Combustível Sustentável de Aviação

Uma das soluções para a transição energética do setor aéreo

CNT Confederação Nacional do Transporte

Ficha Técnica

Presidente da CNT
Vander Francisco Costa

Vice-Presidentes da CNT

Transporte Rodoviário de Passageiros
Eudo Laranjeiras

Transporte Rodoviário de Cargas
Flávio Benatti

Transporte Aquaviário de Cargas e de Passageiros
Raimundo Holanda Cavalcante Filho

Transporte Ferroviário de Cargas e de Passageiros
Benomy Schmitz Filho

Transporte Aéreo de Cargas e de Passageiros
Geraldo Bertolotti Strambi

Infraestrutura de Transporte e Logística
Paulo Gaba Junior

Diretora Executiva da CNT
Fernanda Rezende

Consultor Técnico da Presidência da CNT
Bruno Batista

Equipe Técnica da CNT

Gerência Ambiental
Érica Marcos
Raflem Santos

Revisão: Anna Guedes
Diagramação: Renan Nunes e Sávio Marques
Atendimento: Vanessa Montenegro
Estratégia de divulgação: Gerência Executiva de Comunicação

Combustível sustentável de aviação: uma das soluções para a transição energética do setor aéreo. – Brasília: CNT, 2025.
55 p. : il. color. – (Energia no Transporte)

ISBN 978-85-68865-30-9 (Impresso)
ISBN 978-85-68865-29-3 (PDF)

1. Combustível sustentável de aviação. 2. Combustível sustentável de aviação – fonte energética – legislação.
3. Energia – fontes alternativas. 4. Transporte aéreo – sustentabilidade. I. Confederação Nacional do Transporte.

CDU 502.13: 656.7

Sumário

Apresentação	5
O que é combustível sustentável de aviação?	6
Legislação vigente	13
Principais fontes	19
Mapeamento do SAF	23
Aplicações no modo aéreo	30
Saldo de emissões	37
Considerações finais	40
Vantagens x desafios	40
Anexo I	41
Referências	48

Apresentação

A Confederação Nacional do Transporte (CNT) tem, dentro da sua agenda ambiental, a visão de ser a principal promotora de ações voltadas ao desenvolvimento sustentável do setor de transporte e da qualidade de vida de seus trabalhadores no Brasil.

Uma das principais medidas da Confederação nesse sentido é viabilizar o acesso dos transportadores a informações estratégicas de temas relevantes, como novas tecnologias e fontes de energia mais limpas, e às práticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, a CNT elabora conteúdos técnicos a fim de entregar conhecimento ao transportador e à sociedade sobre práticas que levem à descarbonização do setor.

Assim, a CNT publica a série Energia no Transporte, com o intuito de disseminar material preciso sobre diferentes fontes energéticas que podem ser utilizadas no transporte rodoviário para auxiliar o segmento a diminuir a sua dependência de combustíveis fósseis, como o diesel. Os estudos abordam, ainda, temáticas como legislações vigentes, saldo de emissões e vantagens e desafios para cada fonte.

Com o presente trabalho, a CNT expressa o reconhecimento da importância da atividade transportadora no desenvolvimento sustentável do país e na construção de um setor ainda mais responsável ambientalmente, entregando melhor qualidade de vida ao transportador e à sociedade.

Vander Costa
Presidente da CNT

O que é combustível sustentável de aviação?

O **combustível sustentável de aviação**, também conhecido como SAF (da sigla em inglês que corresponde a *Sustainable Aviation Fuel*), é uma denominação utilizada no setor aéreo para descrever combustíveis não convencionais[a] produzidos a partir de recursos renováveis, como óleos vegetais, biomassa lignocelulósica[b], açúcares, amidos, gorduras animais, resíduos orgânicos e gases residuais, entre outros insumos.[1] De acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, da sigla em inglês para *International Civil Aviation Organization*), o SAF é uma das medidas que podem promover a mitigação das emissões causadas por esse setor. A referida organização também considera avanços tecnológicos em aeronaves, eficiência nas rotas aéreas e medidas baseadas em mercado de carbono como estratégias para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) do setor aéreo.[2]

O SAF reduz as emissões associadas ao uso de fontes fósseis na aviação, que responde a 4,9% de participação nas emissões do setor de transporte no Brasil.[3] Dessa forma, mediante o uso de SAF, o modo aéreo atende a um importante compromisso assumido pelo Brasil em suas Contribuições Nacionalmente Determinadas, que estabelecem a redução de 59% a 67% das emissões de GEE até 2035 (em relação ao ano-base de 2005) e propõe atingir a neutralidade climática até 2050, conforme previsto no Acordo de Paris[c].[4]

Para garantir a adoção de combustível sustentável de aviação, é preciso que sejam atendidos padrões rigorosos de segurança e desempenho impostos pela ICAO. Segundo ela, a indústria da aviação deve seguir exigências de operação e manutenção nas suas aeronaves, aplicando requisitos essenciais de qualidade no combustível utilizado.

[a] São os combustíveis diferentes dos já utilizados no setor aéreo de origem fóssil, como o querosene e a gasolina de aviação.

[b] Matéria seca e orgânica advinda das plantas ou derivada de resíduos agroindustriais, composta principalmente por três componentes: celulose, hemicelulose e lignina.

[c] As Contribuições Nacionalmente Determinadas são metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) estabelecidas no Acordo de Paris – assinado em 2015 por 195 países-membros da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCC, na sua sigla em inglês). O acordo tem o compromisso de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis de emissão pré-industriais. Acesso em: 18 fev. 2025. Link de acesso: antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html

Diante desse contexto, a introdução de fontes energéticas provenientes de diferentes matérias-primas requer que o combustível seja *drop-in*. Isso significa que o SAF deve corresponder à funcionalidade do seu equivalente de origem fóssil – o querosene de aviação –, obedecendo às condições de mistura estabelecidas pelos órgãos reguladores. Na prática, o uso do SAF não deve exigir modificações ou adaptações nos sistemas de motor das aeronaves ou na rede de distribuição de combustível, pois suas características físico-químicas precisam ser compatíveis com as do combustível fóssil que está substituindo.[5]

