

COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO

Ricardo Cunha da Costa
Cássio Adriano Nunes Teixeira
André Pompeo do Amaral Mendes
*Marco Aurélio Ramalho Rocio**

Palavras-chave: combustível sustentável de aviação; SAF; *book and claim*; emissões líquidas zero 2050.

* Respectivamente, engenheiro, analista de sistemas, gerente setorial e geólogo do Departamento de Gás, Petróleo, Navegação e Descarbonização da Área de Transição Energética e Clima do BNDES.

SUSTAINABLE AVIATION FUEL

Ricardo Cunha da Costa

Cássio Adriano Nunes Teixeira

André Pompeo do Amaral Mendes

*Marco Aurélio Ramalho Rocio**

Keywords: sustainable aviation fuel; SAF; book and claim; net zero 2050.

* Respectively, engineer, systems analyst, sector manager and geologist of the Department of Gas, Oil, Navigation, and Decarbonization of the BNDES's Energy Transition and Climate Division.

Resumo

O artigo trata do papel estratégico do combustível sustentável de aviação (*sustainable aviation fuel* – SAF) para o atingimento da meta *net zero* até 2050 adotada pelo setor aéreo, um setor considerado de difícil descarbonização. A expectativa é de que o SAF responda, em 2050, por 53% da descarbonização; os avanços tecnológicos responderão por 34%; a otimização da operação dos aeroportos e melhoria da eficiência da infraestrutura, por outros 7%; e medidas baseadas em mercado, pelos 6% restantes da descarbonização. Países grandes consumidores estão se preparando para tanto, mas têm estabelecido alguns critérios que restringem certos tipos de matéria-prima, tecnologia ou modelo de contabilização do conteúdo em carbono no ciclo de vida, o que dificulta a contribuição de países com grande potencial de produção de SAF para a redução de emissões de países grandes consumidores. O artigo aborda algumas iniciativas adotadas para a regulação de voos internacionais, assim como iniciativas realizadas pela Europa, Estados Unidos da América (EUA) e Brasil, visando a difusão de SAF em seus mercados. Também faz um panorama das principais rotas tecnológicas e matérias-primas empregadas na produção de SAF.

Abstract

This study addresses the strategic role of sustainable aviation fuel (SAF) towards the aviation sector's net zero target by 2050. SAF is expected to account for 53% of decarbonization in 2050, technology for 34%, optimization of airport operations and improvement of infrastructure efficiency for 7%, and market-based measures for 6%. Major consumer countries are preparing for this, but they are setting some criteria that end up restricting certain types of feedstock, technology, or models of accounting for carbon content in the life cycle. It is becoming hard to countries with great potential to produce SAF to contribute to the reduction of the emissions in large consumer countries. This study looks at some initiatives that are being adopted to regulate international flights, as well as those adopted in Europe, the United States of America, and Brazil to disseminate SAF in their markets. It also overviews the main technological paths and feedstocks for the production of SAF.

Introdução

Diversas atividades da economia devem contribuir para a redução das emissões de carbono a fim de se alcançar mundialmente a neutralidade de emissões em 2050. Um setor importante e de difícil descarbonização é o de aviação, uma indústria que responde por mais de 2% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) e que se comprometeu com a meta de emissões líquidas zeradas (*net zero emissions*) até 2050.

Enormes investimentos vêm sendo realizados em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, como a aviação elétrica – que talvez tenha aplicação em voos curtos e aeronaves menores – e a propulsão a partir da energia do hidrogênio – seja na combustão direta, seja por meio de células de combustível. Mas, mesmo assim, não se vislumbra a aplicação dessas tecnologias ao setor aéreo em escala suficiente para um horizonte *net zero* até 2050 – diferente do que se vê no transporte rodoviário, por exemplo, que desfruta de alternativas para eletrificação e para adoção de novos combustíveis avançados e sustentáveis, além do potencial uso do hidrogênio (célula combustível) no médio prazo. Portanto, para o setor aéreo, não se espera que as tecnologias disruptivas de propulsão estarão disponíveis para atender o mercado em sua plenitude no horizonte 2050. Os avanços que vêm ocorrendo na aerodinâmica e motores das aeronaves e a melhoria na eficiência operacional do setor aéreo também são importantes, mas não suficientes para a redução das emissões na quantidade necessária ao alcance da meta estabelecida.

A aviação é um dos setores reconhecidos como de difícil abatimento das emissões¹ por depender, sobremaneira, de um combustível líquido com alta densidade energética em sua operação. De fato, ainda não existe tecnologia propulsora viável comercialmente para substituir essa alta densidade energética requerida na operação dos aviões. Para se ter uma ideia, quando um Boeing 777, um avião da categoria *wide-body*,² decola, seus dois motores *turbofan* entregam uma potência equivalente a 130 MW (Craig *et al.*, 2022). Essas turbinas podem produzir energia suficiente para gerar eletricidade para uma cidade de mais de 150 mil habitantes, considerando-se uma média de 10 KWh/dia/habitante e fator de capacidade de 50%.

Como sabemos, o querosene de aviação (QAV, ou Jet-A1) – o combustível líquido de alta densidade energética consumido na aviação – tem origem fóssil. Trata-se de um combustível com padrões de qualidade e de segurança bem mais rigorosos que os demais, pois, entre outras características, precisa operar com muita confiabilidade sob temperaturas extremas, sem o risco de congelar ou de explodir.

A combustão do QAV é responsável pela maior porção de emissões do setor aéreo, posicionando-o como responsável por algo entre 2% e 3% do total de emissões globais de GEEs (WEF, 2024a). Embora possa parecer um percentual baixo, essas emissões poderão dobrar, ou mesmo quadruplicar, até 2050, caso o setor fique inerte frente às metas globais de redução de emissões (WEF, 2024b). Isso vem fazendo com que o setor seja estrangulado por iniciativas e compromissos que visam a redução das emissões. Até 2050, projeta-se um crescimento de cerca de 3% ao

1 São considerados de difícil abatimento sete setores: produção de alumínio, aviação, indústria química, produção de cimento, navegação, produção de aço e transporte de carga a longas distâncias. Juntos, respondem por mais de um terço das emissões mundiais de carbono.

2 Para ser enquadrado na categoria *wide-body*, o avião precisa ter dois corredores com sete ou mais assentos em cada uma das fileiras.

ano no tráfego aéreo, é nesse contexto – de dependência de um líquido com alta densidade energética, mas com baixos níveis de emissão – que o combustível sustentável de aviação (*sustainable aviation fuel* – SAF) passa a ser visto como essencial para a indústria aérea alcançar sua meta *net zero* até 2050 (IEA, 2023).

Neste artigo, apresenta-se o cenário de desenvolvimento e aplicação do SAF, com a tentativa de pontuar o gigantesco desafio envolvido em sua viabilização em escala e custos necessários. Trata-se de um esforço capitaneado fortemente pelos Estados Unidos da América (EUA) e pela União Europeia (UE), envolvendo recursos massivos disponibilizados pelos governos e uma gama de atores em diversos setores além da própria aviação, como, entre outros, companhias aéreas e seus passageiros, produtores de combustíveis, produtores/fornecedores de matéria-prima para SAF, fornecedores de equipamentos para a indústria aérea (*original equipment manufacturers* – OEM), agentes financiadores e agentes reguladores. Na próxima seção, são apresentadas algumas iniciativas que vêm sendo adotadas no mundo para viabilização do SAF. Em seguida, na terceira seção, destaca-se a magnitude da cota de redução de emissões creditadas ao SAF. Na quarta seção, descrevem-se formas de rastreamento e contabilização do benefício ambiental da mistura SAF/QAV. Na quinta seção, abordam-se as principais rotas tecnológicas para produção de SAF. Na sexta seção, destacam-se algumas iniciativas existentes no Brasil. Na última seção, são apresentadas as considerações finais.

Iniciativas para promoção do mercado de SAF no mundo

Articulações no âmbito da Organização de Aviação Civil Internacional

Em 2022, a Organização de Aviação Civil Internacional (International Civil Aviation Organization – ICAO), uma entidade vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu para a aviação internacional o objetivo de longo prazo de zerar as emissões líquidas até 2050. Contudo, desde 2016 a ICAO vinha desenvolvendo um programa, conhecido como Carbon Offseting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), que previa a redução e a compensação das emissões de CO₂, para garantir que a aviação cumprisse seu papel no esforço global de redução das emissões de GEEs (WEF, 2024b). O Brasil é signatário desse programa, que atualmente prevê um leque de medidas, como melhorias tecnológicas e operacionais, compensação de emissões por meio da compra de créditos de carbono e utilização de combustíveis sustentáveis.

O esquema de *compliance* do CORSIA disciplina o mercado global de aviação, estabelecendo o teto de emissões do setor em 85% do que foi emitido em 2019. Após o período piloto, entre 2021 e 2023, o programa entra em sua fase I, de 2024 a 2026, durante a qual as participações de países e companhias aéreas são voluntárias. Na fase II, de 2027 até 2035, a participação será compulsória (exceto para países menos desenvolvidos, pequenas ilhas em desenvolvimento e países que emitem até um determinado limite). Desde 2019, todos os países-membros da ICAO com voos internacionais devem monitorar,

reportar e verificar suas emissões de CO₂, independentemente de sua participação no CORSIA ou não. Três objetivos foram estabelecidos: melhorar em 2% ao ano, até 2050, a eficiência dos combustíveis; não aumentar o nível de emissões a partir de 2020, mesmo com o crescimento do setor; e atingir o *net zero* em 2050 (ICAO, 2023).

Para ser considerado um combustível elegível ao CORSIA, o SAF ou os combustíveis de aviação com menos carbono (*low carbon aviation fuels* – LCAF) terão de reduzir em pelo menos 10% as emissões líquidas de GEEs em comparação com os valores de referência das emissões do ciclo de vida para combustível de aviação. À primeira vista, pode parecer que os critérios de elegibilidade em termos de redução de emissões para o CORSIA são pouco rigorosos, pois o parâmetro básico é que as emissões decorrentes do ciclo de vida do combustível sustentável sejam pelo menos (“apenas”) 10% menores que as de sua contraparte fóssil, cujo padrão atual, na média internacional, é de 89 gCO₂e/MJ.

