

Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade

*Aviation biofuels in Brazil: an
agenda of sustainability*

Artur Yabe Milanez
Guilherme Baptista da Silva Maia
Diego Duque Guimarães
Cleiton Leandro Alves Ferreira*

* Respectivamente, administrador do BNDES e mestre em economia pelo IE/UFRJ; economista do BNDES e doutor em economia pelo IE/UFRJ; economista do BNDES e mestre em economia pela UFV; e estagiário de economia do BNDES. Este artigo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES.

Respectively, administrator at the BNDES with a master's degree in economics at IE/UFRJ; economist at the BNDES with a doctorate degree in Economics at IE/UFRJ; economist at the BNDES with a master's degree in economics from UFV; and economic intern at BNDES. This article is the sole responsibility of the authors, and does not necessarily reflect the opinion of the BNDES.

Resumo

No Acordo de Paris, adotado na COP 21, o Brasil assumiu uma série de compromissos internacionais para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Entre as medidas possíveis de serem tomadas com esse objetivo, destaca-se a ampliação do uso de biocombustíveis. Apesar de ter uma sólida produção de combustíveis sustentáveis para veículos automotores, não há no país desenvolvimento relevante na produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). No entanto, o Brasil tem uma robusta produção agropecuária que gera grande quantidade de resíduos e, conseqüentemente, de matéria-prima de baixo custo. Ao mesmo tempo, tem um mercado interno de transporte aéreo bem desenvolvido e com grande potencial de crescimento. Aliados a esses fatores, a disponibilidade tecnológica e um conjunto de políticas públicas também podem ser utilizados para fomentar a produção e uso desses biocombustíveis na aviação. Juntas, essas circunstâncias garantem ao Brasil condições privilegiadas para se tornar um grande produtor de SAFs.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Biocombustíveis de aviação.

Abstract

In the Paris Agreement, signed at COP 21, Brazil assumed a series of international commitments to reduce the emission of greenhouse gases. Among the possible measures to be implemented in order to achieve this objective, the expansion of the use of biofuels is highlighted. Despite having a solid production of sustainable fuels for motor vehicles, there is no relevant development in Brazil regarding the production of sustainable aviation fuels. However, the country has a robust agricultural production, generating a large amount of waste and, consequently, low-cost raw material. At the same time, it has a well-developed domestic aviation market with great growth potential. In addition to these factors, the availability of technology and a set of public policies can also be used to promote the production and use of these aviation biofuels. Together, these conditions guarantee to Brazil privileged conditions to become a major producer of SAFs.

Keywords: Sustainability. Aviation biofuels.

Introdução

É cada vez mais consensual a necessidade de se abandonar uma economia baseada na emissão de gases de efeito estufa (GEE) e caminhar em direção a uma economia de baixos níveis de emissões. Objetivamente, desde a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), realizada em Paris, dezenas de países formalizaram metas para redução das emissões de GEE, conhecidas como contribuições nacionalmente determinadas (NDC, ou em inglês *intended nationally determined contribution* – INDC). O Brasil, por exemplo, comprometeu-se a diminuir suas emissões em 37% até 2025, ampliando esforços até atingir a meta de redução de 43% em 2030.

Em novembro de 2021, a cidade de Glasgow, Escócia, sediou a 26ª Conferência das Partes (COP 26), que ressaltou a urgência de se acelerar a transição para uma economia carbono neutra, ou seja, de se alcançar um resultado líquido de zero emissões. Com esse intuito, uma das estratégias mais importantes é a descarbonização da matriz de transportes, na qual os biocombustíveis exercem um papel central.

Nesse contexto, o Brasil, conhecido internacionalmente por ser uma potência agropecuária e por ter uma das mais bem-sucedidas experiências na produção e distribuição de biocombustíveis para veículos automotores, tem muito a contribuir.

Essa experiência permitiu ao país constituir uma grande infraestrutura para armazenagem e distribuição de biocombustíveis. Ao longo do tempo, possibilitou também o aprimoramento de políticas públicas que, além de tornarem mandatórias determinadas misturas aos combustíveis fósseis, geraram incentivos ao uso de biocombustíveis e à redução de emissões de GEE.

Entre os mercados potenciais de biocombustíveis ainda inexplorados no país encontra-se a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF, do inglês *sustainable aviation fuels*). Além de uma aviação doméstica bem desenvolvida e com grande potencial de crescimento, há ainda amplas oportunidades para exportação tendo em vista os compromissos de redução de emissão de GEE assumidos pela indústria de aviação a nível global.

Este artigo busca sistematizar os principais argumentos utilizados para justificar que há, no Brasil, condições privilegiadas para o desenvolvimento de uma indústria de produção de SAFs. Para tanto, está organizado em três seções além desta pequena introdução. Na primeira, descreve-se o conjunto de compromissos assumidos pela indústria da aviação internacional para reduzir suas emissões de GEE, bem como as estratégias para o atingimento das metas (entre as quais destaca-se a ampliação do uso de SAFs). Em seguida, explora-se o significado dos biocombustíveis de aviação e as principais rotas tecnológicas consagradas para a sua produção. A terceira seção reúne as razões do potencial brasileiro para a produção de SAFs. Por fim, são tecidos alguns comentários à guisa de conclusão.

A indústria de aviação e os mecanismos de redução de emissões

Quando se observa a evolução da demanda internacional por transporte aéreo, percebe-se que, há mais de uma década, ocorre um crescimento estável. O valor total de passageiros-quilômetros transportados pagos (RPK, do inglês *revenue passanger kilometers*) –

indicador utilizado internacionalmente e adotado pela Associação Internacional de Transporte Aéreo (International Air Transport Association – IATA) para mensurar o crescimento da demanda por voos – vinha se elevando ano a ano até 2019, quando cresceu 4,2%. Essa expansão foi drasticamente interrompida pela pandemia de Covid-19 (IATA, 2020).

O impacto deu-se inicialmente sobre a China, mas, à medida que o vírus foi se espalhando pelo mundo, os efeitos sobre a aviação se tornaram globais, chegando em abril de 2020 ao seu ápice, quando o tráfego de passageiros se reduziu em 94% em relação ao mesmo mês do ano anterior. A recuperação desde então tem se revelado lenta, e o RPK apresentou declínio de 66% em 2020 (IATA, 2020). Isso teve impacto sobre a eficiência do uso de combustíveis.

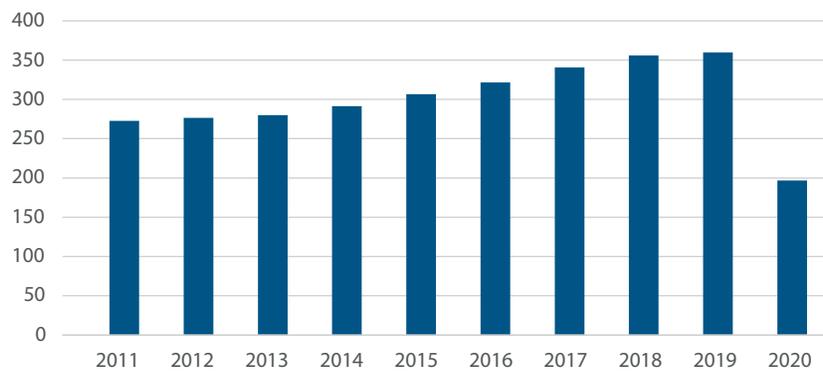
Uma forma usual de mensurar a eficiência energética é calcular a razão entre RPK e assentos-quilômetros oferecidos (ASK, do inglês *available seat kilometers*), que corresponde à medição da eficiência pela qual os assentos são preenchidos, ou seja, à taxa média de ocupação. Quanto maior for a ocupação dos assentos, menor será o consumo por passageiros. Com a crise recente, esse indicador, que era de 82,5% em 2019, caiu para 65,1% em 2020 (IATA, 2021).