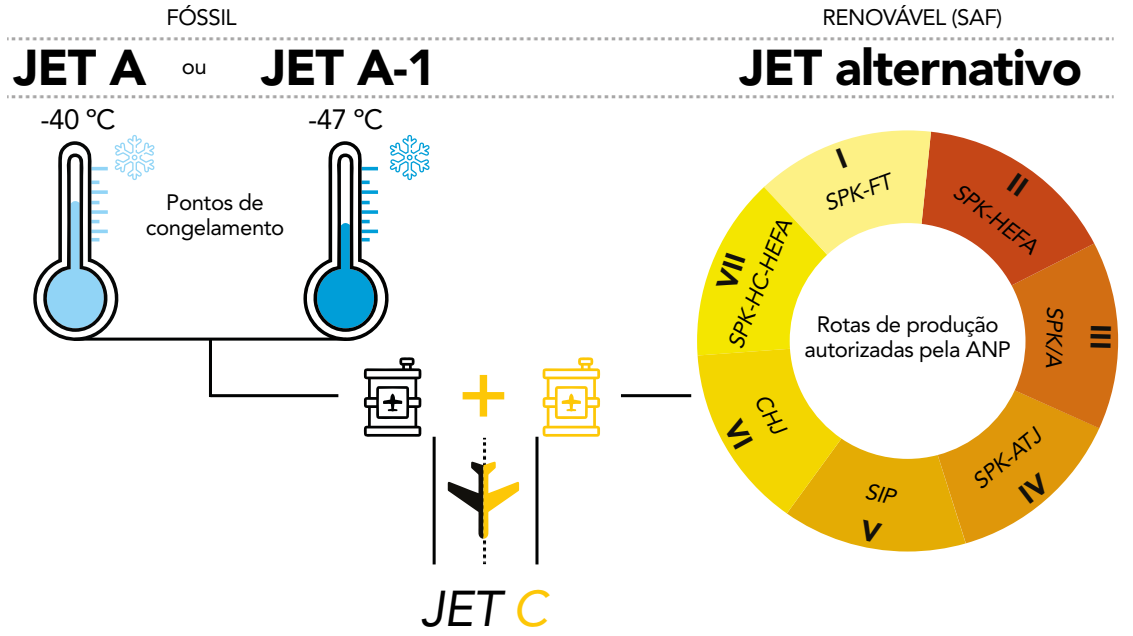
No Brasil, o SAF também é chamado de bioquerosene de aviação (BioQAV), uma nomenclatura introduzida em 2011 na Política Energética Nacional[d] para designar qualquer substância derivada de biomassa renovável apta para o uso em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos. Em 2024, com a criação da Lei do Combustível do Futuro[e], o nome "bioquerosene" foi substituído por **combustível sustentável de aviação** (SAF), que deve atender a critérios definidos pela ICAO visando promover ganhos ambientais a partir de todo o ciclo de vida do carbono atrelado a sua produção e utilização.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regula a produção de combustíveis para a aviação brasileira mediante a Resolução ANP nº 856/2021, a qual estabelece quatro tipos de combustíveis comercializáveis no Brasil: JET A, JET A-1, JET alternativo e JET C, conforme ilustrados no **Infográfico 1**.

[d] Lei nº 9.478/1997, que dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.

[e] Lei nº 14.993/2024, que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano.

INFOGRÁFICO 1 Combustíveis de aviação – fóssil e renovável – no contexto de produção brasileira

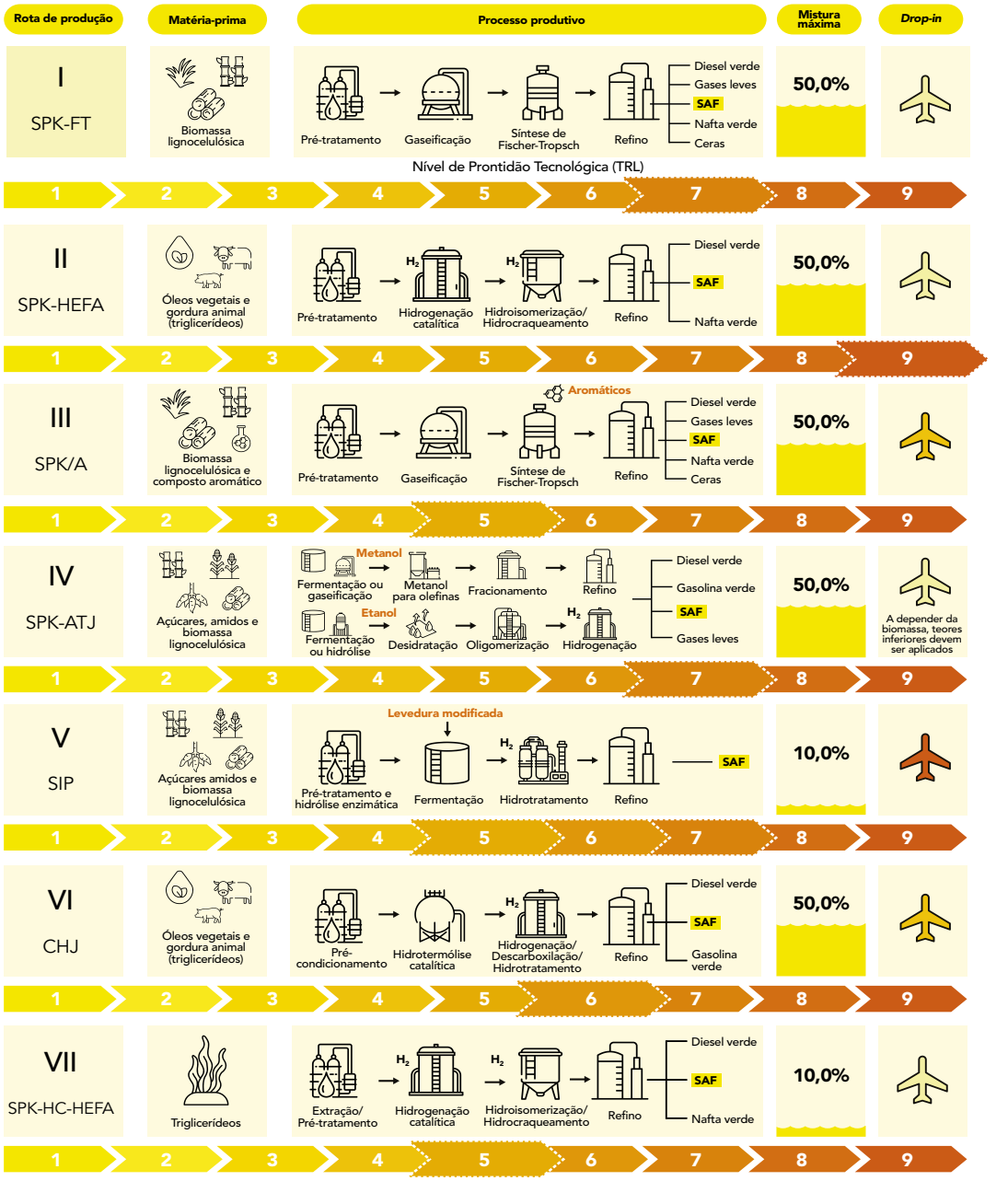


Fonte: Elaboração CNT, com base na ANP (2021). Acesso em: 24 fev. 2025. Link de acesso: atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021

Os combustíveis denominados JET A e A-1, conhecidos como querosenes fósseis, são destinados exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves e diferenciam-se entre si, especialmente, pelo ponto máximo em que é iniciado o seu processo de congelamento, sendo 40 ºC negativos para o JET A e 47 ºC negativos para o JET A-1.