Porém, outro princípio do CORSIA está relacionado ao uso da terra, o que certamente fará que diferentes fontes de matéria-prima e rotas tecnológicas apresentem diferentes desempenhos ambientais. Além da análise de ciclo de vida (*life cycle assessment* – LCA), o CORSIA considera as mudanças induzidas no uso da terra (*induced land use change* – ILUC). Assim, caso as áreas tenham sofrido conversão do uso do solo após janeiro de 2008, as emissões causadas por essa mudança têm de ser contabilizadas.³ É importante destacar, também,

3 Dessa forma, o CORSIA calcula as emissões de GEEs pela soma de LCA e ILUC dos combustíveis. Então, não apenas a matéria-prima e a tecnologia empregadas influenciam no cálculo de emissões de GEEs, mas também a quantidade de biomassa convertida desde 2008 por mudança do uso do solo. Por isso, para a ICAO, os índices padrão de emissões do ciclo de vida para combustíveis produzidos, por exemplo, a partir de óleo de soja, pelo hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (*hydroprocessed esters and fatty acids* – HEFA), são diferentes entre os países: a título de exemplo, 64,9 gCO₂e/MJ nos EUA, 67,4 no Brasil e 66,2 na média mundial. Para maiores detalhes sobre os índices padrão de emissões do ciclo de vida, ver ICAO (2024).

que não é permitido obter biomassa em áreas de alta intensidade de carbono, como florestas primárias, pântanos e turfeiras.

Novos requisitos foram impostos pelo CORSIA a partir de 2024 para enquadramento como SAF ou LCAF, não apenas relacionados a emissões ou a estoque de carbono, mas também à necessidade de manutenção ou melhoria da qualidade da água, do solo e do ar na região de produção. A biodiversidade deve ser preservada, assim como o manejo de rejeitos e o uso de produtos químicos devem ser bem gerenciados. O respeito aos direitos de trabalhadores e da população local deve ser mantido, de modo que a produção de SAF ou LCAF contribua com o desenvolvimento socioeconômico de regiões desfavorecidas e promova a segurança alimentar.

Por isso, é de se esperar que um SAF produzido a partir de resíduos ou de um etanol de segunda geração seja mais bem qualificado no CORSIA do que aquele produzido por etanol de primeira geração, ou a partir da soja, por exemplo. Ademais, permanecem questões como: a terra em uso compete com a produção de alimentos? Será necessária uma maior quantidade de terra caso o SAF desloque a produção preexistente de um biocombustível, como o etanol? (Prussi *et al.*, 2021).

Ações em curso nos EUA

Os EUA anunciaram, em 2021, o Grande Desafio do Combustível de Aviação Sustentável (SAF Grand Challenge), reunindo várias agências federais com o propósito de expandir o consumo doméstico para 3 bilhões de galões já em 2030 e para 35 bilhões de galões em 2050.

SAF Grand Challenge Roadmap

No programa Grande Desafio, SAF é definido como um combustível proveniente de resíduos materiais renováveis e gases que alcance uma redução mínima de 50% nas emissões de GEEs no ciclo de vida, quando comparado ao combustível convencional. O programa adotou como meta fornecer pelo menos 3 bilhões de galões de SAF por ano até 2030, com manifesta expectativa de atender 100% da demanda de combustível de aviação até 2050, cuja estimativa alcança cerca de 35 bilhões de galões por ano.

Mais de quatrocentas biorrefinarias e 1 bilhão de toneladas de biomassa, ou outra fonte renovável de energia, serão necessárias para produzir 35 bilhões de galões/ano até 2050.

Para promover o programa Grande Desafio SAF, o governo estadunidense apoia empregos em agricultura, silvicultura, infraestrutura, construção, transporte, pesquisa e desenvolvimento, bem como outras áreas de interesse dos EUA. Grande parte da criação de empregos ocorrerá na zona rural, onde a biomassa está disponível e onde as biorrefinarias deverão ser instaladas. Os benefícios adicionais incluem o aumento da produtividade das culturas agrícolas e florestas existentes, proporcionando oportunidades de envolvimento e participação de comunidades, gerando benefícios imediatos para a população carente, incentivando compromissos da indústria e melhorando as parcerias público-privadas.

A produção de SAF está em seus estágios iniciais nos EUA, com três produtores em escala comercial conhecidos:

- i) A World Energy iniciou a produção de SAF em 2016 em suas instalações em Paramount, Califórnia. Inicialmente, forneceu combustível para o Aeroporto Internacional de Los Angeles e, em seguida, para outros aeroportos na Califórnia.
- ii) A multinacional Neste forneceu SAF, primeiramente, para o Aeroporto Internacional de São Francisco, em 2020 e, posteriormente, em 2021 e 2022, para outros aeroportos da Califórnia, bem como para o Aeroporto de Aspen/Pitkin County e o Aeroporto Regional de Telluride, ambos no Colorado.

- iii) A Montana Renewables LLC iniciou a produção em parceria com a Shell em uma instalação existente de refino de petróleo em 2023, fornecendo combustível para diversas companhias aéreas parceiras.

As três plantas existentes nos EUA usam ésteres hidroprocessados e a rota dos ácidos graxos, denominada de rota ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (*hydroprocessed esters and fatty acids* – HEFA). Há expectativa de novas plantas utilizando a via *alcohol-to-jet* (AtJ), com etanol como matéria-prima.⁴ Novas fábricas estão se instalando no país. Muitas companhias aéreas assinaram acordos com produtores ativos de SAF, bem como firmaram compromissos de compra para entrega futura.

Direcionamentos na UE

Na Europa, o regulamento proposto pela Comissão Europeia visa criar condições de concorrência equitativas por meio de regras harmonizadas em toda a UE para o SAF, evitando regulamentações nacionais díspares. Seus principais elementos referem-se a três grupos diferentes de partes interessadas: fornecedores de combustível de aviação, companhias aéreas e aeroportos.

A componente central do regulamento é a obrigatoriedade de os fornecedores de combustível misturarem um percentual mínimo em volume de SAF no fornecimento de QAV, com uma parcela destacada para o querosene sintético produzido por eletrólise (e-QAV do tipo *power-to-liquid* – PtL) a partir de 2030:⁵

- i) 2% de SAF a partir de 2025;

4 Mais à frente serão detalhadas diferentes rotas tecnológicas.

5 Ver União Europeia (2023). Esses percentuais têm sido alterados nas revisões da Diretiva de Energia Renovável da União Europeia.

- ii) 6% de SAF a partir de 2030, com mínimo de 0,7% de e-QAV;
- iii) 20% de SAF a partir de 2035, com mínimo de 5% de e-QAV;
- iv) 34% de SAF a partir de 2040, com mínimo de 10% de e-QAV;
- v) 42% de SAF a partir de 2045, com mínimo de 15% de e-QAV; e
- vi) 70% de SAF a partir de 2050, com mínimo de 35% de e-QAV.

Dois aspectos devem ser destacados. O primeiro é que a obrigação recai sobre os fornecedores de combustível, e não sobre as companhias aéreas; consequentemente, todos os voos com partida dos aeroportos da UE terão de se preparar para a nova regulamentação. Em segundo lugar, a obrigação baseia-se no volume, e não na redução potencial da intensidade de carbono do SAF.

Entende-se que os combustíveis sintetizados (e-combustíveis) têm o maior potencial de descarbonização dentre as tecnologias consideradas no âmbito dessa iniciativa, portanto, foi criada uma obrigação adicional para impulsionar sua introdução no mercado. Pode-se observar, pela proposta, que a penetração de e-combustíveis no mercado até 2030 será lenta, sobretudo se não contar com apoio político específico para contrabalancear seu elevado custo. O objetivo da obrigação adicional é reduzir parcialmente o risco de investidores que queiram aplicar seus recursos em e-combustíveis e promover o aumento da capacidade de produção.

A proposta europeia flexibiliza o fornecimento de SAF nos primeiros anos. Até 2030, os fornecedores de combustível não seriam obrigados a distribuir misturas obrigatórias de SAF em todos os aeroportos, mas poderiam cumprir sua obrigação fornecendo um percentual mais elevado em determinados aeroportos, desde que o fornecedor de combustível cumpra o estabelecido com base na média anual de combustível fornecido. De 2030 a 2035, pretende-se garantir ainda alguma flexibilidade,

de forma que os fornecedores de combustível não precisem fornecer para todos os aeroportos na totalidade da obrigação (6%), mas um percentual menor de, por exemplo, pelo menos 2% de SAF em todos os aeroportos.

Os tipos de SAF elegíveis segundo o regulamento europeu são os derivados de biomassa de segunda geração e os e-combustíveis, excluindo-se, portanto, aqueles baseados em culturas para alimentação humana e ração animal. No entanto, SAFs produzidos a partir de gorduras animais serão aceitos para deslanchar o combustível no mercado e viabilizar a redução de emissões a curto prazo. Os critérios de sustentabilidade estabelecidos na Diretiva de Energias Renováveis (Renewable Energy Directive – RED III) serão utilizados para determinar a elegibilidade das diversas possibilidades de produção de SAF.

A obrigação de uso do SAF aplica-se apenas a voos comerciais na aviação civil, excluindo-se, assim, as aeronaves militares e aeronaves envolvidas em operações humanitárias, de busca, salvamento e socorro em catástrofes com fins médicos, bem como operações alfandegárias, policiais e de combate a incêndios. Outros agentes que não estariam sujeitos à obrigação seriam os operadores de aeronaves e aeroportos que operam abaixo de um limite mínimo. Será definido um patamar para o tráfego aéreo anual de passageiros e para o tráfego de mercadorias, e aeroportos abaixo desse patamar ficarão isentos da obrigação. Do mesmo modo, estarão isentos operadores de aeronaves com um número muito baixo de partidas de aeroportos na UE. O objetivo global é que pelo menos 95% do tráfego total partindo dos aeroportos da UE seja coberto pelo regulamento da Comissão Europeia.