A recuperação do tráfego aéreo tem sido assimétrica entre os mercados, sendo que os domésticos foram os que apresentaram recuperação mais robusta. Isso porque os governos nacionais impuseram diversas barreiras sanitárias com o intuito de combater a disseminação do vírus em seus países, o que teve consequências deletérias sobre o tráfego aéreo internacional.

O tráfego aéreo de carga, em grande medida essencial, sofreu impacto bem menor, tendo se reduzido em cerca de 25% entre 2019 e 2020. Vale ressaltar que há um problema de limitação da oferta porque, antes da crise, quase metade das cargas eram transportadas por aeronaves de passageiros. Apesar disso, a recuperação tem sido mais vigorosa, aproximando-se dos níveis pré-crise (IATA, 2021).

Espera-se que com o fim da crise da Covid-19 o tráfego aéreo retorne à taxa de crescimento anterior, colocando a questão das emissões de GEE de volta no centro das preocupações. Portanto, para efeito de estimativas de consumo de combustível e emissões, deve-se considerar os níveis anteriores a 2019, excluindo as quedas decorrentes da pandemia. A evolução no gasto de combustível pode ser observada no Gráfico 1.

Gráfico 1 • Consumo global de combustível de aviação (milhões m³)



Fonte: Elaborado a partir de dados de Iata (2020), Atag (2020) e Icao (2019).

No ano de 2019, o consumo de querosene de aviação (QAV) pela indústria aérea foi de cerca de 360 milhões de m³, representando um gasto de US\$ 188 bilhões e respondendo pela emissão de 914 milhões

de toneladas de CO₂ – aproximadamente 2% das emissões totais de responsabilidade humana no planeta (ATAG, 2020).

O Acordo de Paris, celebrado em 2015 na COP 21 da UNFCCC, estabeleceu um compromisso dos signatários para a redução da emissão de GEE a partir de 2020, mas não incluiu a aviação internacional entre os setores regulados. No entanto, membros da Iata, que reúne 290 companhias aéreas de 120 países, se comprometeram com diversas metas de redução de emissões, a saber:

- aprimorar o consumo de combustível, reduzindo-o 1,5% a.a. de 2009 a 2020;
- manter crescimento neutro de carbono a partir de 2020; e
- reduzir as emissões líquidas de dióxido de carbono em 50% até 2050, tendo como base o ano de 2005 (IATA, 2013) – em outubro de 2021, a 77^a Assembleia Geral da Iata aprovou uma resolução para alterar a meta, de forma a zerar as emissões líquidas.

A forma de se atingir essas metas é estruturada a partir de quatro estratégias:

- desenvolvimento de novas tecnologias para *design* de aeronaves e motores mais eficientes;
- melhorias operacionais e otimização da infraestrutura e do uso do espaço aéreo;
- uso de instrumentos econômicos;
- uso de biocombustíveis (IATA, 2013).

O atingimento das metas ambientais estabelecidas dependerá do conjunto dessas ações, que serão detalhadas a seguir.

Desenvolvimento de novas tecnologias

Ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento de novas aeronaves tem continuamente contribuído para torná-las mais eficientes, reduzindo o consumo de combustível. Isso se deve ao investimento em pesquisa e desenvolvimento, realizado como atividade essencial nas companhias que fabricam aeronaves e motores. A Iata estima que a evolução tecnológica possa elevar a eficiência no consumo de combustíveis em cerca de 30% por volta de 2030, se comparada aos padrões de 2005 (IATA 2013).

Na medida em que as companhias aéreas investem altos valores na aquisição de novas aeronaves – a Iata (2020) estima que, ao longo da próxima década, essas empresas devam despender cerca de US\$ 1,3 trilhão em novos aviões –, há um incremento sistemático na eficiência das que já estão em atividade.

Em 2013, a Iata publicou um estudo intitulado *Aircraft technology roadmap to 2050*, no qual avaliou as possibilidades tecnológicas e seus potenciais impactos sobre a redução das emissões de CO₂ em cenários variados. As tecnologias foram consideradas de acordo com o horizonte de tempo para sua implementação.

Em um primeiro grupo estariam aquelas já disponíveis e suas evoluções, que abrangem novos materiais, estruturas, aprimoramentos aerodinâmicos, equipamentos e propulsão. Note-se que elas podem ser adotadas em novas aeronaves, mas também, em diferentes graus, por meio de adaptações (*retrofits*) ou *upgrades* nas aeronaves em operação (IATA, 2013).

No segundo grupo estariam as chamadas inovações radicais, que, em tese, têm elevado potencial para redução das emissões de GEE.

Entre as novas configurações de fuselagem vistas como as mais promissoras, estão as alterações na asa (tais como novos suportes de asa e a integração da asa à fuselagem da aeronave, gerando a configuração *blended wing-body* – BWB). Embora há muito tempo os BWBs venham sendo considerados uma solução otimizada para aeronaves muito grandes, recentemente tornou-se realista projetar corpos únicos de fuselagem para aviões de menor porte (IATA, 2013).

As tecnologias já disponíveis combinadas podem levar a economias de até 30% no consumo de combustível, mas, à medida que forem implementadas, vão se reduzindo os impactos e sua capacidade de propiciar novos aumentos de eficiência. Por outro lado, não é possível, *a priori*, mensurar o impacto das tecnologias revolucionárias. Dito de outro modo, dadas as limitações, deve-se buscar outras formas de obter ganhos de eficiência.

Cabe aqui uma menção a formas alternativas de propulsão de aeronaves que estão em análise pelas grandes empresas, notadamente os motores elétricos e a célula de hidrogênio.¹ A Boeing já trabalha com protótipos de pequenos aviões com um sistema de propulsão formado por baterias de lítio e uma célula de combustível que utiliza hidrogênio para gerar energia elétrica. A empresa considera a tecnologia viável para substituir motores convencionais, tendo o sistema sido avaliado para operar em voos de cruzeiro, fora das etapas de decolagem e subida.

A Airbus também vem realizando testes com hidrogênio. Após uma primeira etapa, na qual se concentrou em motores elétricos para pequenos aviões, a empresa se voltou para a célula de

¹ Houve outras experiências com o uso de combustíveis alternativos. Entre elas, cabe mencionar o Ipanema EMB -202A, primeira aeronave movida a etanol.

hidrogênio como uma rota tecnológica com maiores possibilidades de sucesso. A companhia tem em andamento o programa ZEROe, que busca desenvolver aeronaves conceito que utilizem células de hidrogênio.²

A despeito de serem consideradas promissoras, há várias dificuldades operacionais relacionadas ao uso dessas fontes alternativas de propulsão, que dependerão de desenvolvimentos tecnológicos substanciais para serem sanadas. A própria Airbus considera que não será possível viabilizar esse tipo de aeronave em escala comercial antes de 2050 (HEPHER; FROST, 2021).