Segundo a legislação brasileira, o SAF se enquadra na definição de querosene renovável (JET alternativo) e sua produção em território nacional é permitida a partir de sete rotas tecnológicas distintas, também demonstradas no **Infográfico 1**, cujos processos serão aprofundados mais adiante. A ANP autoriza a mistura dos JETs A e A-1 com os JETs alternativos, seguindo proporções máximas definidas pela própria Agência, conforme demonstrado no **Infográfico 2**, resultando no combustível chamado JET C, que deve estar em conformidade com as especificações nacionais.[6]

INFOGRÁFICO 2 Rotas tecnológicas para a produção de SAF, limites de mistura, compatibilidade *drop-in* e nível de prontidão tecnológica (TRL)



Legenda:

- Idêntico ao JET A/A-1 compatível com toda a frota e infraestrutura.
- Semelhante (mas não idêntico) ao JET A/A-1 e aplicável em parte da frota aérea e infraestrutura de abastecimento.
- Não semelhante ao JET A/A-1, mas permite mistura com baixo teor de SAF.

Fonte: Elaboração CNT, com base em (i) EPE (2024) e (ii) Kramer *et al.* (2022). Acesso em: 06 fev. 2025. Links de Acesso em: (i) epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras e (ii) doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823

No Brasil, é vedada a comercialização de combustíveis de aviação alternativos que se enquadrem diferentemente das definições e especificações estabelecidas na RANP 856/2021. Além disso, a regulamentação não autoriza o uso isolado do JET alternativo no teor de 100%, exigindo que ele seja sempre misturado ao querosene de origem fóssil.

A lista a seguir demonstra as rotas do SAF, com a descrição resumida de seus respectivos aspectos técnicos. Maior detalhamento sobre cada linha produtiva encontra-se no Anexo I dessa publicação.[7-9]

Processos de produção de SAF autorizados no Brasil[6]:

I. **SPK-FT**[f] → querosene parafínico obtido de uma ou mais matérias-primas, hidroprocessado e sintetizado pelo método chamado Fischer-Tropsch (FT);
II. **SPK-HEFA** → querosene parafínico sintetizado e obtido pelo processo de hidrogenação de ésteres de ácidos graxos e ácidos graxos livres;
III. **SPK/A** → querosene parafínico sintetizado a partir de variação do processo Fischer-Tropsch com adição de aromáticos;
IV. **SPK-ATJ** → querosene parafínico sintetizado a partir de álcool etílico ou isobutílico, processado mediante desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento;
V. **SIP** → querosene isoparafínico sintetizado a partir de açúcares com subsequente hidrogenação;
VI. **CHJ** → querosene de hidrotermólise catalítica com compostos aromáticos, produzido a partir de ésteres de ácidos graxos e ácidos graxos livres; e
VII. **SPK-HC-HEFA** → querosene parafínico sintetizado obtido pela hidrogenação de hidrocarbonetos bioderivados da microalga *Botryococcus braunii*, ésteres de ácidos graxos e ácidos graxos livres.

A variedade das sete rotas tecnológicas para a produção de SAF oferece oportunidades importantes para o Brasil, pois promove a oferta não só deste combustível, mas também de outras fontes energéticas que podem ser aproveitadas em diferentes aplicações, como o diesel verde, diversificando a matriz nacional de combustíveis. Considerando o cenário brasileiro, ao se analisar o **Infográfico 2**, é possível notar que as rotas Fischer-Tropsch, SPK-HEFA e SPK-ATJ têm alto potencial de desenvolvimento devido à abundância de matérias-primas que o país possui e que podem ser utilizadas como insumos nessas rotas produtivas. Para o setor de transporte, particularmente, a

[f] Conforme a RANP 856/2021, SPK significa querosene parafínico sintético (SPK, da sigla em inglês para *Synthetic Paraffinic Kerosene*).

diversidade tecnológica e de insumos auxilia na competitividade dos preços entre os combustíveis, o que pode tornar o SAF economicamente acessível para as companhias aéreas.

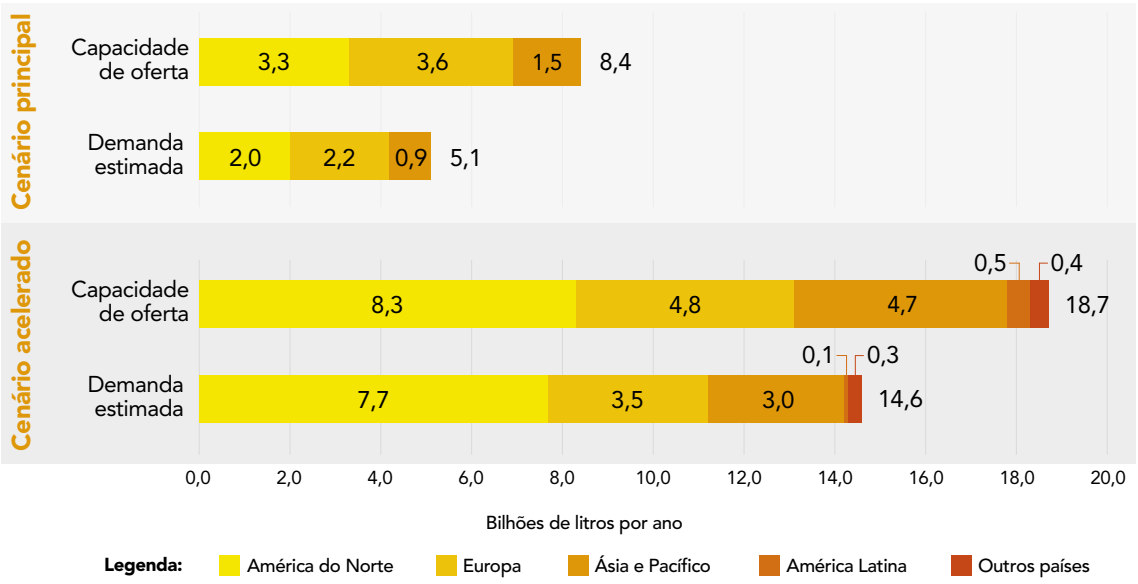
Apesar da relevância do SAF para a descarbonização, dados da Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association – IATA*) mostram que sua produção está crescendo de forma lenta. Em 2024, o volume produzido atingiu 1,3 bilhão de litros, o que, embora seja mais que o dobro do fornecimento em 2023 (600 milhões de litros), corresponde a apenas 0,3% do total de querosene de aviação fóssil ofertado globalmente no mesmo ano. Essa produção ficou abaixo da estimada pela IATA (1,9 bilhão de litros), devido ao adiamento de projetos de algumas empresas norte-americanas. Para o ano de 2025, a produção pode alcançar 2,7 bilhões de litros, gerando um crescimento de 107,7% em relação a 2024.[10]

