação brasileira. Mapeamos ao longo deste estudo as principais barreiras à fabricação, distribuição e utilização desta nova forma de combustível no mercado nacional. Ademais, pudemos utilizar como pontos de partida, aquilo que é compreendido como o quadro geral dos desafios aos SAF no cenário internacional.

Em termos de objetivos específicos, tínhamos como primeiro identificar de forma geral os principais desafios para a produção, distribuição e utilização dos SAF, como substituto do querosene de aviação, em termos da cadeia de fornecimento (“*supply chain*”) desde a produção até a chegada nos tanques de aeronaves. Podemos dizer que, de forma geral, os desafios inerentes a estes aspectos específicos foram identificados ao longo deste ensaio. No mais, futuras pesquisas são recomendadas no sentido de se apurar desafios secundários a estas áreas.

Em relação ao segundo objetivo específico deste estudo, que, por sua vez, se tratava de encontrar e salientar desafios particulares ao caso brasileiro para o uso dos SAF, podemos considerar que, para o momento atual da indústria produtora de combustíveis sustentáveis brasileira, bons resultados foram alcançados ao longo deste estudo. Por outro lado, recomenda-se que o mapeamento de desafios do caso brasileiro apresentado ao longo deste ensaio seja atualizado à medida que a indústria brasileira produtora de SAF se desenvolva, novas plantas estejam em funcionamento e exista no mercado um produto brasileiro de combustível sustentável de aviação substituto ao querosene tradicional.

Por outro lado, menos resultados foram encontrados em termos do terceiro objetivo específico inicial: sugerir de forma superficial o papel das partes interessadas na promoção do uso do SAF no Brasil. Apesar de o tema ter sido tangenciado ao longo deste ensaio, recomenda-se que uma pesquisa mais aprofundada centrada somente nesta temática seja

desenvolvida, à medida que a produção de SAF tanto em outros países como no Brasil se desenvolva melhor. Assim ficará cada vez mais transparente, à medida que dinâmicas de mercado se estabelecem e se desenvolvem, qual o papel de agências reguladoras, produtores de combustível, distribuidores, linhas aéreas, entre outros.

Em relação à hipótese inicial de que o Brasil possui maiores desafios à implementação dos SAF no mercado local de aviação comercial, podemos dizer que estava parcialmente correta. Como vimos anteriormente ao longo deste estudo, o Brasil não só dispõe de dimensões extensas, mas também lacunas de infraestrutura de transporte e logística consideráveis, o que torna a produção e distribuição um desafio. Soma-se a isso os desafios em relação à dinâmica do mercado de combustíveis local. Ademais, devemos mencionar também que o Brasil se encontra ainda em um estágio muito incipiente da realização de investimentos em plantas locais de produção de SAF, o que, de certa forma, obscurece a previsibilidade dos desafios e barreiras.

Por outro lado, podemos dizer que, de maneira geral, obtivemos bons resultados na consolidação de colocações da literatura existente sobre os desafios brasileiros para a utilização ampla de SAF no mercado de aviação local. Esta problemática foi abordada através de pesquisas de artigos científicos, jornais, livros e demais obras de autores a partir de palavras-chave relacionadas aos temas principalmente de mercado de combustíveis tradicional, sustentabilidade, novos combustíveis alternativos, aviação, entre outros. Dessa forma, foi lida a bibliografia encontrada e, havendo necessidade, mais obras eram pesquisadas sob demanda para temas específicos. A descrição do conteúdo relevante da literatura foi, então, compilada neste estudo ao longo do tempo de pesquisa de, aproximadamente, cinco meses. No mais, não somente literatura acadêmica foi considerada, mas também informações e dados disponíveis publicados por empresas e instituições da área da aviação e / ou combustíveis.

REFERÊNCIAS

ABEAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. **Prioridades do setor:** tributação, 2022. Disponível em: <http://panorama.abear.com.br/prioridades-do-setor/tributacao/>. Acesso em: 14 fev. 2022.

ABNETT, Kate. Draft shows EU to propose aviation fuel tax in green policy push.