Melhorias operacionais, otimização da infraestrutura e uso do espaço aéreo

A eficiência nas operações de tráfego aéreo e no uso da infraestrutura aeroportuária tem impactos significativos sobre o consumo de combustível. O planejamento não otimizado de rotas, a necessidade de dar voltas esperando para aterrissar, bem como o excesso de deslocamentos em solo e o carregamento de pesos supérfluos são exemplos rotineiros de gastos desnecessários de combustível que podem ser minimizados (WORLD BANK GROUP, 2012).

Consequentemente, a melhoria dos sistemas e procedimentos de navegação, a otimização dos procedimentos de pouso, decolagem e taxiamento, a dinamização das filas e a diminuição do tempo gasto nos terminais aéreos podem contribuir significativamente para reduzir o consumo de combustível. As empresas aéreas e os operadores de terminais têm se engajado cada vez mais em aperfeiçoar esses

2 Ver Sillers (2020).

procedimentos. Atualmente, por exemplo, é cada vez mais usual a aeronave taxiar utilizando um único motor ou o taxiamento elétrico.³

Há ainda iniciativas para melhorar o tráfego aéreo. Nos Estados Unidos da América (EUA), a Federal Aviation Administration vem implementando o Next Generation Air Transportation System (Nextgen), que torna o controle de tráfego baseado em satélites, automatizado e digital. Além de aumentar a segurança e a eficiência no uso do espaço aéreo, o Nextgen tem implicações óbvias de redução no consumo de combustível (UNITED STATES, [2021]).

Na União Europeia, o Single European Sky ATM Research Programme (Sesar) busca coordenar todas as iniciativas de pesquisa e desenvolvimento do tráfego aéreo europeu, de forma a diminuir o consumo de combustível por voo em cerca de 50% até 2035. Essas iniciativas compreendem um gerenciamento dinâmico com a utilização de ferramentas virtuais, como a disponibilização de informações em nuvens digitais e a integração e racionalização do uso conjunto de toda a infraestrutura disponível (SESAR, [2021]).

No Brasil, o programa Sirius (BRASIL, [2021]) vem há anos buscando otimizar o uso do espaço aéreo, seja pela utilização de novas soluções tecnológicas, seja pelo aprimoramento dos procedimentos operacionais. A iniciativa reflete uma contínua elevação na segurança e eficácia do sistema de controle aéreo, ampliando a eficiência na gestão da navegação aérea e, conseqüentemente, contribuindo para a redução das emissões de GEE.

3 O sistema de taxiamento elétrico usa um gerador (unidade auxiliar de energia) para alimentar motores elétricos nos trens de pouso e permite às aeronaves se deslocar em solo sem utilizar os motores principais.

Instrumentos econômicos

Há várias alternativas de instrumentos econômicos a serem adotados que possibilitam a redução de emissões no transporte aéreo, sendo as principais o uso de tributos, a comercialização de emissões e os mecanismos de compensação de emissões de GEE. Os tributos podem ser utilizados para incentivar ou desestimular determinadas ações relativas à maior ou menor emissão. Já no comércio de emissões são estabelecidos limites máximos que são distribuídos aos participantes. Esses limites são quantificados em “unidades de emissão”, que podem ser transacionadas entre os participantes do mercado. Por fim, no sistema de compensações, a redução das emissões ocorre em outro lugar ou setor, gerando créditos de carbono que são utilizados para mitigar as emissões realizadas pelo participante da indústria de aviação (ICAO, 2015).

Para evitar que houvesse dispersão de medidas tomadas por diferentes países em tempos diferentes, a indústria de aviação optou pela adoção de um mecanismo de compensação global de emissões, denominado Carbon Offsetting and Reduction Scheme For International Aviation (Corsia), estruturado no âmbito da International Civil Aviation Organization (Icao).⁴ Com isso, potencialmente se reduz o custo de adequação a possíveis múltiplos esquemas de redução nacionais ou regionais (ICAO, 2021).

A 39^a Assembleia da Icao, realizada em 2016, decidiu pela implementação do Corsia em fases. Primeiramente, até 2026, contemplando os países que decidissem aderir ao esquema voluntariamente, e

4 A Icao é um órgão da Organização das Nações Unidas (ONU) com sede em Montreal, no Canadá, responsável pela coordenação de normativos, políticas públicas e regimentos técnicos para seus estados-membros.

posteriormente, incluindo todos os países que, por um conjunto de critérios estabelecidos, têm significância na aviação internacional.⁵

Há um entendimento na indústria de aviação de que, embora relevantes, os mecanismos anteriormente descritos têm limites frente à esperada retomada na demanda por transporte aéreo. Há barreiras para a melhoria da eficiência operacional, para os incrementos de tecnologia disponíveis e mesmo limitações aos mercados de comercialização de títulos e medidas compensatórias de emissões, que podem contribuir somente até certo ponto. Por exemplo, quando se trata de projetos para gerar créditos de carbono, deve-se observar se eles têm adicionalidade, ou seja, se esses projetos já não aconteceriam em outras condições, como parte da trajetória de emissões esperada. Dessa forma, o atingimento das metas ambientais propostas pelo setor será em grande parte dependente da adoção crescente de SAFs.

Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) e biocombustíveis

Em linhas gerais, SAFs são combustíveis não fósseis produzidos de forma sustentável – note-se que o termo é mais genérico do que biocombustíveis. Embora o atual desenvolvimento tecnológico permita a produção de SAFs a partir de diversas fontes, como resíduos de materiais plásticos ou pneus, as principais matérias-primas têm origem animal ou vegetal, tais como sobras de produção vegetal ou resíduos sólidos urbanos. Por conta disso, é usual que os SAFs sejam

5 Em linhas gerais, o critério de relevância está relacionado ao montante de toneladas-quilômetros transportados pagos (RTK). Para detalhes, ver Icao (2016).

frequentemente chamados simplesmente de biocombustíveis de aviação, ou ainda de bioquerosene de aviação (BioQAV).

As características físico-químicas dos SAFs são tais que eles podem ser misturados aos combustíveis tradicionais sem nenhuma alteração na qualidade e sem necessidade de qualquer adaptação nos motores das aeronaves, além de permitirem que a mesma infraestrutura de armazenamento e transporte existente seja utilizada. É possível sumarizar esses atributos ao dizer que os SAFs são *drop-in*, isto é, podem ser adicionados aos combustíveis convencionais em qualquer proporção (ICAO, 2017).

A despeito de, em 2020, os SAFs corresponderem a apenas 0,1% do total do consumo de combustíveis de uso aeronáutico, estima-se que com incentivos adequados seja possível chegar em poucos anos a cerca de 2,5% do total. O desenvolvimento da cadeia de produção e comercialização tem ganhado tração, com acordos consolidados de compra de SAFs de cerca de 6 bilhões de litros em 2020. Estima-se que algo em torno de 250 mil voos realizados tenham utilizado combustível com alguma mistura de SAFs no mesmo ano (RSB, 2021).

Há várias rotas possíveis para a produção de SAFs, sendo algumas já certificadas pela American Society for Testing and Material (ASTM) – órgão dos EUA que estabelece os padrões e normas técnicas dos combustíveis de aviação, garantindo a qualidade antes e depois da mistura ao querosene fóssil. Assim, são assegurados os padrões de segurança no uso pelas aeronaves. As principais rotas certificadas são (ICAO, 2017):

- I. Rota HEFA – querosene parafínico sintetizado por hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos. Lipídios e hidrocarbonetos são obtidos a partir de óleos naturais

(animais e vegetais) por meio de hidrogenação e, posteriormente, fracionados para se obter um combustível que pode ser adicionado até um limite de 50% aos combustíveis tradicionais.