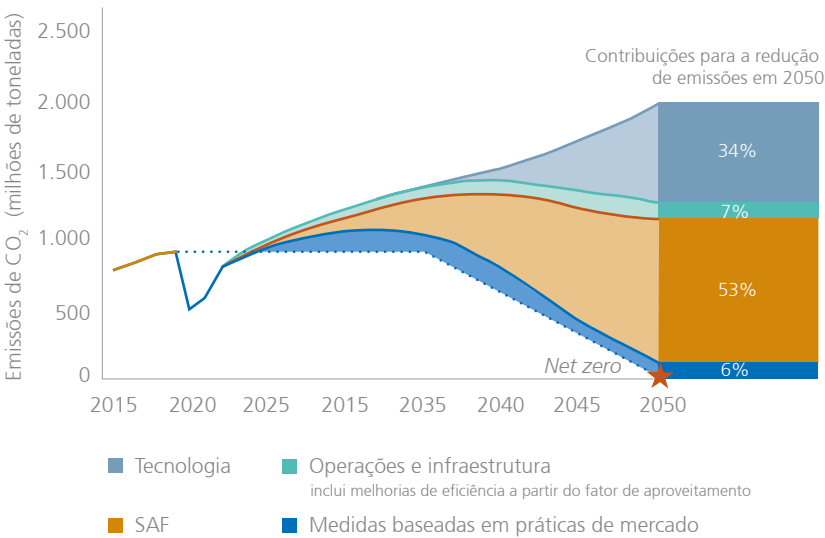
SAF, imprescindível para o *net zero 2050* da aviação

O SAF é um hidrocarboneto líquido que pode ser produzido a partir de matérias-primas orgânicas renováveis ou do aproveitamento de resíduos (agrícolas, urbanos, óleos e gorduras animais e vegetais usados). É um combustível compatível com a infraestrutura atual, sendo, portanto, uma tecnologia *drop-in*, de modo que sua utilização não enseja adaptações nos equipamentos aéreos. Consta que esteja disponível em mais de cem aeroportos no mundo, com 45 companhias aéreas recentemente tendo formalizado acordos de compra (*offtake agreements*) em cifras que remontam aos US\$ 45 bilhões (WEF, 2024b). De acordo com a ICAO, mais de 300 milhões de litros de SAF foram produzidos em 2022 e mais de 490 mil voos comerciais o utilizaram em 2023, a maioria deles nos EUA e na Europa.⁶

De fato, trata-se de uma alternativa que vem sendo reputada como fundamental e imprescindível para o alcance das metas climáticas. As estimativas indicam que somente seria possível alcançar o *net zero 2050* se o emprego do SAF viabilizar uma parcela superior a 50% de redução no volume das emissões do setor de aviação civil (Gráfico 1).

6 À guisa de comparação, em 2023 Europa e EUA registraram 10,2 milhões e 9,6 milhões de voos, respectivamente. Para mais informações, ver Eurocontrol (2024) e DOT (2024).

Gráfico 1 | Fatores utilizados pelo setor de aviação para alcançar o net zero 2050



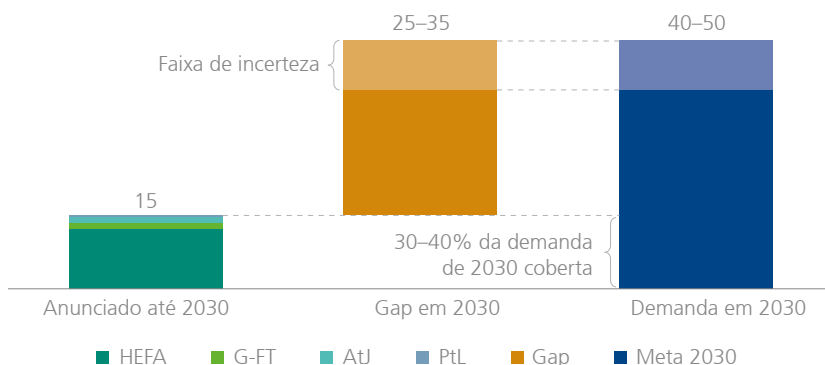
Fonte: Adaptado de Wille *et al.* (2022).

Diversas iniciativas vêm ocorrendo na tentativa de potencializar esse processo, como o acordo estabelecido pela indústria para reduzir as emissões em 5% e conseguir utilizar 10% de SAF na mistura com QAV já até 2030.⁷ O problema é que os volumes de SAF requeridos são muitíssimo maiores do que sua produção e utilização atuais. Considerando o consumo atual e o aumento esperado no consumo de QAV, a demanda em 2030 estaria entre 400 e 500 milhões de toneladas. Se todos os projetos de produção de SAF anunciados estiverem integralmente em produção até lá (daqui a cinco anos), como se pode ver no Gráfico 2, ainda assim a demanda projetada (entre 40 e 50 Mt de SAF para os 10% na mistura) seria muito superior à capacidade instalada, capaz de

7 Durante a Terceira Conferência Internacional da ICAO sobre combustíveis alternativos para o setor aéreo (Conference on Aviation and Alternative Fuels – CAA/F3), ocorrida em 2023, em Dubai, representantes da indústria se comprometeram a reduzir em 5% as emissões até 2030, ao passo que signatários da iniciativa Clean Skies for Tomorrow 2030, vinculada ao Fórum Econômico Mundial, declararam a intenção de utilizar 10% de SAF na mistura com o QAV até esse mesmo ano (WEF, 2024a).

atender somente entre 30% e 40% da demanda de 2030 (WEF, 2024a). As siglas HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*), G-FT (*biomass gasification Fischer-Tropsch*), AtJ (*alcohol-to-jet*) e PtJ (*power-to-liquid*) citadas no gráfico se referem a rotas tecnológicas de produção de SAF que serão descritas na seção “Como o SAF pode ser produzido”.

Gráfico 2 | Capacidade de produção projetada de uma mistura de 10% de SAF, em 2030*



* Fases do projeto consideradas: planejamento, decisão de investimento, construção e operação.

De modo geral, a meta *net zero* 2050, estabelecida após o Acordo de Paris⁸ como fundamental para manter o aquecimento global em um valor superior em apenas 1,5°C (no máximo 2°C) da média na era pré-industrial, é extremamente desafiadora. Portanto, não seria diferente para o setor aéreo, que se defronta com um cenário de grandes desafios para viabilizar emissões líquidas zero em tão curto horizonte temporal.

Cenários projetados até 2050 indicam uma demanda por 570 milhões de toneladas de QAV por ano, que gerariam 1,8 bilhão de toneladas de CO₂. Isso iria requerer, pelo menos, 60% de SAF como contramedida

8 Acordo estabelecido em Paris, onde ocorreu a 21ª Conferência das Partes (COP 21), em 2015, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas.

às emissões, o que, no caso, representaria uma demanda na faixa de 290 a 390 milhões de toneladas do combustível sustentável. Trata-se de um salto gigantesco, tendo em vista que em 2022 o consumo de SAF foi de apenas 0,27 milhão de toneladas, somente 0,1% do consumo global de QAV (IEA, 2023). Se observado unicamente o mercado estadunidense, tem-se que foram produzidos: em 2021, aproximadamente 5 milhões de galões de SAF; em 2022, 15,84 milhões de galões; e, em 2023, 24,5 milhões de galões. Com isso, o aumento necessário até 2030 será de 122 vezes, um crescimento de 98,7% por ano até lá (DOE, 2024).

Embora apenas poucas unidades produtivas estivessem em operação no ano 2023, acordos bilionários de compra já foram celebrados e, com isso, muitas plantas para produção de SAF já estão planejadas e em desenvolvimento. Houve um expressivo crescimento na produção em poucos anos, com aumento de cinco vezes só nos EUA; contudo, o ponto de partida era uma base muito pequena. Espera-se que a produção doméstica estadunidense já em 2027 seja sessenta vezes maior que a de 2022. As principais barreiras ao aumento de produção e utilização estão relacionadas à disponibilidade de matéria-prima sustentável; aos altos custos de produção associados às novas tecnologias e métodos produtivos; e à falta de clareza na regulamentação internacional. Além disso, a produção em larga escala requer investimentos vultosos, os quais, por se tratar de um mercado embrionário, encontram natural inércia para serem realizados, dificultando a execução dos projetos necessários ao atendimento da demanda no volume que se projeta. Atualmente, o SAF custa de duas a cinco vezes mais que o QAV (IEA, 2023).

Uma vez vencido o preponderante desafio de aumento exponencial da produção de SAF, ele deverá ser o elemento fundamental para a redução das emissões do setor aéreo, em decorrência dos critérios de sustentabilidade estabelecidos pela ICAO ao longo de todo seu ciclo

de vida, desde o preparo da matéria-prima para sua produção até sua efetiva queima nas turbinas dos aviões. Como visto anteriormente, os critérios estabelecidos pela ICAO para a produção do SAF visam garantir que: (i) seja alcançada a redução líquida das emissões de GEEs em uma base de ciclo de vida (em comparação com o QAV); (ii) se contribua para o desenvolvimento social e econômico local, ou seja, a produção tem de ser social e economicamente justa; e (iii) se evite a competição com alimentos e não restrinja o fornecimento de água para a população local.