REUTERS, Londres, 04 de jul. de 2021. Disponível em:

<https://www.reuters.com/business/sustainable-business/draft-shows-eu-propose-aviation-fuel-tax-green-policy-push-2021-07-04/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

ARGUS. **Jet Fuel Insights:** The move to SAF in Latin America. 31 ago. 2021. Disponível em:

<https://www.argusmedia.com/en/blog/2021/august/31/podcast-jet-fuel-insights-the-move-to-saf-in-latin-america>. Acesso em 30 mar. 2022.

ASCENT. ASTM D4054 Clearinghouse. Disponível em: <https://ascent.aero/publication/astm-d4054-clearinghouse/>. Acesso em: 1 mar. 2021.

ASTM. ATSM D4054-22: Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives. Disponível em: <https://www.astm.org/d4054-22.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

ASTM. ATSM D7566-21: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthetized Hydrocarbons, Disponível em: <https://www.astm.org/d7566-21.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

ATAG. **Beginner's guide to Sustainable Aviation Fuel**, Disponível em:

https://aviationbenefits.org/media/166152/beginners-guide-to-saf_web.pdf. Acesso em 28 mar. 2022.

BALDINO, C.; BERG, R.; PAVLENKO, N.; SEARLE, S. Advanced alternative fuel pathways: Technology overview and status. International Council on Clean Transportation,

2019. Disponível em: <https://theicct.org/publications/advanced-alternative-fuel-pathways>.

Acesso em: 14 abr. 2022.

BAZANELLA, A. M.; AUSFELDER, F. Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. European Chemical Industry Council. 2017. Disponível em:

<https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/a-journey-to-sustainability/low-carbon-energy-andfeedstock-for-the-european-chemical-industry-study/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

BRITISH PETROLEUM. **BP Website**, 2022. What is Sustainable Aviation Fuel (SAF)?.

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: 23 fev. 2022.

CHIARAMONTI, D. Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. **Revista Energy Procedia**, Innovative Solutions for Energy Transitions. [s. l.], v. 158, p. 1202–1207.

1 fev. 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219303285>. Acesso em: 24 mar. 2022.

CORTEZ, Luís *et al.* **Roadmap for sustainable Aviation Biofuels for Brazil: A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil**. 1a edição. Sao Paulo: Blucher, 2014.

DEL GATTO, A.; MELILLI, M. G.; RACCUA, S. A.; PIERI, S.; MANGONI, L.;

MENGARELLI, C. A comparative study of oilseed crops (*Brassica napus* L. subsp. *Oleifera* and *Brassica carinata* A. Braun) in the biodiesel production chain and their adaptability to different Italian areas. 2015. **Jornal Industrial Crops and Products**, [s. l.] 75, 98–107.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.029>. Acesso em 24 mar. 2022.

FRAGOUL, Anmar. Sustainable aviation fuel costs more but consumers will be willing to pay, IATA chief says. **CNBC**, New Jersey, 11 fev. 2022. Disponível em:

<https://www.cnbc.com/2022/02/11/sustainable-aviation-fuel-costs-more-but-consumers-willing-to-pay-iata.html>. Acesso em 28 fev. 2022.

GELEYNSE, S. *et al.* The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation. **Revista CHEMSUSCHEM**, [s. l.], v. 11, n. 21, p. 3728-3741.

Setembro 2018. Disponível em: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.201801690>. Acesso em: 18 jan. 2022.

HOLLADAY, J; ABDULLAH, Z; HEYNE, J. **Sustainable aviation Fuel: Review of Technical Pathways**. Setembro de 2020. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022

IATA. IATA Website: Sustainable Aviation Fuel Factsheet. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-fact-sheet-2019.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

KAUR, P. *et al.* Recent advances in utilization of municipal solid waste for production of bioproducts: A bibliometric analysis. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, Ontario, Canada, Jul. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016421000864>. Acesso em mar. 2022.

MAGDOFF, F.; VAN ES, H. **Building soils for better crops: ecological management for healthy soils**. 3a edição. Maryland: University of Maryland Printing, 2010.

MAYLLEY, J.; PAVLENKO, N.; SEARLE, S. Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand. **International Council on Clean Transportation**, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf>. Acesso em 25 mar. 2022.