- II. Rota Fischer-Tropsch (FT) – querosene parafínico produzido principalmente a partir de biomassas, tais como resíduos agrícolas e resíduos sólidos urbanos. Essas matérias-primas são gaseificadas e o gás resultante é convertido por um processo FT de síntese em hidrocarbonetos líquidos. O combustível resultante é muito semelhante ao QAV tradicional, porém sem a presença de aromáticos. Contudo, há a possibilidade de utilizar subprodutos do processo para produzir os aromáticos e adicioná-los à mistura, formando um bioquerosene totalmente compatível com o querosene tradicional.
- III. Rota HFS–SIP – iso-parafinas sintetizadas por hidroprocessamento de açúcares fermentados. Leveduras são utilizadas para fermentar açúcares, produzindo hidrocarbonetos. Composto somente de iso-parafinas, sua mistura ao QAV fóssil está limitada a 10%.
- IV. Rota Alcohol to Jet (ATJ) – querosene parafínico sintetizado a partir de álcoois. Esse álcool é desidratado e passa por um processo de oligomerização e hidrogenação. Por fim, há o fracionamento para obtenção do BioQAV.

Todos os processos, ao utilizarem matéria-prima totalmente renovável, são denominados bioquerosene de aviação. No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) definiu as especificações, parâmetros e percentuais de mistura por meio da

Resolução ANP 778/2019 (BRASIL, 2019). Foram regulamentadas as rotas FT com e sem adição de aromáticos, HEFA e ATJ, todas limitadas a 50% de mistura. A rota HSF-SIP, também regulamentada, ficou limitada a 10% de mistura.

Os SAFs podem contribuir para uma significativa redução na emissão de GEE. Calcula-se que os SAFs derivados de biomassa, resíduos e outras matérias-primas possam reduzir em até 94% as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida dos combustíveis. Avaliar o impacto ambiental de um sistema sob a abordagem do ciclo de vida (*life cycle assessment*) é considerá-lo em todas as suas fases, do início ao fim (RSB, 2021).

A rota tecnológica escolhida e o tipo de matéria-prima utilizada no processo afetam os ganhos potenciais de redução de GEE. Diferentes combinações matéria-prima/processo geram diferentes resultados ambientais. Assim, por exemplo, ao se considerar o ciclo de vida de matérias-primas cultivadas, todas as emissões associadas à produção serão contabilizadas, diminuindo os benefícios potenciais de redução nas emissões de GEE.

Carvalho (2017) analisou as emissões decorrentes da produção de biocombustíveis de aviação no Brasil por meio de duas rotas: FT utilizando resíduos florestais e HEFA usando óleo de soja. Nos dois casos, a redução na emissão de GEE foi significativa. No caso dos resíduos florestais, chegou a 94% em comparação ao uso de QAV fóssil. Já no caso do óleo de soja, a redução foi menor, mas ainda substancial, chegando a 52% na comparação com o uso do combustível tradicional.

Potencial para a produção de SAFs no Brasil

Como visto nas seções anteriores, existe uma demanda internacional por SAFs decorrente da necessidade desses combustíveis para o atingimento das metas acordadas por diversos países e companhias aéreas. Além disso, já existem rotas tecnológicas testadas e homologadas para a sua produção. Esse contexto por si já oferece significativas oportunidades para o desenvolvimento da produção de biocombustíveis de aviação no Brasil. Some-se a isso a existência no país de um mercado maduro de biocombustíveis, uma significativa indústria de aviação em operação, uma ampla disponibilidade de matérias-primas na forma de resíduos agropecuários e um conjunto de políticas públicas que incentivam essa produção – pontos que serão detalhados a seguir.

O mercado de biocombustíveis no Brasil

A crescente demanda por energia coloca um enorme desafio ambiental para o uso de combustíveis fósseis. O aumento da produção de biocombustíveis e bioeletricidade a partir de fontes renováveis é a alternativa mais factível a curto e médio prazo.

Segundo o *Statistical Review of World Energy 2020* (BP, 2020), a produção global de biocombustíveis chegou a 1,8 milhão de barris de óleo equivalente por dia em 2019. Os dois maiores produtores mundiais de biocombustíveis são responsáveis por 62% da produção: EUA, com 38%, e Brasil, com 24%, lideram com folga o ranking mundial, seguidos de Indonésia (7%), Alemanha, França e China, esses últimos com 3% cada.

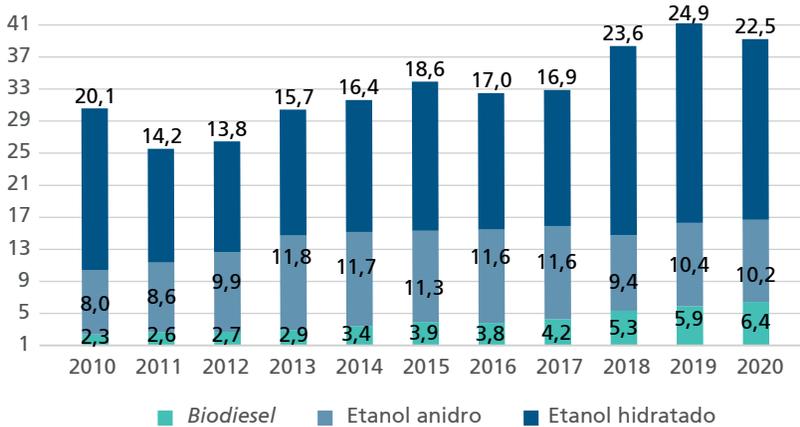
O Brasil destaca-se como um relevante produtor mundial e, por sua condição atual, tem grande potencial para a produção de biomassa, adicionando valor a essa matéria-prima ao transformá-la em energia. Do ponto de vista da competitividade, é necessário compreender que múltiplos fatores afetam o custo, o preço e a lucratividade dos biocombustíveis, sendo os principais a matéria-prima utilizada, a área plantada e a produtividade da colheita. À guisa de exemplo, estima-se que o custo de produção de etanol no Brasil seja ligeiramente mais alto do que nos EUA, algo da ordem de 6% a 7% (QUÃO..., 2019). Já os custos médios de produção de *biodiesel* são alinhados nos dois países, principalmente porque em ambos a produção é feita a partir da soja. Esses fatores são influenciados por políticas de estímulo à produção, estrutura tributária e estabelecimento de percentuais obrigatórios de biocombustíveis.

O setor de biocombustíveis no Brasil se beneficiou de diversas políticas públicas, que tiveram início na década de 1970 com o Proálcool. Em 2005, com o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), o país consolidou sua estratégia de promoção do uso de biocombustíveis, garantindo segurança aos investimentos que vêm gradativamente permitindo a expansão da produção e do consumo do *biodiesel*. Em fins de 2017, o Brasil instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis – Renovabio –, que reconhece a importância estratégica de todos os biocombustíveis em linha com os pressupostos do desenvolvimento sustentável.

Como resultado da combinação de recursos naturais, políticas públicas estratégicas e investimentos privados, o Brasil desenvolveu um mercado consolidado na produção e consumo de biocombustíveis, notadamente de etanol e *biodiesel*. O sucesso dessa conjunção de fatores pode ser observado até mesmo na produção brasileira de veículos leves de ciclo

Otto, dos quais cerca de 80% são da categoria *flex*. A evolução na produção dos principais biocombustíveis pode ser observada no Gráfico 2.