Formas de rastreamento e contabilização do benefício ambiental do SAF

Não existem dificuldades técnicas ou tecnológicas para a produção e a utilização do SAF em mistura com o QAV. Trata-se de um problema de economicidade que, para além dos desafios para sua produção em ordens de grandeza de escala maiores que as atuais, enceta um significativo aumento de complexidade da atual cadeia produtiva da aviação em virtude da entrada de novos atores, como os fornecedores de matérias-primas para produção do SAF, seus produtores e distribuidores. Além disso, o fato de o SAF ser fungível com o QAV torna crucial a instituição de um mecanismo de contabilidade transparente e confiável que permita rastrear todo ciclo de produção, de forma que os consumidores possam reivindicar, com segurança, o benefício ambiental das suas compras de SAF.

O rastreamento é necessário porque, após a mistura do SAF com QAV, as moléculas do SAF não podem mais ser rastreadas de forma independente ao longo da cadeia de abastecimento. Na ausência de um

mecanismo de contabilização adequado, os atributos de sustentabilidade só poderiam ser apurados se o SAF permanecesse fisicamente segregado do QAV do ponto de origem até o tanque da aeronave.

Portanto, as reduções de emissões devidas ao uso de SAF precisam ser contabilizadas de forma destacada do produto físico. Isso deve ser realizado por meio de uma abordagem bem fundamentada e transparente de cadeia de custódia, a fim de garantir a qualidade desde a origem até o uso final do SAF, evitando fraudes e falsificações na contabilização da redução das emissões que pode ser promovida pela sua utilização.

Existem diferentes formas de contabilizar a quantidade de SAF compondo a mistura consumida pelas aeronaves, tais como: segregação, balanço de massa e o chamado registro e reivindicação – *book and claim* (IEA, 2023).

A segregação é um método bastante preciso na cadeia de custódia e estabelece que materiais com diferentes características (por exemplo, em relação à sustentabilidade) ou certificações sejam mantidos fisicamente separados ao longo de sua trajetória na cadeia de abastecimento. A segregação pode ser exigida com preservação de identidade, ou a granel, caso em que se permite a mistura física de produtos sustentáveis com diferentes certificações ou diferentes características de sustentabilidade, como matéria-prima originária e nível de emissões de GEEs. Em ambos os casos de segregação, não é permitida a mistura física de produtos sustentáveis com não sustentáveis ao longo da cadeia de abastecimento. Essa forma de contabilização impõe muitas complicações para o bom funcionamento porque as fontes de produção de combustíveis são dispersas e, muitas vezes, distantes dos centros de consumo. Portanto, o custo logístico poderia se tornar impeditivo para alguns consumidores, inviabilizando, assim, a meta global de zero emissões líquidas.

Já o balanço de massa é um método concebido para permitir que se rastreie o emprego de conteúdos sustentáveis ao longo do ciclo de produção (ou distribuição) de modo que o produto final contenha uma parcela de conteúdo sustentável que seja auditável. Para isso, toda a massa de material sustentável empregada deve ser certificada e rastreada ao longo da cadeia de suprimentos. É por esse método que se torna possível afirmar que um determinado produto é composto por um certo percentual de insumo sustentável. Por isso, hoje é usual deparar-se com informações do tipo “composto por 90% de plástico reciclado” em produtos manufaturados, por exemplo.

Diferentemente da segregação, o método de balanço de massa permite misturar SAF ao QAV numa mesma infraestrutura, contudo seria necessário que os utilizadores retirassem fisicamente o combustível dessa infraestrutura para se beneficiar do crédito ambiental. Apesar de ser mais flexível que a segregação, é importante observar que, em certas circunstâncias, o balanço de massa apresenta dificuldades de implementação. Em estágios iniciais de desenvolvimento de mercado, como no caso do SAF, a produção vai provavelmente se concentrar em um número restrito de locais. Isso prejudica os consumidores com acesso limitado à infraestrutura física de produção e distribuição do SAF.

Uma outra forma mais avançada de contabilização seria o mecanismo de registro e reivindicação (*book and claim*), que tem sido visto por muitos como uma alternativa que viabilizaria o *ramp-up* do mercado SAF e o efetivo início de sua mistura em larga escala ao QAV, sendo a mais viável alternativa para deslançar o mercado em nível global, viabilizando que não seja apenas um mercado de nicho. Nesse método, haveria um desacoplamento entre os benefícios ambientais que o SAF pode produzir e os fluxos físicos de sua produção, distribuição e uso (WEF, 2024a). Em outras palavras, os benefícios ambientais do produto

físico não são obrigatoriamente alocados aos consumidores de SAF, como nos métodos de balanço de massa ou de segregação. Eles podem ser transferidos, por meio de um registro dedicado, ao operador que não tenha acesso fácil ao SAF. O *book and claim* oferece, portanto, uma solução para o desafio logístico de levar o SAF ao mercado consumidor.

Dessa forma, o *book and claim* permitiria que o SAF produzido e consumido em São Paulo, por exemplo, pudesse gerar certificados válidos para aquisição por uma companhia europeia, que quitaria sua obrigação de uso na Europa. Esse desacoplamento traz a vantagem de privilegiar sua produção nas regiões mais competitivas, com menores custos de produção. Ademais, minimizaria os custos de transporte e distribuição do produto, como também as emissões de carbono decorrentes dessas etapas do processo.

Para o funcionamento de um modelo *book and claim* é fundamental a implementação de um arcabouço institucional, com abrangência global, que rigorosamente garanta a credibilidade e o controle dos certificados atrelados à produção e à utilização do SAF. Esse mesmo arcabouço deve controlar a comercialização dos certificados emitidos e seu uso por companhias que precisarem aderir às regras de descarbonização, mas que não disponham (pelo menos em quantidade suficiente) de SAF para uso direto. Uma autoridade de controle global deve garantir que a quantidade de certificados SAF utilizada corresponda ao número de certificados SAF emitidos e efetivamente negociados, devendo, também, eliminar a possibilidade de dupla contagem no abatimento de emissões.

De fato, as matérias-primas não estão disponíveis em vários locais, o que impõe dificuldades a muitos potenciais clientes. Se garantir que o SAF esteja fisicamente disponível em todos os aeroportos em curto espaço de tempo for um requisito, haveria elevados custos de transporte e, paradoxalmente, um aumento das emissões. Além disso, os custos podem

ser reduzidos quando se empregam diferentes tecnologias produzindo SAF a partir de matérias-primas diversas.

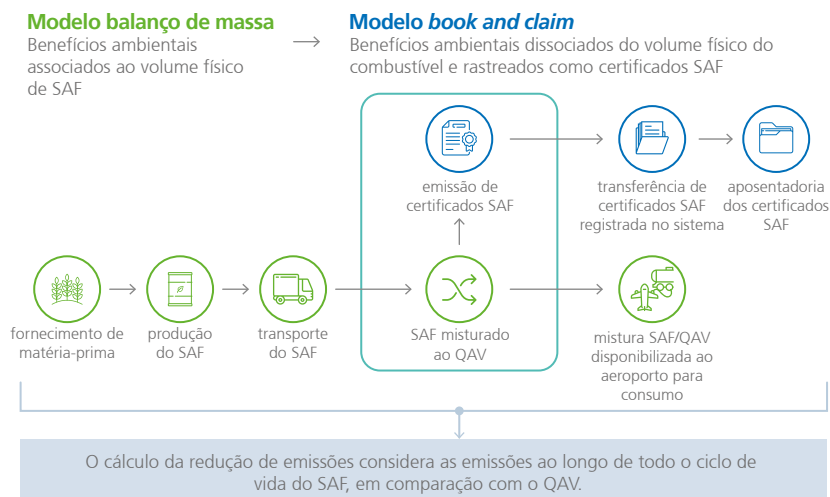
Existem esforços em andamento para implementar todas as complexas vertentes necessárias à adoção e ao uso de um modelo *book and claim* para o SAF. Por exemplo, a descrita em WEF (2022) dá conta da iniciativa da coalizão Clean Skies for Tomorrow (CST) – ente fomentado pelo Fórum Econômico Mundial –⁹ em associação com outras entidades, como a Aliança de Compradores da Aviação Sustentável (Sustainable Aviation Buyers Alliance – SABA)¹⁰ e a Mesa Redonda sobre Biomateriais Sustentáveis (Roundtable on Sustainable Biomaterials – RSB).¹¹ Trata-se de desenvolver uma abordagem padronizada de contabilização e controle da redução das emissões passíveis de serem obtidas com o SAF ao longo de toda sua cadeia de valor, materializando-a em uma metodologia de *book and claim* rigorosa e transparente. O mecanismo de *book and claim* proposto por eles para controlar a emissão, comercialização e aposentadoria dos certificados SAF utiliza um sistema preexistente de certificação baseado no método de balanço de massa para garantir total rastreabilidade e eficácia do Benefício ambiental produzido por um determinado lote de SAF ao longo de todo seu ciclo de vida, como se vê na Figura 1. Espera-se máxima aderência do esquema proposto aos padrões e guias do Greenhouse Gas Protocol (GHGP), Science Based Targets initiative (SBTi) e CORSIA.

9 A coalizão Clean Skies for Tomorrow busca prover uma plataforma para a indústria e a sociedade civil se alinharem frente ao desafio de alcançar emissões líquidas zero até 2050, no setor de aviação (WEF, 2022).

10 A SABA tem por membros grandes corporações, como Amazon, Boeing, GE Aerospace, Google, Morgan Stanley, entre outras, além da organização sem fins lucrativos para promoção da energia limpa Rocky Mountain Institute (RMI). Ver mais em: <https://flysaba.org/>.

11 A RSB define princípios e critérios para garantir que a transição energética global esteja lastreada numa visão holística de sustentabilidade, extrapolando a mera busca pela descarbonização e tentando alavancar, também, ganhos sociais e ambientais. Conta com a participação de mais de 130 indústrias e líderes setoriais, bem como sociedades civis e ambientais, comunidade acadêmica, órgãos governamentais e a ONU. Ver mais em: <https://rsb.org/>.

Figura 1 | Controle do ciclo de vida do SAF e dos certificados SAF



Fonte: Adaptado de WEF (2022).