NASLAUSKI, M. G.; HENKES, J. A. Fontes Alternativas de energia para a aviação: uma análise sobre o uso de energias renováveis. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 103–126, 2021. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/8>. Acesso em: 28 mar. 2022.

PADELLA, M.; O` CONNELL, A.; PRUSI, M. What is still limiting the deployment of cellulosic ethanol: analysis of the current status of the sector. **Jornal Applied Sciences**, [s. l.]

9 (21), p. 4523. Basel, 2019. Disponível em:

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117955>. Acesso em 15 abr. 2022.

PAVLENKO, N. Canada's clean fuels standard is increasingly out of sync with Canada's climate ambitions. **International Council on Clean Transportation**, 2019. Disponível em:

<https://theicct.org/canadas-clean-fuels-standard-is-increasingly-out-of-sync-with-canadas-climate-ambitions/>. Acesso em: 13 abr. 2022.

RUMIZEN, M. Aviation Biofuel Standards and Airworthiness Approval. In:

KALTSCHMITT, M.; NEULING, U. (Eds.). *Biokerosene - Status and Prospects*. 1a edicao. Nova Iorque: Springer, 2018.

RYE, L.; BLAKEY, S.; WILSON, C. W. Sustainability of supply or the planet: a review of potential drop-in alternative aviation fuels, *Energy & Environmental. Revista Energy Environmental Science*, Londres, 2010, [s. l.], v. 3, p. 17 – 27. Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/ee/b918197k>. Acesso em 30 mar. 2022.

SEARLE, S.; MALINS, C. J. Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. **Revista Biomass and Bioenergy**, Londres, 2016, [s. l.] v.89, p. 2–10. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.008>. Acesso em: 18 mar. 2022.

SEARLE, S.; MALINS, C.; BARAL, A. Wasted: An assessment of advanced biofuels from wastes & residues. **International Council on Clean Transportation**, 2014. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/WASTED-final.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.

SEARLE, S.; PAVLENKO, N.; TAKRITI, S. E.; Bitnere, K. Potential greenhouse gas savings from a 2030 greenhouse gas reduction target with indirect emissions accounting for the European Union. **International Council on Clean Transportation, 2017. Disponível em:** <https://theicct.org/publications/potential-greenhouse-gas-savings-2030-greenhouse-gas-reduction-target-indirect>. Acesso em 15 abr. 2022.

SOARES, G.; PINTO JR., H.; MARTINS, J. Arcabouço Regulatório e diretrizes de políticas: os desafios para regulamentação de combustíveis sustentáveis de aviação *drop-in*. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.] v. 27, n.1, p. 40-57, Rio de Janeiro, 1º Trimestre 2021.

STATISTA. **Statista Homepage**, Fuel costs of airlines worldwide from 2011 to 2022, as percentage of expenditure, 2022. Disponível em:

<https://www.statista.com/statistics/591285/aviation-industry-fuel-cost/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

STATISTA. **Statista Homepage**, Total fuel consumption of commercial airlines worldwide between 2005 and 2022, 2022. Disponível em:

<https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SYNHELION. **Synhelion Homepage**, 2022. Solar fuels and their role in achieving net zero.

Disponível em: <https://synhelion.com/news/solar-fuels-and-their-role-in-achieving-net-zero>. Acesso em: 23 fev. 2022.

TOLDRÁ-REIG, F; MORA, L.; TOLDRÁ, F. Trends in biodiesel production from animal fat waste. **Jornal Applied Sciences**, [s. l.] 10, p. 3644. Basel, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/app10103644>. Acesso em: 15 abr. 2022

UNITED STATES FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA); PRATT & WHITNEY. **Evaluation of Amyris Direct Sugar to Hydrocarbon (DSHC) Fuel:**

Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) Program. 2014. Disponível em:

https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/office_org/headquarters_offices/apl/PW_Amyris_Final.pdf. Acesso em: 23 mar. 2022.

ZHENG, X.; RUTHERFORD, D. Fuel Burn of New Commercial Jet Aircraft: 1960 to 2019.

International Council on Clean Transportation, 2020. Disponível em:

<https://theicct.org/publication/fuel-burn-of-new-commercial-jet-aircraft-1960-to-2019/>.

Acesso em: 28 jan. 2022.