É importante destacar que, desde 2011, mais de 833 mil voos comerciais em todo mundo foram operados utilizando o SAF, com 69 aeroportos abastecendo regularmente as aeronaves com biocombustível. Adicionalmente, 50 companhias aéreas já se comprometeram, até 2030, com metas de uso de SAF que variam de 5,0% a 30,0% do seu consumo total. O cenário é ainda mais promissor ao se considerar que 45 bilhões de dólares estão acordados em compras futuras por parte de operadores e produtores, comparados com os 6 bilhões de dólares convencionados no período pré-pandêmico.[11] Isso comprova que o combustível sustentável de aviação tem sido considerado pelos governos e comunidade técnica, reforçando a necessidade de investimentos para expandir a sua oferta.

Para os próximos três anos (até 2028), conforme **Gráfico 1**, a expectativa é que a demanda de SAF cresça internacionalmente, atingindo o consumo de 5,1 bilhões de litros/ano, o que corresponderá a 60,7% da capacidade de oferta no mesmo período, no **cenário principal**, segundo projeções da Agência Internacional de Energia (IEA, da sigla em inglês para *International Energy Agency*).[12] Cabe ainda informar que essa demanda equivaleria a, apenas, 1,0% do suprimento global de combustível necessário para a aviação.

Já no **cenário acelerado**, ainda no **Gráfico 1**, que inclui todos os projetos propostos de produção de SAF, a demanda pode chegar a 14,6 bilhões de litros/ano – ou 78,0% da capacidade de oferta global no mesmo período. Este valor corresponde a quase o triplo do cenário principal.

GRÁFICO 1 Cenários globais de capacidade de produção e de demanda de SAF entre os anos de 2023 e 2028 (bilhões de litros)



Fonte: IEA (2023), com adaptações da CNT. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

Nota: o cenário principal ( ) é a capacidade produtiva com base na execução de projetos já com decisão de investimentos finalizados ou com alta probabilidade de serem implementados. Já o cenário acelerado ( ) abrange todos os projetos propostos no cenário principal, além dos que possuem pendências de implementação.

LEGISLAÇÃO VIGENTE

A legislação internacional estimulou este tema globalmente a partir de 2016, durante uma assembleia da ICAO, que discutia as emissões do setor aéreo. Na época, a aviação era responsável por 11,7% das emissões globais de CO_2 do setor de transporte. Durante essa assembleia, foi adotado o Regime de Compensação e Redução das Emissões de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA, da sigla em inglês para *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), com o objetivo de unir esforços para mitigar os impactos ambientais provenientes da aviação.

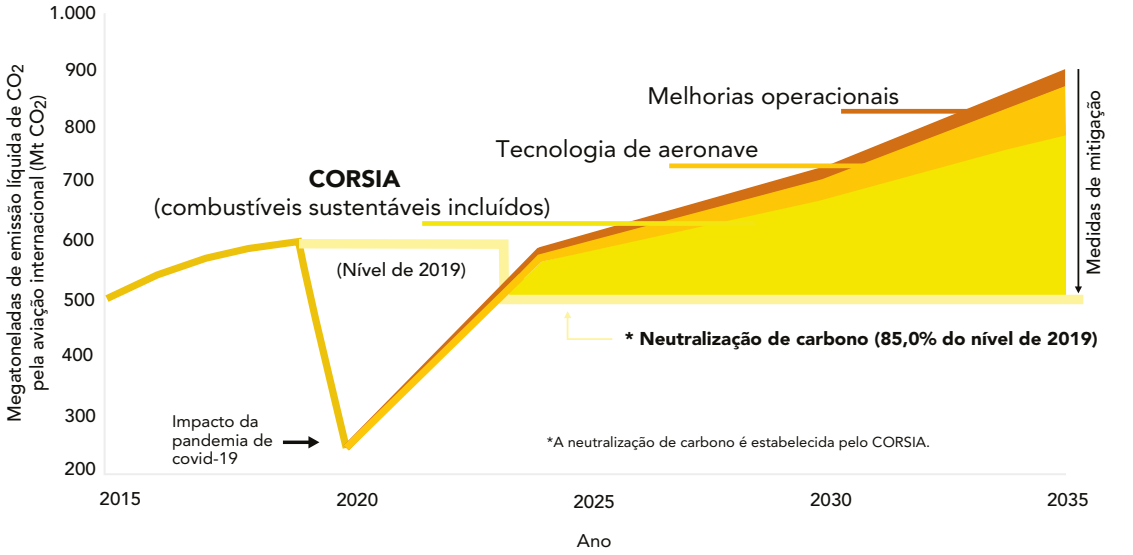
O CORSIA é um programa baseado em mecanismos de mercado[g], criado para reduzir e compensar os GEE gerados pelo setor aéreo em voos internacionais. Um dos seus principais objetivos é estabilizar as emissões líquidas[h] aos níveis observados em 2019, sem prejudicar o crescimento do setor. As ações do CORSIA iniciaram-se efetivamente em 2018, ano em que a aviação atingiu 12,3% das emissões de CO_2 do total do setor de transporte.[8,13]

Conforme **Gráfico 2**, a principal medida do programa é a compensação de emissões mediante a aquisição de créditos, que, geralmente, podem ser emitidos por setores produtivos que possuem meios para reduzir os GEE.[8,14-15]

[g] Utiliza instrumentos econômicos para reduzir as emissões de CO_2, configurando-se como um processo sistemático que permite a participação de múltiplos agentes no mercado, tanto na oferta quanto na demanda de créditos de carbono.

[h] Considera-se, em sua contabilização, os GEE que são removidos da atmosfera pela cobertura vegetal.