Na Figura 1, vê-se que a emissão de um certificado SAF ocorre na etapa em que ele é misturado ao QAV, processo sob responsabilidade de fornecedores de combustível para a aviação. Esses fornecedores, portanto, são os únicos entes capazes de emitir os certificados SAF. Uma vez emitido, ocorre o desacoplamento entre o certificado e o lote físico de SAF utilizado na mistura SAF/QAV, que passa a ser tratada como QAV convencional. Desse modo, a utilização direta da mistura não servirá mais para contabilizar reduções de emissão, pois, caso contrário, acarretaria dupla contagem quando o certificado SAF relacionado fosse utilizado.

Os certificados SAF poderão ser negociados com companhias aéreas e clientes corporativos em geral para o cumprimento de compromissos ou obrigações ambientais. Quando um certificado SAF é utilizado em contrapartida a tais compromissos ou obrigações ambientais, ele deixa de valer e se torna “aposentado” (conforme jargão do mercado).

Esse sistema permitiria aos operadores de aeronaves utilizarem o combustível físico num local e, ao mesmo tempo, reivindicar os benefícios ambientais num local diferente para reduzir as suas emissões. A possibilidade de abatimento de emissões com base em um sistema de *book and claim* se mostra bastante interessante para o mercado de aviação comercial e executiva, principalmente quando os volumes são pequenos e adquiridos de forma pulverizada, de diferentes localidades. Se o SAF não estiver disponível no local onde a aeronave está voando, o sistema de *book and claim* viabiliza o comércio de certificados de redução de emissões de carbono. Em contrapartida, o SAF tem de ser colocado em uma cadeia de abastecimento em que seja mais rentável e em que as emissões de carbono provenientes de seu transporte possam ser reduzidas. O cliente do *book and claim* recebe um certificado que atesta a correspondente redução de emissões de carbono ao longo do ciclo de vida. É importante notar que, em se tratando de um regime voluntário, os certificados não seriam elegíveis ao abrigo de regimes regulamentados.

Dessa forma, o mecanismo facilita o cumprimento de metas para os operadores de aeronaves e permite acelerar a descarbonização da aviação. Em suma, ao fornecer um mercado global para SAF, o uso de registros e reivindicações pode:

- i) habilitar a produção de SAF onde ela for mais eficiente;
- ii) minimizar custos logísticos;
- iii) evitar emissões adicionais provenientes dos transportes; e
- iv) promover a competição entre fontes de suprimento.

Em que pesem as manifestas vantagens existentes em um sistema *book and claim* e seu potencial de favorecer a produção e uso do SAF em larga escala em período relativamente curto, sua adoção tem sido

vista com reticência pela UE, cuja proposta de regulamento não o contempla, embora não exclua a possibilidade de sua utilização futura, desde que regido por regras sólidas que garantam a integridade ambiental do sistema. Além de obrigações impostas aos fornecedores de combustível, uma outra é imposta às companhias aéreas, denominada obrigação de reabastecimento, que pretende garantir que a quantidade anual de combustível abastecido em um determinado aeroporto da UE seja de pelo menos 90% do combustível necessário para os voos. Isso visa evitar práticas de *tankering*, como a de abastecer a aeronave com mais combustível fora da UE do que o necessário para o voo, a fim de reduzir o reabastecimento em um aeroporto de destino em que o combustível de aviação seja mais caro. Essa prática poderia levar ao aumento das emissões (fuga de carbono) devido à maior carga transportada desnecessariamente e, conseqüentemente, ao maior consumo de combustível. Também poderia proporcionar concorrência desleal entre distribuidoras europeias de combustível e distribuidoras instaladas fora da Europa.

Apesar dessa posição da UE, algumas entidades, como as já citadas aqui, vêm defendendo e apoiando a implantação de um sistema *book and claim*, considerando-o essencial para o início da produção e utilização do SAF em larga escala em um curto intervalo de tempo. Iniciativas já foram tomadas de forma voluntária para testar a sistemática.

Como o SAF pode ser produzido

Existem duas categorias de combustível para aviação elegíveis pelos critérios do CORSIA: SAF e LCAF. Segundo a ICAO, o SAF é um combustível para aviação oriundo de recursos renováveis – óleos

vegetais, biomassa, gordura animal, resíduos orgânicos, gases residuais – com uma pegada de carbono menor que a do QAV, considerando-se uma análise de todo seu ciclo de vida. De fato, dada a quantidade de matérias-primas e tecnologias que podem ser utilizadas para sua produção, consideram-se SAFs todos os combustíveis para aviação de origem não fóssil que atendam critérios específicos de sustentabilidade, além, claro, de apresentarem uma intensidade de carbono menor. Podem ser divididos em duas grandes categorias de combustíveis (IEA, 2023):

- i) a daqueles produzidos a partir de biomassa, que pode ser derivada de culturas alimentares ou de culturas exclusivas para a produção de energia, bem como de resíduos urbanos, agrícolas e florestais, óleos e gorduras animais e vegetais; e
- i) a dos sintetizados – e-combustíveis –, também conhecidos como combustíveis renováveis ou de origem não biológica, eletrocombustíveis ou, ainda, *power-to-liquid* (PtL). Trata-se de hidrocarbonetos sintéticos produzidos com eletricidade renovável, hidrogênio e carbono biogênico ou capturado. Apresentam muito baixa emissão de GEEs e, teoricamente, nenhum impacto relacionado ao uso da terra, mas seus custos de produção ainda são bastante elevados.

Se o SAF é produzido a partir de matéria-prima renovável ou de resíduos, os LCAFs são combustíveis de origem fóssil que podem ser elegíveis ao CORSIA desde que apresentem uma pegada de carbono menor em pelo menos 10%, considerando todo seu ciclo de vida, que o parâmetro (*baseline*) estabelecido para o QAV, cuja intensidade média é de 89 gCO₂e/MJ, como já citado (Prussi *et al.*, 2021).

O SAF apresenta muitas vantagens em relação a alternativas como eletrificação ou células a combustível, destacando-se: (i) compatibilidade com motores e infraestrutura, motivo pelo

qual é classificado como *drop-in*, pois é totalmente fungível quando misturado ao querosene de aviação e não requer ajustes nos motores das aeronaves e na infraestrutura existente; (ii) menor emissão, já que o SAF puro tem o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 80%, em comparação com o QAV convencional, dependendo da matéria-prima e da rota tecnológica, havendo expectativa de atingir entre 85% e 95% de redução nas próximas gerações de SAF, caso sejam viabilizadas tecnologias empregando algas, resíduos agrícolas, de animais e florestais, bem como de resíduos perecíveis, a exemplo de embalagens biodegradáveis e restos de alimentos; e (iii) maior flexibilidade, pois o SAF pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas e diferentes tecnologias de produção.

Para ser SAF, o combustível deve atender o padrão ASTM-D7566, da ASTM International,¹² que determina as especificações aceitáveis para a mistura de componentes não fósseis com o QAV. O combustível certificado nesse padrão é considerado seguro para utilização na aviação. O padrão ASTM-D1655 é o que regula toda especificação original do QAV. Tanto as matérias-primas quanto as rotas tecnológicas que as convertem em SAF devem constar nesses dois padrões ASTM (Prussi *et al.*, 2021).

12 ASTM International era, anteriormente, a American Society for Testing and Materials, por isso ASTM. Trata-se da autoridade internacional incumbida da certificação do SAF.

Utilização da infraestrutura existente por uma tecnologia *drop-in*

O SAF e o LCAF poderiam ser produzidos em instalações existentes, como refinarias ou unidades de produção de biocombustíveis. No caso de refinarias, o combustível poderia ser misturado ao QAV e depois fluir pela cadeia de abastecimento de forma convencional, por meio de dutos para os terminais e, posteriormente, para os aeroportos, seja por dutos ou por caminhões. No caso de o SAF ser produzido em instalações dedicadas exclusivamente ao combustível, é mais provável que seja misturado com o querosene fóssil nos terminais diretamente a montante de um aeroporto, ou em bases de distribuição mais afastadas, e transportado por dutos, caminhões ou barcas até um terminal próximo ao aeroporto. Não é necessário haver alterações nas operações de combustível no aeroporto, uma vez que se espera que os aeroportos continuem recebendo combustível misturado nos mesmos dutos e caminhões, como de praxe. Embora seja tecnicamente possível misturar combustíveis em um aeroporto, não é o método mais prático ou econômico de fazê-lo, devido à necessidade de instalações, equipamentos, pessoal e seguros adicionais. Devido aos rígidos padrões de qualidade do combustível para aviação, é mais seguro certificar o SAF como ASTM D1655 a montante de um aeroporto.

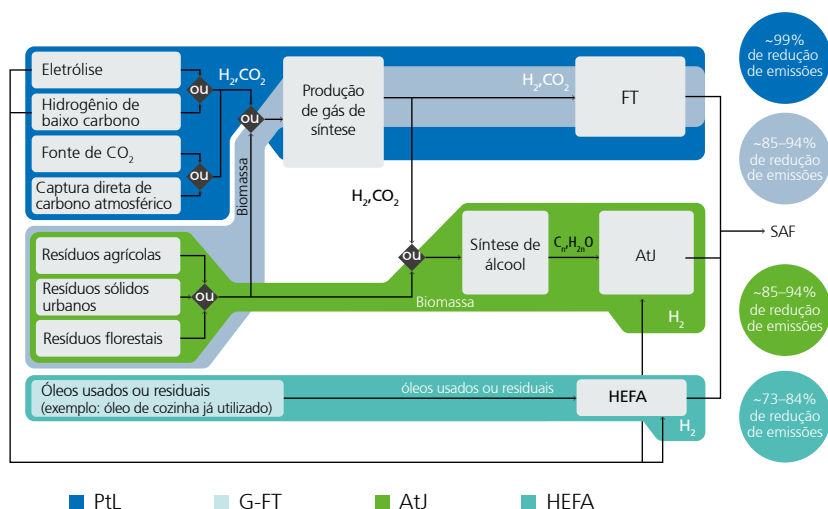
O processo de aprovação de um novo combustível de aviação é extremamente rigoroso e demorado, muito em função da necessidade de se garantir que as características físico-químicas e de desempenho do combustível – no caso, da mistura SAF/QAV – atinja o alto nível de qualidade que o próprio QAV deve apresentar. Atualmente, existem nove rotas de produção de SAF certificadas e várias outras em processo de certificação junto à ASTM (IEA, 2023).