Gráfico 2 • Produção de biocombustível no Brasil (bilhões m³)

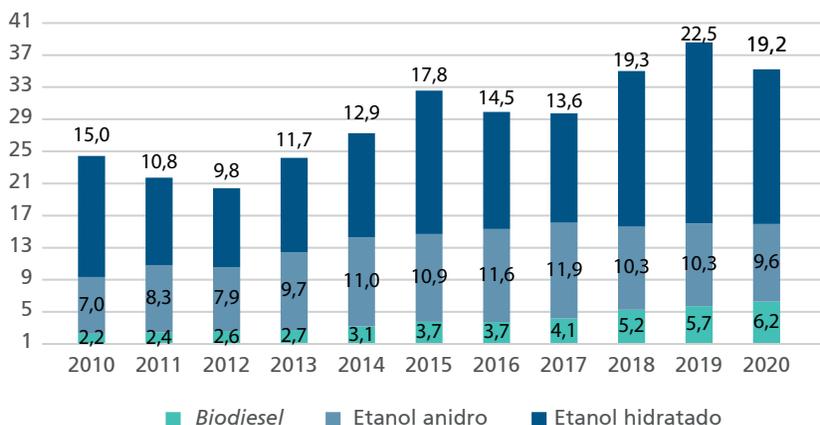


Fonte: ANP (2020).

Em 2020, a produção total de etanol chegou a 32,7 bilhões de litros, um decréscimo em relação ao ano anterior por conta da valorização do açúcar no mercado internacional. Note-se que as usinas de cana-de-açúcar podem escolher entre a produção de etanol ou açúcar, com base no produto mais vantajoso. No entanto, a produção de etanol de milho cresceu 82% em relação ao ano de 2019, atingindo 2,4 bilhões de litros. Já a produção de *biodiesel* bateu um novo recorde, 6,4 bilhões de litros, e o setor tem a perspectiva de regulamentação do *diesel* verde para novos investimentos (EPE, 2021).

Quando à demanda por biocombustíveis, observa-se, no Gráfico 3, que houve crescimento ao longo do tempo, mas com algumas oscilações, provavelmente associadas à variação no preço dos derivados de petróleo e do ciclo econômico. Em 2020, os efeitos da pandemia se fizeram notar.

Gráfico 3 • Consumo de biocombustível no Brasil (bilhões m³)



Fonte: ANP (2020) e EPE (2020).

Também vale destacar que a bioeletricidade proveniente das usinas do setor sucroenergético e injetada no Sistema Interligado Nacional do Operador Nacional do Sistema Elétrico (SIN-ONS) foi de 2,6 GW_{méd}. Em conjunto, as emissões evitadas pelo uso de etanol, *biodiesel* e bioeletricidade de cana-de-açúcar totalizaram 67,3 MtCO₂eq no ano de 2020 (EPE, 2021).

O mercado de aviação no Brasil

De acordo com o *Anuário do Transporte Aéreo*, publicado pela Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), o Brasil transportou em 2019 (último ano antes da pandemia) 95,3 milhões de passageiros em 804,9 mil voos domésticos. A demanda medida por RPKs apresentou, naquele ano, alta de 0,8%.

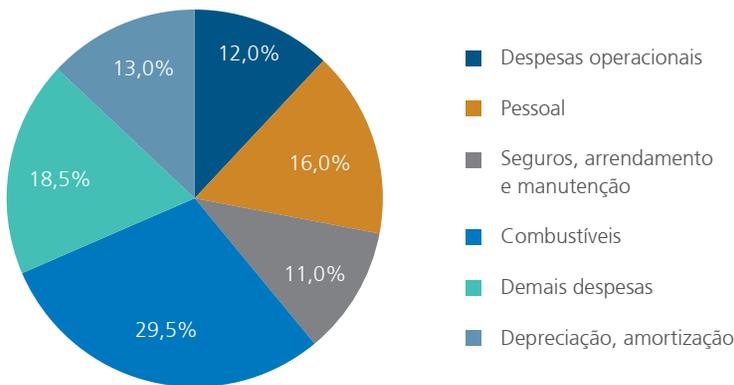
Quando se consideram também os voos internacionais, o total de passageiros sobe para 119,4 milhões. Naquele mesmo ano, houve aumento da participação de empresas estrangeiras nos voos

internacionais, com a parcela das empresas nacionais correspondendo a 38% do total desses voos.

As receitas por assento-quilômetro ofertado (RASK) e os custos e despesas por assento-quilômetro ofertado (CASK) se elevaram em 8,2% e 9,3%, respectivamente (ANAC, 2020).

Observa-se que as tarifas representaram 84% do total das receitas auferidas pelas companhias nacionais, sendo o restante decorrente de despachos de bagagem e demais receitas auxiliares. Já ao avaliar a composição de custos e despesas, nota-se que combustíveis são o item que tem individualmente o maior peso, o que explica a sensibilidade das empresas aéreas às alterações no preço desses produtos (ANAC, 2020).

Gráfico 4 • Composição de custos e despesas do setor de aviação civil no Brasil (2019)

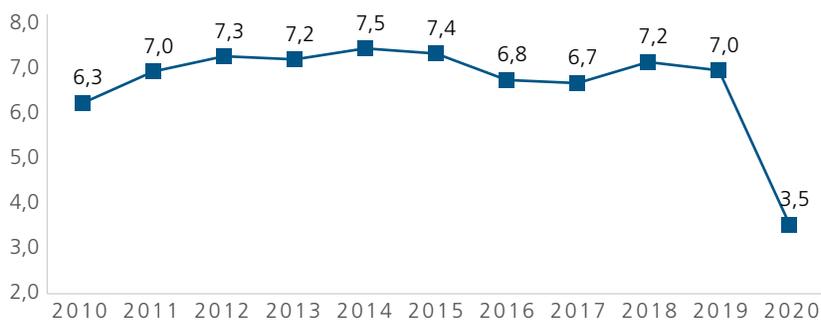


Fonte: Elaboração própria com base em Anac (2020).

A Anac divulgou dados que mostram os primeiros impactos da pandemia sobre o mercado aéreo brasileiro. Em junho de 2020, a queda na demanda doméstica chegou a 85% e, no mercado internacional foi de 95,4% em relação a 2019. O número de passageiros

transportados caiu 87,3%, e as cargas transportadas reduziram-se em 44,7% no mesmo período. O consumo de combustível pode ser visto no Gráfico 5.

Gráfico 5 • Demanda por querosene de aviação no Brasil (milhões m³)



Fonte: ANP (2020), conforme a Resolução ANP 729/2018 (BRASIL, 2018).

Vale destacar que, do total de QAV consumido no país, 60% correspondem aos voos para o exterior. O setor aéreo no Brasil tem sido responsável por aproximadamente 4% das emissões relacionadas à energia. Segundo a Anac, o maior volume de emissões ocorreu em 2015, quando atingiram 17,9 milhões de toneladas de CO₂ (ANAC, 2019).

Com o fim da pandemia, espera-se o retorno à tendência de crescimento anterior. No período de 2009 a 2018, a demanda de transporte de passageiros cresceu sistematicamente, com um resultado acumulado de 78% em termos de RPK.

O mercado aéreo brasileiro tem um potencial ainda maior. Segundo a Iata (2019), resolvidos alguns problemas – como reduzir o custo dos negócios, otimizar o uso da infraestrutura e promover uma harmonização regulatória –, o país poderá ampliar significativamente a

conectividade aérea doméstica e as conexões internacionais diretas, potencializando substancialmente seu crescimento.