GRÁFICO 2 Redução das emissões líquidas da aviação internacional em decorrência de medidas propostas pelo CORSIA



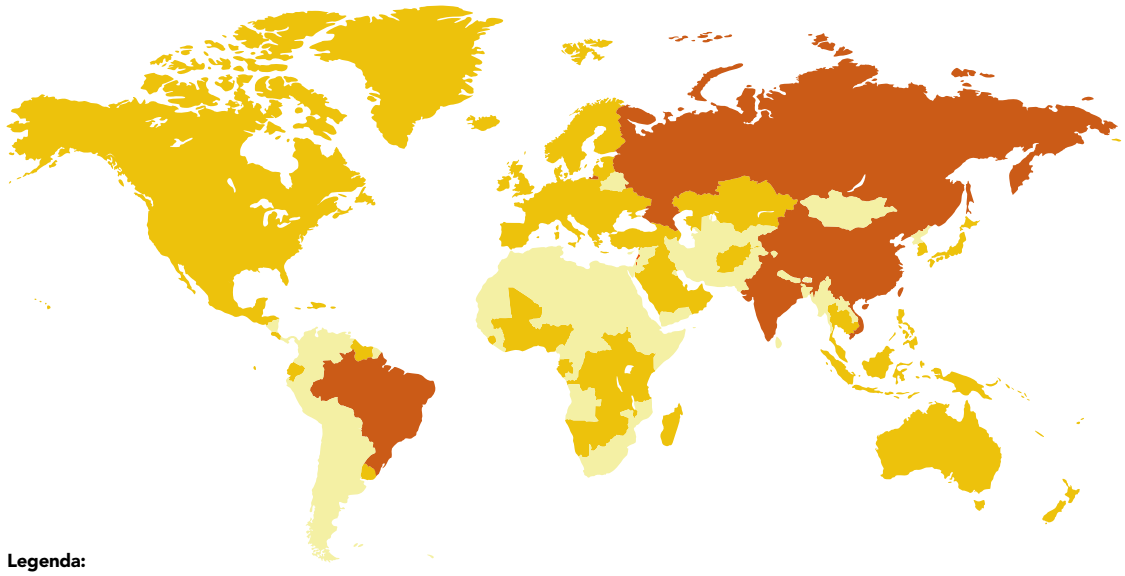
Fonte: ICAO (2023), com adaptações da CNT. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-communication.aspx

Além do mercado de carbono, o CORSIA tem promovido a utilização de combustíveis sustentáveis e estabelecido critérios para torná-los elegíveis à compensação. Por isso, o SAF deve ser produzido seguindo uma certificação voluntária que valide seus ganhos ambientais.[16]

Outro aspecto importante demonstrado no **Gráfico 2** é que a linha de base do CORSIA passou a ter uma meta mais ambiciosa, sendo fixada em 85,0% em relação aos níveis de emissão constatados em 2019. Essa mudança foi motivada pela pandemia da covid-19, quando as emissões líquidas de CO_2 foram reduzidas drasticamente.[15-16]

Até o final de 2024, 126 países já haviam aderido ao esquema do CORSIA, com a inclusão de mais de 670 operadores aéreos.[17] Cabe informar que o programa de redução de emissões foi dividido em fases, contemplando uma etapa voluntária e, outra, obrigatória. No **Infográfico 3**, é possível observar a distribuição dos países envolvidos, onde destaca-se o Brasil, que fará parte da fase obrigatória. Nesta etapa (2027), todos os voos internacionais, inclusive os que partem ou chegam de países que não fazem parte do programa, estarão sujeitos à obrigatoriedade de compensação, com exceção de nações com parcela desprezível no tráfego aéreo internacional.[17]

INFOGRÁFICO 3 Distribuição global de países participantes do CORSIA nas fases voluntária (2024) e obrigatória (2027)



Fonte: IATA (2024), com adaptações da CNT no site mapchart.net. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia/

No âmbito internacional, apesar de o Brasil aderir ao CORSIA apenas em sua fase obrigatória, já foi iniciado, em 2019, o processo de monitoramento dos voos internacionais dos operadores aéreos brasileiros. A Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) regulamentou este processo[i] e determina que, a partir de 2027, as emissões das empresas brasileiras que ultrapassarem os níveis observados no biênio de 2019-2020 deverão ser compensadas com a aquisição e aposentadoria de créditos de carbono ou mediante o uso de combustíveis elegíveis, especialmente o sustentável de aviação.[14, 18-19]

No caso da legislação brasileira, a Lei nº 14.248/2021 institui o Programa Nacional do Bioquerosene com o objetivo de incentivar a pesquisa e o fomento da produção de energia à

[i] De acordo com a Resolução Anac nº 496/2018, apenas os operadores aéreos nacionais que emitem CO_2 acima de 10 mil toneladas anuais pelo uso de aeronaves com peso máximo de decolagem certificado acima de 5.700 quilogramas deverão realizar o monitoramento das emissões provenientes de voos internacionais, com a exceção de voos internacionais humanitários, médicos e de combate a incêndio.

base de biomassas, visando à sustentabilidade da aviação brasileira.[20] A citada lei prevê que a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético de biocombustível devem ser fomentados mediante recursos de agências e bancos federais e podem obter incentivos fiscais concedidos pelo governo federal.[20]

Posteriormente, em 2024, a Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024), conforme **Infográfico 4**, impôs a obrigação de reduzir as emissões de GEE em voos domésticos mediante o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV). Na referida lei, os operadores aéreos devem reduzir uma faixa de percentuais de emissões, iniciando em 1,0%, a partir de 2027, e chegando a 10,0%, em 2037, de forma progressiva. As metas de redução podem ser alteradas a qualquer momento pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), quando existir motivo justificado de interesse público.[21]

No caso da Anac, caberá a ela o papel de fiscalizar o cumprimento das metas de redução. Além disso, a citada Agência será responsável por definir a metodologia de cálculo para verificar o efetivo atendimento da diminuição de GEEs, atrelada ao uso do SAF ou de meios alternativos. A Anac poderá, ainda, isentar operadores da obrigatoriedade de redução, com base em critérios de inacessibilidade ao abastecimento do combustível sustentável de aviação ou baixo volume de emissões associadas às operações de cada empresa.[21]

INFOGRÁFICO 4 Entidades partícipes do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) com suas responsabilidades e competências

Fonte: Elaboração CNT, com dados de BRASIL (2024). Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm

Nota: **Poço à queima** representa o ciclo de vida que contabiliza as emissões de GEE oriundas de processos de cultivo e extração de recursos; da produção dos combustíveis líquidos ou gasosos; e de sua distribuição e utilização em aeronaves.

No que tange às especificações do SAF, a metodologia mais amplamente utilizada é o padrão D7566 da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, da sigla em inglês para *American Society for Testing and Materials*). Nacionalmente, aplica-se a legislação RANP 856/2021, que estabelece todas as especificações de querosene fóssil e renovável, bem como determina as obrigações quanto ao controle de qualidade a ser atendido pelos comercializadores no território nacional.