Quatro rotas certificadas são as mais promissoras até o momento: (i) a rota HEFA; (ii) a rota de gaseificação de biomassa com o processo G-FT; (iii) a rota que converte o etanol, o isobutanol, ou um outro álcool, em querosene parafínico sintético (*synthetic paraffinic*

querosene – SPK), por isso chamada de AtJ; e (iv) a PtL, que sintetiza os chamados e-combustíveis. Na Figura 2, tem-se uma esquematização dessas rotas.

É importante perceber que a certificação ASTM atesta tão somente a segurança para uso na aviação de um determinado percentual de SAF na mistura com o QAV. Essa certificação não tem relação alguma com o estágio de desenvolvimento da rota utilizada. De fato, há rotas certificadas que se encontram ainda em estágio de projeto-piloto, carecendo de desenvolvimento suplementar para aplicação industrial. Das quatro rotas aqui citadas, a que já vem sendo utilizada em maior escala é a HEFA. As rotas G-FT e AtJ são as maiores apostas para se conseguir produzir os expressivos volumes de SAF necessários até a década de 2030. A rota PtL segue como uma aposta para mais longo prazo, requerendo muito mais desenvolvimento e redução de custos.

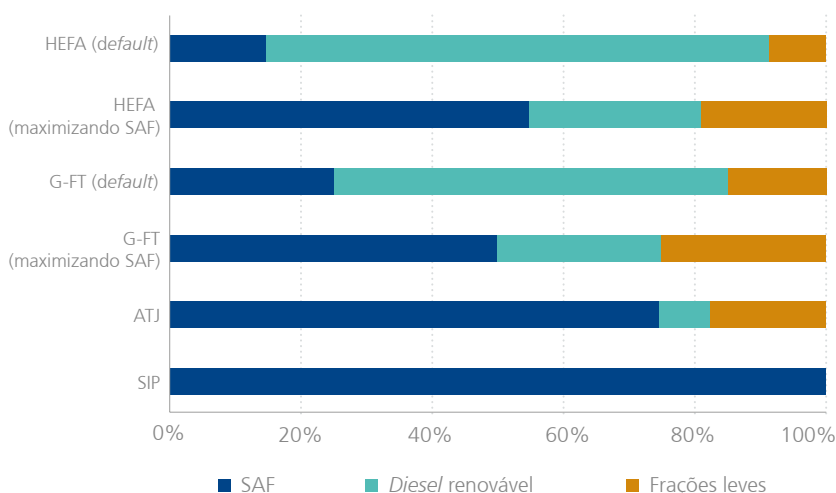
Figura 2 | As quatro rotas tecnológicas mais promissoras para produção de SAF



Fonte: Adaptado de WEF (2024a).

A rota HEFA já é bastante utilizada hoje em dia, pois se trata do processo atualmente empregado na maior parte da produção do *diesel* verde, ou *diesel* renovável, conhecido como óleo vegetal hidrotratado (*hydrotreated vegetable oil* – HVO). De fato, no processo de produção de HVO também é produzida naturalmente uma fração de SAF e de outros hidrocarbonetos mais leves. A opção pela produção majoritária de SAF requer etapas adicionais, ou calibrações alternativas, nesse processo, de modo que se obtenha a maximização de sua produção em detrimento da produção do *diesel* verde. Isso, como se pode esperar, necessariamente torna a produção do SAF mais onerosa do que a do *diesel* verde. No Gráfico 3,¹³ percebe-se que o mesmo também ocorre, pelo menos, com a rota G-FT.

Gráfico 3 | Divisão de hidrocarbonetos produzidos em cada rota tecnológica, com indicação da reconfiguração quando se visa maximizar a produção de SAF



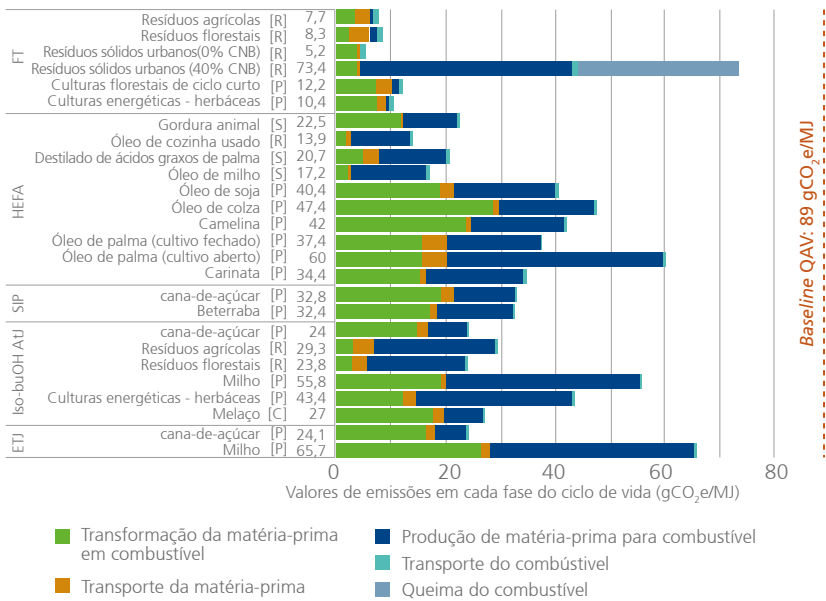
Fonte: Adaptado de Pavlenko, Searle e Christensen (2019).

13 No Gráfico 3, existe a menção à rota de síntese de isoparafina (*synthesized isoparaffins* – SIP), também chamada de *direct sugar-to-hydrocarbons* (DSHC). Nessa rota, que tem como matéria-prima um açúcar, é produzido o farneseno, $C_{15}H_{24}$, que, após transformado em cadeias $C_{15}H_{32}$, pode ser misturado em até 10% ao QAV (Pavlenko; Searle; Christensen, 2019).

A rota HEFA pode utilizar como matéria-prima o óleo extraído de alguma oleaginosa cultivada para esse fim, como a soja, bem como de outras plantações, como a palma e a macaúba. Embora não se exclua a possibilidade de utilização do óleo de soja, seu uso gera uma pontuação baixa de acordo com os critérios do CORSIA, os quais visam evitar a competição entre a produção de SAF e a de alimentos, como citado. Também há a preocupação de a produção de SAF induzir, ainda que indiretamente, mudanças no uso da terra que acabem por favorecer o aumento de emissões. Fontes de matérias-primas mais bem pontuadas que se aplicam a essa rota seriam óleos e gorduras usados ou residuais de origem animal ou vegetal, como sebo bovino, resíduos de peixes e óleo de cozinha já utilizado – todas essas possibilidades, na Figura 2, foram categorizadas como “óleos usados ou residuais” (*waste oils*).

Na Figura 4, tem-se uma visão da performance em termos de redução das emissões do SAF produzido pela rota HEFA, bem como de outras, com diversas matérias-primas alternativas. A rota AtJ está segmentada em *etanol-to-jet* (EtJ) e *isobutanol-to-jet*. Levando-se em conta a análise de emissões ao longo de todo o ciclo de vida (LCA) do SAF produzido, bem como eventuais mudanças indiretas no uso da terra (ILUC), pontua melhor a combinação que gera o menor nível de emissões.

Gráfico 4 | Emissão por matéria-prima e rota tecnológica na produção de SAF



Fonte: Adaptado de Prussi et al. (2021).

Nota: Foi utilizada a seguinte categorização para a matéria-prima: produto principal [P], coprodutos [C], resíduos [R], e subprodutos [S]. Além disso, CNB denota carbono não biogênico.

O primeiro passo de conversão da matéria-prima na rota HEFA é sua submissão a uma reação química de desoxigenação. Em seguida, hidrogênio é adicionado com o intuito de quebrar as moléculas de gordura em cadeias de hidrocarbonetos que, posteriormente, sofrem um refinamento para produzir uma mistura resultante de SAF, *diesel* verde e hidrocarbonetos leves, como visto no Gráfico 3. O SAF produzido com essa rota pode ser misturado ao QAV a uma proporção de até 50%, conforme certificado pela ASTM.

A rota G-FT usa alguma biomassa como matéria-prima em um já conhecido processo de gaseificação, que produz o chamado gás de síntese (*syngas*), cujos principais componentes são o hidrogênio e o

monóxido de carbono. A biomassa utilizada pode ser derivada de resíduos florestais, agrícolas ou resíduos sólidos urbanos, bem como de plantações específicas com o propósito de geração de combustíveis. O gás de síntese é submetido a um reator Fischer-Tropsch, também uma tecnologia já bastante conhecida e utilizada, o qual, sob a atuação de catalisadores, produz, como na rota HEFA, vários combustíveis líquidos. O SAF produzido com essa rota também está certificado para uma mistura de até 50% com o QAV.

Na rota AtJ, pode ser utilizada qualquer matéria-prima que produza um álcool, como etanol, metanol ou isobutanol. O álcool produzido pode ser convertido em SAF. Há uma expectativa de que os altos volumes de bioetanol já produzidos atualmente possam ser redirecionados para aumentar em relativo curto prazo a produção de SAF, em processos que podem se beneficiar dos grandes volumes de biomassa concentrada disponível para a produção de bioetanol. Isso configura uma situação de custos logísticos mais favoráveis do que a de outras rotas cujas matérias-primas tendem a estar dispersadas em volumes não concentrados. A tecnologia de conversão de álcool em SAF já foi testada industrialmente, mas não se viu ainda sua aplicação em larga escala e não se tem noção da magnitude de redução de custos no processo como um todo que poderá ser alcançada com a massificação de seu uso. O SAF produzido por essa rota também tem certificação ASTM para compor uma mistura de até 50% com o QAV.