A disponibilidade de matéria-prima no Brasil

O Brasil, com sua imensa produção agropecuária – com destaque para a de etanol –, gera conseqüentemente uma grande quantidade de resíduos que podem ser mobilizados para a produção de SAFs.

Um estudo da Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)⁶ realizado em conjunto com a Agroicone em 2021 estimou que o Brasil tem potencial para produzir até 9 bilhões de litros de SAFs com base em seus resíduos. Foram identificados como matérias-primas potenciais o bagaço e a palha de cana-de-açúcar, os resíduos de madeira, o óleo de cozinha usado, o sebo bovino e os gases de aciaria. O estudo identificou a disponibilidade de resíduos, bem como os locais estratégicos para a produção de SAFs (indústrias de biocombustíveis, refinarias, aeroportos etc.). Com a compatibilização da oferta de matéria-prima e as unidades industriais necessárias ao processamento, estimou-se o potencial da produção de SAFs.

O bagaço e a palha de cana-de-açúcar podem ser processados pelas rotas FT e ATJ, sendo que a segunda é mais eficiente, produzindo uma quantidade maior de SAF. O total de resíduos foi estimado em cerca de 61 milhões de toneladas (31,4 milhões de toneladas de bagaço e 29,9 milhões de toneladas de palha). Aproximadamente 60% desse total têm origem no estado de São Paulo, tornando-o estratégico, especialmente na rota ATJ – além da matéria-prima, o

⁶ A RSB é uma organização internacional independente que promove, a nível global, uma economia circular e sustentável.

estado conta com refinarias e elevada demanda por combustível de aviação (RSB, 2021).

Ressalte-se que utilizando a rota ATJ o volume total de resíduos de cana-de-açúcar é capaz de produzir 6,48 bilhões de litros de SAFs. Tendo em vista que a demanda total por combustível de aviação fóssil no Brasil está em 7,2 bilhões de litros, seria possível supri-la em 90%. Caso seja escolhida a rota FT, seria viável produzir 2,12 bilhões de litros, ou 30% da demanda total.

Os resíduos de madeira (somente foram considerados aqueles oriundos de eucalipto plantado) foram estimados em 21 milhões de toneladas por ano, sendo que mais de 50% estão localizados em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo. Esse montante de matéria-prima poderia produzir 1,9 bilhão de litros de SAFs pela rota ATJ e 0,99 bilhão de litros pela rota FT, representando, respectivamente, 26% e 14% da demanda total.

O volume de sebo bovino chega a 530 mil toneladas por ano, tendo sua maior concentração em Mato Grosso (22% do total). Seria possível, com isso, produzir 0,36 bilhão de litros de SAFs pela rota HEFA.

Já o óleo de cozinha usado tem maior potencial nos locais onde há coleta organizada, isto é, nas grandes cidades. O estudo estimou o volume em 213 mil toneladas por ano, capaz de gerar 0,11 bilhão de litros de SAFs pela rota HEFA.

Por fim, os gases de aciaria estão majoritariamente localizados nas siderúrgicas de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo e totalizam 2,823 milhões de Nm³, capazes de gerar 0,23 bilhão de litros de SAFs pela rota ATJ.

Tabela 1 • Resíduos e potencial máximo de produção de SAFs no Brasil

Matéria-prima	Resíduos estimados	Volume de SAF (bilhões de litros)
Bagaço e palha de cana-de-açúcar	61,0 milhões de toneladas	6,48
Resíduos de madeira	21,0 milhões de toneladas	1,9
Sebo bovino	0,53 milhão de toneladas	0,36
Óleo de cozinha usado	0,21 milhão de toneladas	0,11
Gases de aciaria	2,823 milhões de Nm ³	0,23

Fonte: RSB (2021).

Destaque-se que apenas com os resíduos de cana-de-açúcar e de madeira, utilizando a rota ATJ, seria possível ofertar, respectivamente, 90% e 30% da demanda total por combustíveis de aviação no Brasil. Tendo em vista que as misturas autorizadas são de, no máximo, 50%, o volume potencial de SAFs poderia suprir a demanda interna e gerar um excedente exportável (RSB, 2021).

Carvalho (2017) também procurou avaliar a viabilidade técnica e o potencial econômico da produção de biocombustíveis de aviação no Brasil. Para tanto, analisou a disponibilidade de matérias-primas por região, as rotas tecnológicas, os custos de produção e a dependência do processo produtivo de combustíveis fósseis. Foram avaliadas como potenciais culturas: soja, cana-de-açúcar, milho, aveia, arroz, eucalipto e resíduos florestais. As rotas escolhidas foram FT e HEFA. Em alguns casos, os impactos da redução de GEE foram estimados utilizando um modelo de ciclo de vida.

Dada a grande disponibilidade de resíduos de biomassa no país, o custo associado à obtenção de matéria-prima revelou-se baixo, a despeito de seu grande potencial energético. Como era previsível, a oferta é bem maior nas áreas produtoras agrícolas, ou seja, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

Dentre as áreas que já dispõem de condições para a produção de biocombustíveis de aviação a partir de resíduos, destaca-se São Paulo. Além da disponibilidade de resíduos, o estado também tem ampla infraestrutura para armazenamento e distribuição de biocombustíveis, concentrando também a produção de bioquerosene fóssil, o que facilita a logística de mistura e fornecimento (CARVALHO, 2017).

A região Centro-Oeste, por sua grande produção de soja e milho, também tem grande potencial energético, carecendo de investimentos locais para viabilizar a produção. Por outro lado, a dependência da região de combustível de aviação pode ser considerada uma oportunidade.

No que se refere à viabilidade econômica, as estimativas de Carvalho (2017) indicaram que os custos dos biocombustíveis de aviação produzidos pelas rotas HEFA e FT ainda são bastante superiores aos do QAV fóssil. No entanto, há indícios de que reduções de custo podem ser obtidas com os ganhos na escala de produção, cujas estimativas ainda são bastante diversas, a depender da matéria-prima e da rota tecnológica utilizada. O uso mandatório de misturas visando a redução das emissões – já definido pela indústria de aviação – poderá ser um importante fator de viabilização da produção ao gerar demanda compulsória.

Por outro lado, sabe-se que a oferta desses resíduos pode não estar integralmente disponível para a produção de SAFs, já que há usos alternativos, por exemplo, na produção de biogás para geração de bioeletricidade ou biometano. A definição do destino desses resíduos dependerá da interação entre oferta e demanda e dos sinais em cada um desses mercados. Os compromissos assumidos no Corsia, que se tornarão obrigatórios a partir de 2027 no Brasil, certamente contribuirão para ampliar a atratividade

da produção de SAFs. Nesse sentido, as políticas públicas para biocombustíveis, ao alterarem as condições de custo e definirem mandatos para o consumo mínimo de SAFs, desempenharão um papel preponderante nesse processo.

Políticas públicas

Como já mencionado, os biocombustíveis se beneficiaram de um conjunto de políticas públicas no Brasil que incentivaram sua produção e consumo. Porém, o atual estágio tecnológico e a baixa escala de produção acarretam custos que costumam ser superiores aos de combustíveis fósseis.