No **Quadro 1**, mais adiante, foram comparadas as especificações entre o SAF brasileiro e o finlandês, produzido por uma das maiores empresas do ramo no Mundo – a Neste. Ao observar as características de cada combustível, é possível identificar que o SAF finlandês atende aos limites estabelecidos pela legislação brasileira, sendo que grande parte das suas propriedades possui valores até mesmo mais exigentes do que o nacional.[22]

QUADRO 1 Comparativo entre os limites das propriedades físico-químicas do SAF na legislação brasileira e os valores reais do bioquerosene produzido pela Neste, considerando a rota SPK-HEFA

Propriedade físico-química[I]	Unidade[II]	Limite (RANP 856/21)	SAF (Neste)
Acidez total (máx.)	mg KOH/g	0,015	0,011
Destilação com 10% de volume recuperado (máx.)	°C	205	198
Ponto final de ebulição (máx.)	°C	300	288
Ponto de fulgor (mín.)	°C	38	41
Ponto de congelamento (máx.)	°C	-47 (JET A-1) | -40 (JET A)	-51
Goma atual (máx.)	mg/100 mL	7	1
Teor de biodiesel de base éster (máx.)	mg/kg	5	< 4,5
Queda de pressão no filtro (máx.)	mmHg	25	< 1

Fonte: Elaboração CNT, com base em (i) ANP (2021) e (ii) Neste (2021). Acessos em: 18 mar. 2025. Links de Acesso em: (i) atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021 e (ii) neste.com/files/pdf/6v1bbJbh2Q0qSaputzkCQE-productdatasheet_neste_my_saf.pdf

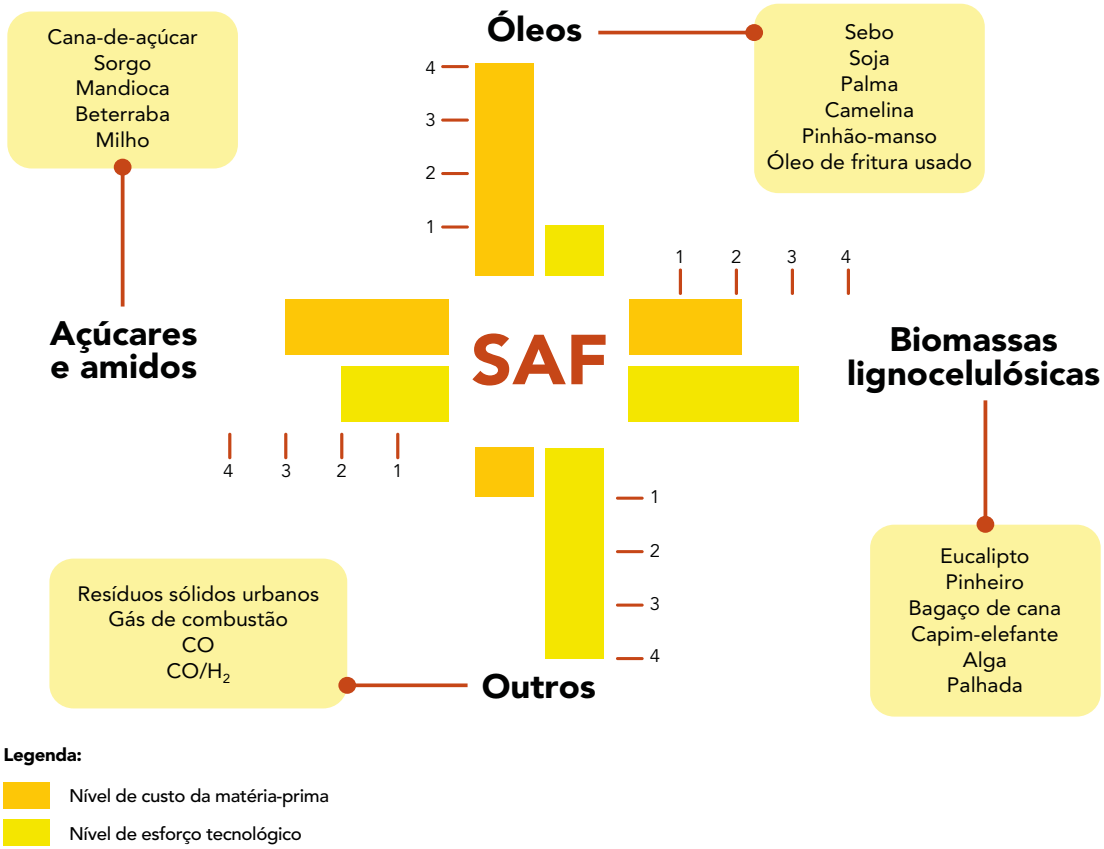
Nota: [I] Propriedade físico-química: **acidez total** é a medida do potencial corrosivo do combustível; **destilação com 10% de volume recuperado** é a temperatura na qual 10,0% de volume de uma substância foi recuperado durante o seu aquecimento; **ponto final de ebulição** é a temperatura mais alta na qual um líquido passa por mudança de estado para vapor; **ponto de fulgor** é a temperatura mínima na qual os vapores dos combustíveis entram em combustão na presença de uma chama; **ponto de congelamento** é a temperatura na qual uma substância começa a passar do estado líquido para o estado sólido; **goma atual** é a medida do resíduo que resta após a evaporação da amostra sob condições controladas; **teor de ésteres** é a quantidade de substância orgânica oxigenada derivada de triglicerídeos; e **queda de pressão no filtro** se refere à diferença de pressão entre a entrada e a saída de um filtro de combustível.

[II] Unidade de medida: **mg KOH/g** = miligrama de hidróxido de potássio por grama; **°C** = grau Celsius; **mg/100 mL** = miligrama por 100 mililitros; **mg/kg** = miligrama por quilograma; e **mmHg** = milímetro de mercúrio.

PRINCIPAIS FONTES

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE)[8], cada rota produtiva apresenta variações quanto ao custo de matéria-prima e ao esforço tecnológico necessário à sua implementação nacional, conforme demonstrado no **Gráfico 3**. A rota HEFA, que utiliza óleos como matéria-prima, é uma das mais consolidadas no mundo, exigindo pouco esforço tecnológico na produção de SAF. Entretanto, há outros insumos, como resíduos sólidos urbanos que podem reduzir os custos de produção, mas que ainda exigem grandes investimentos tecnológicos.