Pelos critérios CORSIA, a utilização de etanol de segunda geração (E2G) permite a derivação de um SAF bastante competitivo em termos de redução de emissões. A brasileira Raízen foi a primeira produtora certificada de SAF a partir de E2G. Segundo informações obtidas no *site* da empresa, o SAF que poderá ser produzido dessa maneira superará

os 80% de redução das emissões ao longo de seu ciclo de vida, emitindo apenas 16 gCO₂/MJ (Raízen, [202_]).

A última rota destacada é a PtL. Considerando-se estritamente o processo de conversão em SAF, ela seria a conhecida rota Fischer-Tropsch, na qual um reator converte o gás de síntese em SAF. A diferença é que a obtenção do gás de síntese não se daria a partir da gaseificação de alguma biomassa, como na G-FT. No caso da PtL, esse gás seria produzido a partir de hidrogênio obtido com a eletrólise da água, utilizando eletricidade renovável, e carbono capturado. Como é de se esperar, o carbono utilizado não pode ter origem fóssil. Desse modo, trata-se do único processo para produção de SAF que não fica limitado à disponibilidade de matéria-prima de origem orgânica. Porém, é a rota que levará mais tempo para estar madura e viável economicamente. Como, essencialmente, trata-se da mesma rota FT já certificada pela ASTM, prevalece a possibilidade de até 50% na mistura com o QAV.

É importante ter ciência de que o SAF pode ser coprocessado com o QAV numa refinaria de petróleo, em misturas de até 5%, como estabelecido na norma ASTM D1655. Seria uma forma mais simples de se introduzir o combustível no mercado em pequenas quantidades, usando a infraestrutura atual, necessitando-se apenas de investimentos marginais nas refinarias existentes. Entretanto, o investimento só será realizado quando existirem sinais claros de que haverá interessados em comprar um combustível mais caro por um período suficiente para amortizar o investimento.

Iniciativas no Brasil

Devem ser destacadas duas ações no âmbito federal relacionadas à promoção de SAF no Brasil. Primeiramente, a Lei 14.248, de 25 de novembro de 2021, que estabeleceu o Programa Nacional do Bioquerosene para o incentivo à pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassas, visando a sustentabilidade da aviação brasileira.

A lei não destina nenhum recurso específico para o SAF, mas apresenta critérios para que ele possa auferir benefícios do Programa Nacional do Bioquerosene:

- i) a compatibilidade do SAF com as tecnologias de propulsão atuais, de modo que não seja necessário alterar motores, aeronaves e infraestrutura de distribuição existentes; e
- ii) o não comprometimento da segurança no sistema de aviação.

Outrossim, a Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024, institui, entre outros, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o ProBioQAV, cujo objetivo é incentivar a pesquisa, produção, comercialização e uso de SAF. Essa lei visa estabelecer, a partir de 2027, obrigação aos operadores aéreos de reduzir suas emissões de GEEs nos voos domésticos por meio do uso do SAF. As metas começam com 1% de redução e crescem gradativamente até atingir 10% em 2037.

Caberá à Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) estabelecer metodologia de cálculo e traçar um cenário base de emissões para cada ano, supondo-se que todo o consumo estaria sendo realizado com combustível fóssil, para assim poder calcular as metas de redução de emissões. A agência também terá o papel de fiscalizar o cumprimento dessa obrigação

(Piovesan, 2023). Ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), caberá alterar os percentuais de redução de emissões para o setor.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) exercerá a função de contabilizar as emissões do ciclo de vida do SAF produzido e utilizado no país. O regulamento brasileiro busca o alinhamento metodológico com a ICAO em relação aos requisitos de elegibilidade e de certificação, para que, de fato, sejam cumpridos os compromissos internacionais de descarbonização pelas companhias aéreas.

No ProBioQAV, há uma preocupação com o princípio da reciprocidade, ou seja, se outros países impuserem obrigações de uso do SAF às companhias aéreas brasileiras fora das exigências da ICAO, o governo brasileiro poderá impor metas recíprocas para as companhias aéreas desses países em voos com passagem pelo território nacional (Piovesan, 2023).

O programa também destaca que as medidas não devem gerar prejuízo ou cumulatividade aos acordos setoriais ou regulamentos específicos que tratem de outras metas de redução de emissões dos gases de efeito estufa.

Entre os impactos esperados pelo Governo Federal com a introdução do SAF na matriz energética e de transportes no Brasil, o grupo técnico que elaborou o ProBioQAV destaca os seguintes (Ministério de Minas e Energia, 2023):

- i) suporte para atendimento aos compromissos perante o CORSIA, com vistas à redução da intensidade de carbono na aviação;
- ii) incentivo para o alcance das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) do Brasil;
- iii) identificação de rotas tecnológicas que aproveitem vantagens competitivas do Brasil na produção de SAF;

- iv) redução da dependência externa de importações de QAV (fóssil);
- v) desenvolvimento de mercado de insumos para a produção de SAF;
- vi) viabilização do crescimento sustentável e da escalabilidade do mercado de SAF no Brasil;
- vii) oportunidade de avaliar o alinhamento metodológico da Política Nacional dos Biocombustíveis, em especial o RenovaBio, com o CORSIA, principalmente no que tange à certificação e ao aproveitamento dos créditos de descarbonização para abatimento das obrigações; e
- viii) oportunidade de estruturar incentivos a pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para o mercado de combustíveis sustentáveis de aviação.

Há alguns princípios que norteiam a elaboração do marco regulatório do ProBioQAV, que podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- i) Adoção de metas de reduções de emissões de dióxido de carbono pelos operadores aéreos, diferentemente de políticas mandatórias adotadas para biodiesel e etanol, as quais fixam percentuais de mistura em volume. Contudo, o programa está alinhado com as diretrizes do CORSIA, as quais também se baseiam na redução de emissões de dióxido de carbono.
- ii) Quando a meta passa a ser a redução de emissões, torna-se fundamental não excluir nenhuma fonte de matéria-prima, desde que o combustível atenda aos requisitos impostos pela ASTM e pela ANP. Com isso, pretende-se não privilegiar nenhuma rota específica na política pública, promovendo a competição e a redução de custos de produção.
- iii) Para oferecer maior grau de liberdade aos operadores, a lei admite meios alternativos para cumprimento da meta. A ideia é permitir, por exemplo, teores diferentes de SAF em qualquer

parte do território nacional. Assim, a descarbonização poderia se concretizar independentemente do local em território nacional, sem a necessidade de que o percentual de SAF misturado ao querosene de aviação fóssil fosse uniforme, respeitadas as regulamentações nacionais sobre limites máximos de mistura. O principal benefício dessa diretriz é oferecer maior flexibilidade aos operadores aéreos no consumo do SAF.

- iv) O princípio da reciprocidade pode ser utilizado em caso de imposição específica, por outros países, de obrigações relativas ao uso de SAF aos operadores aéreos nacionais. Nesse caso, os voos de operadores aéreos internacionais com passagem pelo território nacional poderão ser submetidos aos critérios do ProBioQAV ou obrigação similar à imposta por aqueles países.¹⁴

A introdução do SAF na matriz energética e de transporte está prevista para 2027, em consonância com o CORSIA. Para estimar os percentuais de redução de emissões, o ProBioQAV considerou três plantas que estão sendo instaladas ou em nível de projeto no Brasil. São elas:¹⁵

- i) planta dedicada da Petrobras em Cubatão-SP (capacidade de 314,8 mil m³/ano);
- ii) biorrefinaria proposta por parceria entre Brasil Biofuels (BBF) e Vibra Energia (capacidade de 250 mil m³/ano) em Manaus-AM; e
- iii) unidade da Raízen em Piracicaba-SP.¹⁶

14 O princípio da reciprocidade não é aplicável aos casos em que obrigações relativas ao uso de SAF sejam adotadas como parte da implementação de normas, de padrões ou de acordos estabelecidos no âmbito do regime multilateral da aviação civil.

15 Ver EPE (2024).

16 A capacidade de produção desta unidade não foi considerada nas estimativas para cálculo de metas de redução. Também não se considerou a unidade da Acelen.

Estima-se que o volume necessário de SAF para cumprimento das obrigações de 1% e 10% de redução de emissões deverá alcançar, respectivamente, 2,87 e 28,76 mil m³/ano. A proposta também faz um teste de estresse, admitindo apenas 50% da capacidade das plantas previstas e estimando que, ainda assim, haveria capacidade para atender a demanda doméstica de SAF para voos domésticos. Dessa forma, a lei fixa os seguintes percentuais mínimos de redução de emissões como metas para o ProBioQAV:

Tabela 1 | Percentual mínimo de redução das emissões – ProBioQAV

Ano	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Percentuais mínimos	1%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%

Fonte: Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024.

Considerações finais

É importante destacar que, para se alcançar a economia neutra em carbono em 2050, será necessário reduzir as emissões do setor aéreo, considerado um daqueles de mais difícil descarbonização. Para cumprir esse objetivo, o uso de novos combustíveis avançados, como o SAF, é visto como imprescindível e a melhor alternativa para o setor aéreo, uma vez que é um combustível *drop-in*, que utilizará toda a infraestrutura existente, sem necessidade de modificar os motores das aeronaves.

Ao mesmo tempo que o SAF pode ser um combustível promissor, traz consigo diversos desafios econômicos e tecnológicos. A produção do SAF pode ser realizada por diversas tecnologias, estando algumas em estágios mais avançados e outras ainda em pleno desenvolvimento.

É importante que não haja limitações ao uso dessas tecnologias, e sim a promoção da concorrência entre elas. Medidas que limitem o uso de qualquer tecnologia podem induzir a escolha de alternativa mais onerosa à economia.