No caso de biocombustíveis veiculares, essa restrição foi em grande parte superada à medida que a produção foi ganhando escala. No caso dos SAFs, esse empecilho é particularmente forte. Estima-se que o custo do BioQAV seja atualmente 20% superior ao do combustível fóssil, e soma-se a isso o fato de que as empresas aéreas têm o combustível como principal item de custo, chegando a cerca de 30% do total.

Tendo em vista a necessidade premente de redução das emissões de GEE, as políticas públicas são um instrumento importante para a superação dos óbices à difusão dos SAFs. Para a obtenção de escala de produção dos biocombustíveis e redução de custos, é necessária a colaboração dos diversos atores envolvidos nesse processo: indústria, centros de pesquisa, empresas aéreas, governo e *stakeholders* em geral devem ser mobilizados para concretizar as metas ambientais do setor.

No Brasil, em 2016, foi realizada uma oficina de trabalho sobre BioQAV no Ministério de Minase Energia (MME). A iniciativa gerou

um documento intitulado *Combustíveis Sustentáveis de Aviação: uma realidade a curto prazo*, disponibilizado pela União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (Ubrabio). No documento foram propostas as seguintes medidas (UBRABIO, 2016):

- I. tributação diferenciada da cadeia produtiva de SAFs, de forma a ampliar sua competitividade em relação ao combustível fóssil;
- II. integração com as distribuidoras de QAV, garantindo o compartilhamento da infraestrutura de estocagem e distribuição;
- III. integração dos atores com a ANP para a construção de um esquema regulatório que permita a operação harmônica de todos os elos da cadeia produtiva;
- IV. desenvolvimento de sistemas nacionais de certificação de qualidade e sustentabilidade para os SAFs;
- V. fomentos e incentivos de produção, à semelhança do que ocorre nos EUA (EPA, 2021) e na comunidade europeia (KAMPMAN *et al.*, 2013);
- VI. linhas de crédito e financiamento público que se adequem às especificidades e necessidades da cadeia produtiva de SAFs;
- VII. linhas de financiamento para entidades públicas ou privadas dedicadas a desenvolver e homologar as tecnologias envolvidas para a viabilização dos SAFs.

No ano seguinte, o RenovaBio foi instituído pela Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017, buscando ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz de transportes brasileira e assim contribuir

para o atingimento das metas de redução das emissões de CO₂. Os produtores de biocombustíveis têm seu processo produtivo auditado e certificado. Por meio de uma calculadora padrão (RenovaCalc), avalia-se o ciclo de vida do produto e, com base em sua eficiência energética, são gerados créditos de carbonização (CBio), que poderão ser comercializados no mercado.

A partir das diretrizes da ANP, a produção de BioQAV será certificada e avaliada, podendo gerar créditos em CBios e, dessa forma, ampliar a rentabilidade do setor.

O Conselho Nacional de Política Energética aprovou em abril de 2021 o Programa Combustível do Futuro (PCF),⁷ que tem como princípios o uso de fontes renováveis de energia e o desenvolvimento de tecnologia nacional a elas relacionada. O PCF busca estabelecer uma coordenação interinstitucional e integrar as políticas públicas relacionadas aos combustíveis. Criou-se também o Comitê Técnico Combustível do Futuro, composto por diversos órgãos e coordenado pelo MME, responsável por propor ações relacionadas à descarbonização da matriz de transportes brasileira.

Representantes do setor produtivo têm se mobilizado para definir um novo marco legal para inserir os biocombustíveis avançados no mercado brasileiro. O Projeto de Lei 1.873 de 2021 (BARROS, 2021) visa instituir o Programa Nacional dos Combustíveis Avançados Renováveis, incentivando a pesquisa, a produção e o consumo

⁷ Ver: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-320067170>.

dos biocombustíveis avançados – representados pelo *diesel verde*⁸ e pelo BioQAV.

Não se deve esquecer também que o BNDES está cada vez mais empenhado em apoiar a agenda ambiental, social e de governança (ASG) e tem um amplo conjunto de produtos financeiros relacionados ao apoio a inovação, produção de biocombustíveis, meio ambiente etc. Além disso, o Banco opera os Programas Agrícolas do Governo Federal, que oferecem taxas fixas e equalizadas pelo Tesouro Nacional.⁹ Com relação ao combate às mudanças climáticas, vale destacar o Fundo Clima, instrumento que busca, entre outros objetivos, apoiar o desenvolvimento tecnológico de energias renováveis, como a oriunda da biomassa. O BNDES está atento às especificidades do setor e disposto a oferecer soluções customizadas na forma de crédito e garantias, de forma a minimizar o risco inerente às inovações.

Como se vê, o Brasil dispõe de um arcabouço institucional disposto a prover as condições necessárias ao desenvolvimento dos SAFs. Tal fato, em conjunto com as outras condições expostas, coloca o país em situação privilegiada para se tornar um ator destacado na produção e consumo de SAFs.

8 O *diesel verde* é definido no projeto de lei como: “[...] biocombustível composto por hidrocarbonetos parafínicos, destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, que seja produzido em processos dedicados e definidos conforme regulamento a partir de matéria-prima renovável ou resíduos de biomassa” (BRASIL, 2021, p. 2).

9 Ver: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/formas-de-apoio>.

Comentários finais

A adoção dos compromissos de sustentabilidade da indústria de aviação, com destaque para a redução de 50% das emissões líquidas de dióxido de carbono até 2050, criou a necessidade da utilização conjunta de diversas estratégias para viabilizar o atingimento das metas ambientais do setor. Os SAFs desempenham um papel essencial nesse processo, tanto mais porque as alternativas a eles ainda não são uma realidade.

Existem testes com pequenas aeronaves utilizando motores elétricos recarregáveis, mas escaloná-los para grandes aeronaves em voos continentais dependerá de avanços tecnológicos consideráveis que, provavelmente, só estarão disponíveis nas próximas décadas. Um salto tecnológico análogo é requerido para os motores a hidrogênio. Deve-se ainda salientar que essas novas tecnologias deverão ser exaustivamente testadas e certificadas para garantir a segurança na operação das aeronaves.

Embora a produção e o consumo de SAFs estejam ganhando crescente importância no mercado internacional, o Brasil permanece como um espectador desse processo. Os primeiros testes domésticos com o uso de BioQAV ocorreram em 2010 e, desde então, Latam, Azul e Gol realizaram alguns voos experimentais. Durante a Copa do Mundo de 2014, a Gol promoveu algumas viagens utilizando uma mistura de 4% de SAF produzido a partir de óleo de milho (RIBEIRO, 2019).

O Brasil tem vantagens competitivas importantes para a produção de SAFs. O país já produz uma significativa quantidade de resíduos com grande potencial energético, e a utilização desses

resíduos afasta as preocupações relacionadas ao uso alternativo dos recursos naturais e à segurança alimentar. O país também dispõe de ampla infraestrutura ligada à produção e distribuição de biocombustíveis, além de ter experiência na definição de políticas públicas bem-sucedidas no incentivo ao uso de combustíveis sustentáveis.

Ao mesmo tempo, o governo brasileiro vem desenvolvendo um arcabouço institucional capaz de fomentar o uso de SAFs a nível nacional. O PCF (BRASIL, 2021) mostra a disposição do país em acelerar a transição para combustíveis sustentáveis, e os biocombustíveis de aviação desempenham um papel central nesse programa.