GRÁFICO 3 Níveis de custo e de esforço tecnológico de diferentes matérias-primas na produção de SAF no Brasil



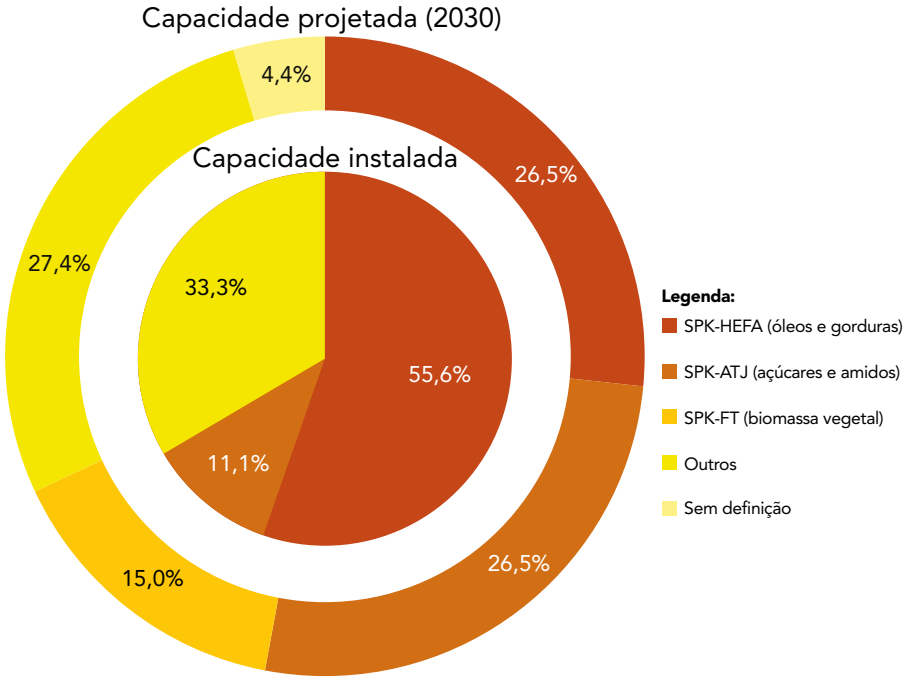
Fonte: EPE (2024), com adaptações da CNT. Acesso em: 20 mar. 2025. Link de acesso: epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras

Nota: a escala de 1 a 4 demonstra diferenças de custo e esforço nacional para cada matéria-prima utilizada na produção de SAF. O esforço representa os graus de investimento, de complexidade e de inovação necessários para desenvolver, implementar ou aprimorar a tecnologia.

Ainda de acordo com o **Gráfico 3**, enquanto a utilização de açúcares e amidos apresenta custos relativamente elevados por exigir matéria primária (nível 3), o esforço tecnológico necessário para a conversão em SAF é menor (nível 2). Já o material lignocelulósico, que também pode ser obtido a partir de resíduos madeireiros e agroflorestais, tem custos mais reduzidos (nível 2), porém demandam um maior esforço tecnológico (nível 3), em comparação com os açúcares e amidos, devido aos seus processos produtivos serem mais complexos.

Concernente ao cenário de produção mundial de SAF, é possível observar, no **Gráfico 4**, que as empresas produtoras têm sua capacidade atual concentrada em rotas que utilizam óleos e gorduras (SPK-HEFA), representando 55,6% de participação na oferta global, e açúcares, amidos e biomassa lignocelulósica (SPK-ATJ), com 11,1% de participação.

GRÁFICO 4 Capacidade mundial instalada de produção de SAF em 2024 (círculo interno) e projetada para 2030 (círculo externo), por tipo de processo produtivo (em %) e biomassa



Fonte: EPE (2024), com adaptações da CNT. Acesso em: 20 mar. 2025. Link de acesso: epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras

Nota: os dados da **capacidade instalada** consideram a produção máxima das refinarias contempladas e os dados de **capacidade projetada** consideram projetos com data definida ou a definir. Na categoria "**Outros**", são consideradas as rotas: energia para líquidos, liquefação hidrotérmica, processo produtivo compartilhado com o diesel verde e gás para líquidos. A diferença entre a soma das parcelas e respectivo total no círculo da capacidade projetada é proveniente do critério de arredondamento adotado pela fonte primária.

No caso da capacidade projetada para 2030, as tecnologias SPK-HEFA e SPK-ATJ continuarão proeminentes, segundo projeção da EPE. A rota SPK-HEFA ainda será responsável por 26,5% da oferta de SAF e a SPK-ATJ por, igualmente, 26,5%, totalizando mais de 50,0% da produção mundial. Adicionalmente, estima-se a futura consolidação da rota SPK-FT, que cobrirá 15,0% da oferta global.

A utilização de material de origem orgânica para a conversão em bioenergia é uma atividade consolidada no Brasil. Insumos renováveis já são utilizados para a produção de biocombustível, e suas matérias-primas (como soja, sebo, óleo de cozinha usado e cana de açúcar) podem ser igualmente empregadas na produção de SAF, conforme explicitadas adiante, por meio de rotas diversas, como SPK-HEFA, SPK-FT, SPK-ATJ e CHJ.

- Soja e gorduras animais (sebo): como demonstra o **Infográfico 5** (parte esquerda), 9,2 bilhões de litros (9.215.855 m³) de óleos vegetais e gorduras animais foram convertidos em biodiesel de base éster[j] no Brasil em 2024, sendo predominantemente destinados ao setor transportador brasileiro. A matéria-prima mais aproveitada foi o óleo de soja, que representou 72,4% e, também houve a utilização de gorduras animais, como as de origem bovina, de frango e de porco, que, juntas, somaram 8,4%.[23]

- Óleo de cozinha usado: um resíduo alimentício capaz de contaminar o meio ambiente[k], pouco utilizado como insumo no Brasil. Sua participação na produção de biodiesel foi de, apenas, 1,1%, sendo extremamente interessante, pois, além de ser uma alternativa que não compete com a indústria alimentícia, pode, ainda, fomentar a economia circular brasileira, gerando valor a partir de um material que seria descartado[l].

- Cana-de-açúcar e demais biomassas: no mesmo **Infográfico 5** (parte direita), a cana-de-açúcar tem uma participação de 90,6% para produzir etanol. Outras matérias-primas, como milho, melaço e bagaço de cana, entre outros cereais, completam os insumos vegetais necessários para este biocombustível.