A produção do SAF atualmente é muito mais custosa do que a do combustível de aviação fóssil. Isso significa que o seu uso de forma intensiva acarretará aumento de custo para as companhias aéreas. Caso não haja redução do seu custo de produção no médio prazo, a consequência pode ser o aumento dos preços das passagens aéreas, o que poderá reduzir a demanda potencial por voos – prejudicando especialmente aquelas companhias aéreas que não estejam em situação econômica confortável. Há necessidade de uma harmonização factível entre as necessidades e os desafios, tanto do lado da oferta quanto do lado da demanda, a fim de se alcançar uma solução adequada para toda a cadeia de valor e para os consumidores finais.

A rastreabilidade e a certificação confiável da matéria-prima, que deverá ser sustentável e neutra ou de baixo carbono, são fundamentais para a produção do SAF. No entanto, a restrição indiscriminada ao uso de alguns tipos de matérias-primas poderá levar a um cenário em que não haja o suficiente para sua produção na escala mundial necessária no futuro. Assim, mais importante do que o tipo de matéria-prima em si são os critérios de rastreabilidade, certificação e nível de sustentabilidade que ela apresenta.

Políticas públicas de consumo obrigatório favorecem a criação de demanda para o SAF. Porém, se não houver redução de custo de produção ao longo do tempo, o resultado será a majoração de ônus para a economia. Como mencionado, a mesma matéria-prima e a mesma planta que produzirá o SAF também produzirá o *diesel* verde (HVO), fazendo que a

relação matéria/produto não seja próxima de um para um. A obrigação de consumo ou a imposição de mistura elevada poderá provocar escassez de matéria-prima em curto e médio prazos, especialmente se houver restrição e/ou não reconhecimento de uso de alguma cultura específica.

Do ponto de vista político-estratégico, há dois aspectos relevantes a serem notados. Primeiramente, o arcabouço institucional e regulatório do setor aéreo é estável, organizado e bem estabelecido, o que facilita a implementação de novas regras. O segundo ponto é que o Brasil oferece grande potencial de produção de SAF ou LCAF, podendo exercer um papel relevante como supridor de combustível sustentável ou de créditos ambientais às operadoras aéreas de todo o mundo, devendo-se evitar que o país se torne um mero exportador de matéria-prima com menor valor agregado.

A regulamentação brasileira está sendo desenhada com observância das diretrizes do CORSIA, visando a redução de emissões a partir de 2027, com intuito de não excluir qualquer matéria-prima. Todavia, EUA e Europa estão fixando metas volumétricas, não tendo a preocupação de privilegiar matérias-primas ou regiões mais produtivas que proporcionem menor intensidade de carbono ao combustível. A diretriz europeia é de restringir a utilização de biomassa de primeira geração, exceto culturas rotativas, de ciclo curto, por entender que de alguma forma este tipo de biomassa vai competir com produção de alimentos e causar maior pressão pelo uso do solo. Desconsideram que há muita ineficiência no setor agropecuário e que incrementos na produtividade no campo poderiam melhorar as condições de vida da população. Os europeus entendem que a solução para o setor aéreo viria de combustíveis sintéticos e, por isso, pretendem fixar percentuais obrigatórios de e-QAV a partir de 2030.

Além dessas restrições que estão sendo impostas em termos de matérias-primas, países podem impor outras formas de barreira como

aquela de admitir o modelo de cadeia de custódia da separação, o que imputaria um custo de infraestrutura adicional. Países produtores agrícolas terão maior dificuldade de exportar para grandes centros consumidores distantes. Também há o risco de países grandes consumidores promoverem políticas com vultosos incentivos para a produção doméstica de combustíveis avançados.

Portanto, para alavancar a produção brasileira de SAF e LCAF, seria importante que houvesse maior apoio à difusão do mecanismo de *book and claim*, contrariamente ao que se observa hoje na postura de falta de interesse de países grandes consumidores, preocupados com a dependência energética ou com possível fragilidade e falta de transparência de sistemas de rastreamento e contabilização de redução de emissões. Apesar disso, deve-se registrar que há iniciativas pontuais que vêm sendo implementadas hoje em dia que são importantes para desmistificar alguns conceitos e preocupações que têm se estabelecido.

A imposição de muitas restrições em mercados consumidores, em termos de matérias-primas, rotas tecnológicas ou mesmo um modelo de cadeia de custódia mais rígido, poderá dificultar o acesso de países emergentes e em desenvolvimento aos grandes mercados. Essas barreiras terão impactos no crescimento da produção e no próprio alcance de metas e compromissos. Também deve haver a preocupação com a necessidade de agregação de valor aos biocombustíveis nos países produtores agrícolas. Caso contrário, eles serão ou continuarão a ser meros exportadores de *commodities*.

O Brasil precisa usar sua diplomacia para desmistificar algumas restrições que podem não se aplicar a nossa realidade. O momento é propício para o país defender estrategicamente suas ideias e interesses, já que está presidindo o G-20. Nessa posição, as vozes ecoam mais longe e, normalmente, são bem ouvidas. É verdade que a viabilidade da produção em

grande escala, a fim de substituir o querosene de aviação fóssil, ainda depende da superação de alguns desafios. Todavia, não restam dúvidas de que, atualmente, o SAF é a melhor alternativa para a descarbonização do setor aéreo nacional e global, e o Brasil pode exercer papel fundamental nesse segmento. Prosseguir com essa iniciativa é de grande valia para que a economia global possa trilhar o caminho da neutralidade em carbono em 2050.

Referências

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Nota Técnica nº 12/2023/DBIO/SPG. Projeto de Lei que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável [...]*. Brasília, DF: MME, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/sei_mme-0728875-nota-tecnica.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

CRAIG, K. *et al.* *SAF Grand Challenge Roadmap: flight plan for sustainable aviation fuel*. Washington, D.C.: US-DOE, US-DOT, USDA, US-EPA, 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/beto-saf-gc-roadmap-report-sept-2022.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *Alternative Fuels Data Center: sustainable aviation fuel*. Washington, D.C.: US-DOE, 2024. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel>. Acesso em: 11 jun. 2024.

DOT – UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *U.S Air Carrier Traffic Statistics through July 2024: monthly system*. Washington, D.C.: US-DOT, 2024. Disponível em: <https://www.transtats.bts.gov/traffic/>. Acesso em: 1 out. 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Análise de conjuntura dos biocombustíveis – ano 2023: nota técnica*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-834/NT-EPE-DPG-SDB-2024-03_ACBios_Ano2023.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

EUROCONTROL – EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION. *European Aviation Overview* – 2023. Bruxelas: Eurocontrol, 2024. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-01/eurocontrol-european-aviation-overview-20240118-2023-review.pdf>. Acesso em: 1 out. 2024.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *CORSIA Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation Implementation Plan*. Montreal: ICAO, 2023. (Brochure). Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/2023%20Edition/CORSIA-Brochure2023-EN-WEB.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*. Montreal: ICAO, 2024. Disponível em https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20March%202024.pdf. Acesso em: 18 ago. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Sustainable aviation fuels – status quo and national assessments*. Austria: IEA, 2023. (Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme Report, task n. 63). Disponível em: https://iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Task_63.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

PAVLENKO, N; SEARLE, S; CHRISTENSEN, A. *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union*. Washington, DC: ICCT – International Council of Clean Transportation, 2019. (Working Paper, 2019-05). Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Alternative_jet_fuels_cost_EU_2020_06_v3.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

PIOVESAN, E. Projeto aprovado pela Câmara prevê incentivo a combustível sustentável na aviação. *Câmara dos Deputados*, Brasília, DF, 13 mar. 2024. Cidades e Transportes. Disponível em: [https://www.camara.leg.br/noticias/1043435-PROJETO-APROVADO-PELA-CAMARA-PREVE-INCENTIVO-A-COMBUSTIVEL-SUSTENTAVEL-NA-AVIACAO#:~:text=O%20projeto%20\(PL%20528%2F20,at%C3%A9%20atingir%2010%25%20em%202037](https://www.camara.leg.br/noticias/1043435-PROJETO-APROVADO-PELA-CAMARA-PREVE-INCENTIVO-A-COMBUSTIVEL-SUSTENTAVEL-NA-AVIACAO#:~:text=O%20projeto%20(PL%20528%2F20,at%C3%A9%20atingir%2010%25%20em%202037). Acesso em: 15 out. 2024.

PRUSSI, M. *et al.* CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdã, v. 150, 111398, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>. Acesso em: 11 jun. 2024.

RAÍZEN. E2G: Second generation ethanol. São Paulo: Raízen, [202_]. Disponível em: <https://ri.raizen.com.br/e2g/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2023/2405 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de outubro de 2023 relativo à garantia de condições de concorrência equitativas para um transporte aéreo sustentável (ReFuelEU Aviação). *Jornal Oficial da União Europeia*: OJ L, Luxemburgo, 31 out. 2023. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405. Acesso em: 23 set. 2024.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. *Sustainable Aviation Fuel Certificate (SAFc) emissions accounting and reporting guidelines*. Cologny/Geneva: WEF, 2022. (White Paper, October 2022). Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_SAFc_Accounting_Guidelines_2022.pdf. Acesso em: 24 nov. 2023.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. *Scaling up sustainable aviation fuel supply: overcoming barriers in Europe, the US and the Middle East*. Cologny/Geneva: WEF, 2024a. (Insight Report, March 2024). Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Scaling_Sustainable_Aviation_Fuel_Supply_2024.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. *Decarbonizing Brazil's steel, aluminium and aviation sectors*. Cologny/Geneva: WEF, 2024b. (White Paper, January 2024). Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Decarbonizing_Brazil%E2%80%99s_Steel_Aluminium_and_Aviation_Sectors_2024.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

WILLE, J. H. *et al.* *The real cost of green aviation: evaluation of SAF ramp-up scenarios and cost implications for the European aviation sector*. New York: Strategy&, 2022. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/aerospace-defense/real-cost-of-green-aviation.html>. Acesso em: 11 jun. 2024.