As condições para o desenvolvimento de uma indústria para a produção de SAFs no país estão postas, havendo consenso de que a mudança de estruturas produtivas visando o desenvolvimento sustentável deve ser uma das prioridades na definição das políticas públicas no Brasil. A passagem de uma economia intensiva na emissão de GEE para uma economia caracterizada por baixas emissões, conhecida como transição verde, demanda integração e parceria entre os setores público e privado, de forma a mitigar os riscos e incertezas inerentes a uma mudança tão profunda. A criação de um sistema de governança que inclua regulação, certificação e mandatos será de suma importância para o incentivo à consolidação da produção e distribuição de biocombustíveis de aviação no país, o que certamente contribuirá para o alcance das metas ambientais assumidas pelo Brasil.

Referências

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. *Anuário do transporte aéreo*. Gráficos e Tabelas 2019. Brasília, DF: Anac, 2020.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. *Inventário anual de emissões atmosféricas da aviação civil – 2019*. Brasília, DF: Anac, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf. Acesso em: 5 jul. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Dados estatísticos. *Ministério de Minas e Energia*, Brasília, DF, 22 out. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 14 jun. 2021.

ATAG – AIR TRANSPORT ACTION GROUP. *Global Fact Sheet*. Geneva: Atag, 2020. Disponível em: <https://www.atag.org/component/attachments/attachments.html?id=933>. Acesso em: 12 maio 2021.

BARROS, R. *Projeto de Lei 1.873, de 2021*. Estabelece o Programa Nacional dos Combustíveis Avançados Renováveis com o objetivo de incentivar a pesquisa e fomentar a produção e consumo dos biocombustíveis avançados. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2021. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2029458. Acesso em: 8 nov. 2021.

BP. *Statistical Review of World Energy 2020*. 69. ed. London: BP, 2020. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2021.

BRASIL. *Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017*. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 22 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Defesa. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Programa Sirius*. Brasília, DF: Ministério da Defesa, [2021]. Disponível em: <https://sirius.decea.mil.br/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BRASIL. Ministério da Economia. Resolução 7, de 20 de abril de 2021. Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, ed. 77, p. 50, 27 abr. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-7-de-20-de-abril-de-2021-316020224>. Acesso em: 17 ago. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução 729, de 11 de maio de 2018. Dispõe sobre os procedimentos de remessa de informações à ANP pelos agentes regulados que menciona. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, ed. 91, p. 42, 14 maio 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/14129148/. Acesso em: 8 nov. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução 778, de 5 de abril de 2019. Estabelece as especificações do querosene de aviação, querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação [...]. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, ed. 67, p. 40, 8 abr. 2019. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/70491356/do1-2019-04-08-resolucao-n-778-de-5-de-abril-de-2019-70491250. Acesso em: 16 jun. 2021.

CARVALHO, F. M. *Evaluation of the Brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes*. 2017. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program. *Renewable Fuel Standard Program*, Washington, DC, 4 jan. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard>. Acesso em: 9 nov. 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis* – ano 2020. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. (Nota Técnica). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf. Acesso em: 15 jun. 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco energético anual: ano base 2019*. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 16 jun. 2021.

HEPHER, T.; FROST, L. Airbus afirma que hidrogênio não será amplamente utilizado em aviões antes de 2050. *IstoÉ Dinheiro*, São Paulo, 10 jun. 2021. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/Airbus-afirma-que-hidrogenio/>. Acesso em: 8 nov. 2021.

IATA – ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE AÉREO. *Estatísticas do setor de transporte aéreo confirmam que 2020 foi o pior ano já registrado*. Press Release nº 55. Montreal: Iata, 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/84b4eef61a8e4d46b658458d5dac9e98/2021-08-03-01-pt.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.

IATA – ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE AÉREO. *O valor do transporte aéreo no Brasil: desafios e oportunidades para o futuro*. São Paulo: Iata, [2019]. Disponível em: https://valordaaviacao.org.br/wp-content/uploads/2019/07/IATA_Valor_do_Transporte_Aereo_no_Brasil_Maio_2019.pdf. Acesso em: 8 jul. 2021.

IATA – INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *Aircraft technology roadmap to 2050*. Geneva: Iata, 2013. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>. Acesso em: 28 maio 2021.

IATA – INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *Anual Review 2020*. Amsterdam: Iata, 2020. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/annual-review/>. Acesso em: 4 jun. 2021.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *An introduction to market-based measures (MBMs)*. Montreal: Icao, 2015. Disponível em: https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/6_1_An-introduction-to-market-based-measures-MBMs.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSA)*. *Icao Environment*, Montreal, jun. 2021. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>. Acesso em: 1 maio 2021.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *On board a sustainable future: 2016 environmental report*. Montreal: Icao, 2016. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2021.

ICAO – International Civil Aviation Organization. *Presentation of 2019 Air Transport Statistical results*. Montreal: Icao, [2019]. Disponível em: https://www.icao.int/annual-report-2019/Documents/ARC_2019_Air%20Transport%20Statistics.pdf. Acesso em: 28 maio 2021.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Sustainable aviation fuels guide*. Montreal: Icao, 2017. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

KAMPMAN, B. *et al. Bringing biofuels on the market: options to increase EU biofuels volumes beyond the current blending limits*. Delft: CE Delft, 2013. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2013_11_bringing_biofuels_on_the_market.pdf. Acesso em: 9 nov. 2021.

QUÃO competitiva é a produção de biocombustíveis no Brasil e nos Estados Unidos. *Cana Online*, Ribeirão Preto, 12 mar. 2019. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/quao-competitiva-e-a-producao-de-biocombustiveis-no-brasil-e-nos-estados-unidos.html>. Acesso em: 29 out. 2021.

RIBEIRO, G. Brasil é apenas um espectador no avanço dos biocombustíveis para aviões. *Gazeta do Povo*, Curitiba, 28 mar. 2019. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/brasil-e-apenas-um-espectador-no-avanco-dos-biocombustiveis-para-avioes-1u4ee5hd6dx6x5s6a4brzc1oe/>. Acesso em: 8 nov. 2021.

RSB – ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS. *Decarbonising aviation: the sustainable way forward*. Geneva: RSB, 2021. Disponível em: <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Alternative-Aviation-Fuels-A-Sustainable-Future-is-Taking-Off.pdf>. Acesso em: 2 maio 2021.

SILLERS, P. Por que esta aeronave da era espacial pode mudar a aviação civil para sempre. *CNN Brasil*, São Paulo, 3 out. 2020. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/por-que-essa-aeronave-da-era-espacial-pode-mudar-a-aviacao-civil-para-sempre/>. Acesso em: 8 nov. 2021.

SESAR – SINGLE EUROPEAN SKY ATM RESEARCH JOINT UNDERTAKING. *Smart and sustainable aviation for Europe*. Brussels: Sesar, [2021]. Disponível em: <https://www.sesarju.eu/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

UBRABIO – UNIÃO BRASILEIRA DE BIODIESEL E BIOQUEROSENE.
Combustíveis sustentáveis de aviação: uma realidade a curto prazo. Brasília, DF: Ubrabio, 2016. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=eefdd5de-7882-daea-22b3-f45f17dbbc61&groupId=36224. Acesso em: 9 nov. 2021.

UNITED STATES. Federal Aviation Administration. *Next Generation Air Transportation System* (NextGen). Washington, DC: [2021]. Disponível em: <https://www.faa.gov/nextgen/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

WORLD BANK GROUP. Air transport and energy efficiency. *Transport Papers*, Washington, DC, n. 38, fev. 2012. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/16805/680100NWP0Box30ial0Use0Only0900TP38.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2021.