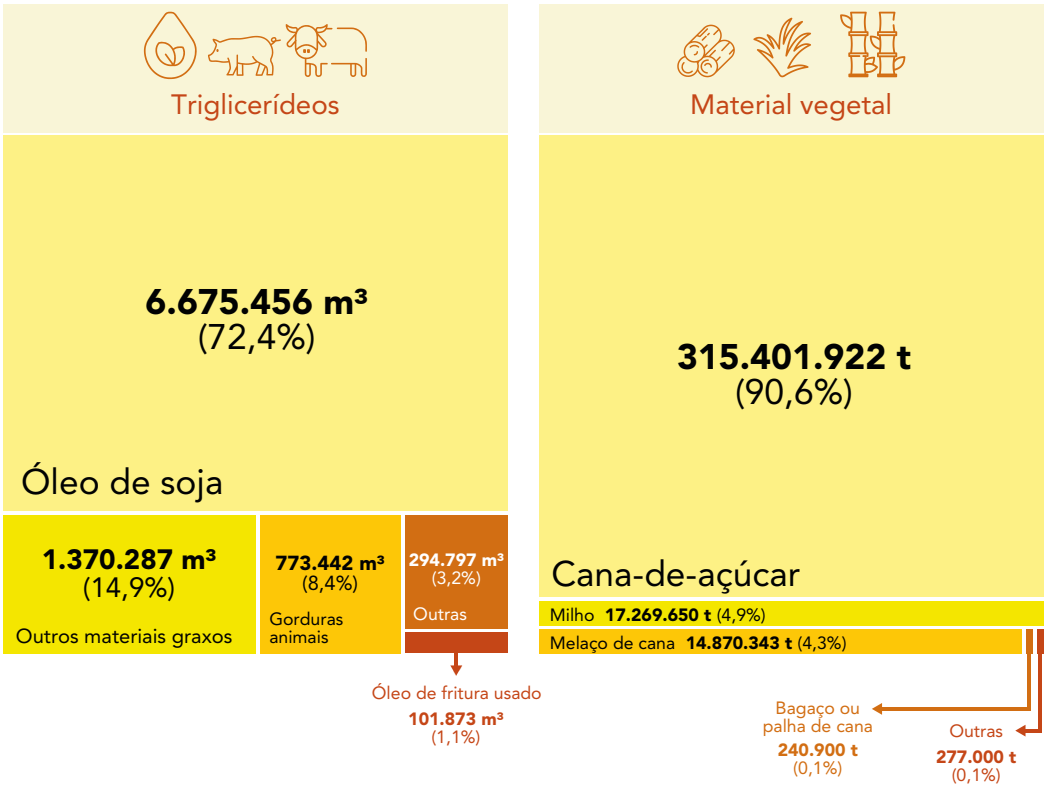
[j] Biocombustível atualmente misturado na proporção de 14,0%, em volume, com o diesel fóssil, que possui limitações técnico-mecânicas à frota de ciclo diesel.

[k] De acordo com a Superintendência de Administração do Meio Ambiente do Estado da Paraíba (Sudema), o descarte incorreto de um litro de óleo de cozinha pode contaminar mais de vinte mil litros de água. Acesso em: 21 mar. 2025. Link de acesso: sudema.pb.gov.br/noticias/descarte-incorreto-de-medicamentos-contamina-solo-e-traz-riscos-a-saude

[l] Segundo o Ministério da Fazenda, a economia circular é uma alternativa ao atual modelo de extração, processamento e descarte de materiais, que consiste em fazer a gestão de recursos finitos para recuperar os seus valores, prezando pela regeneração e pela diminuição do uso de materiais. Acesso em: 24 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/transformacao-ecologica-pagina-antiga/economia-circular

Complementarmente, o processamento da cana-de-açúcar gera, ainda, diversos resíduos que podem ser convertidos em novos produtos, como, por exemplo, o bagaço e a palha da cana, matérias-primas utilizáveis na produção de SAF, a partir das rotas SPK-FT e SPK/A. Atualmente, esses insumos são usados na produção de etanol de segunda geração ou na cogeração de energia elétrica em usinas sucroalcooleiras. Um estudo financiado pela empresa aérea Boeing indicou que as mais de 60,0 milhões de toneladas de bagaço e palha produzidas no Brasil, em 2021, poderiam oferecer cerca de 2,0 bilhões de litros de SAF, via tecnologia SPK-FT. A título de representatividade, esse valor corresponderia a 28,7% da demanda total por querosene fóssil no Brasil no ano de 2024.[24,25]

INFOGRÁFICO 5 Distribuição da participação de matérias-primas potenciais para a produção de SAF no Brasil, a partir de triglicerídeos (à esquerda em metros cúbicos – m³) e material vegetal (à direita em toneladas – t), na produção bioenergética nacional (2024)



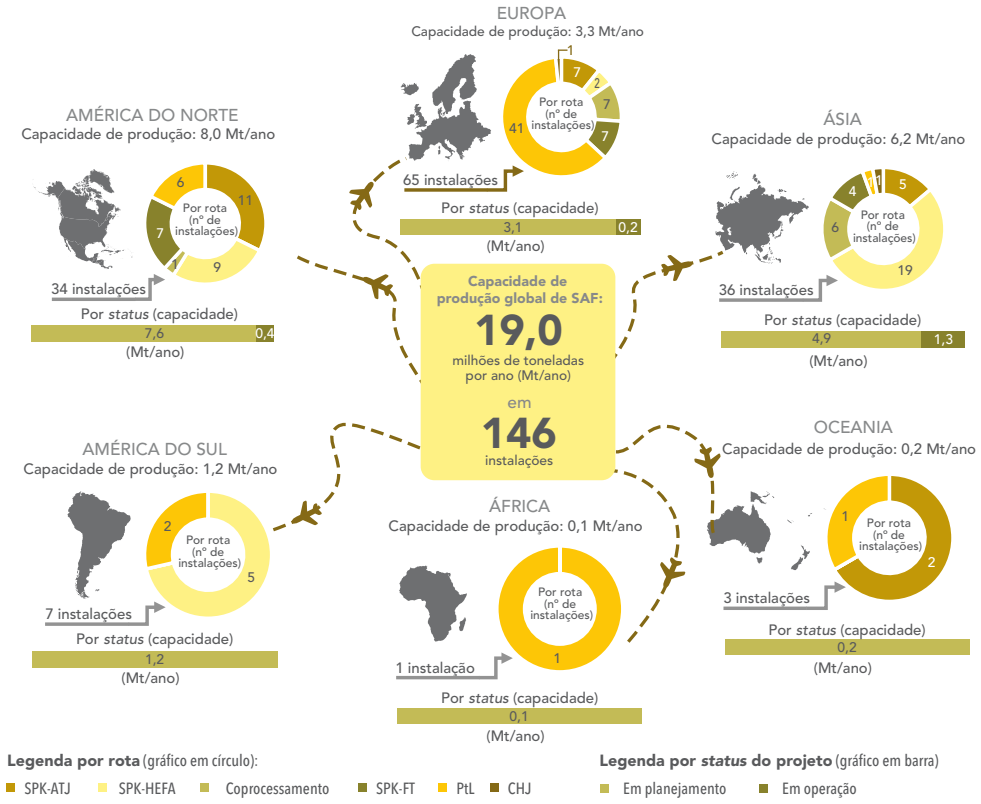
Fonte: ANP (2025), com adaptações da CNT. Acesso em: 20 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados

Nota: **materiais graxos** são substâncias ricas em óleos e gorduras e possuem moléculas de origem lipídica (glicerídeos saturado e insaturado); a categoria "**Outras**" sob triglicerídeos contempla óleos de palma/dendê, girassol, algodão, colza/canola e milho; e a categoria "**Outras**" sob material vegetal contempla demais cereais.

MAPEAMENTO DO SAF

A capacidade mundial de produção de SAF – considerando projetos em operação e anunciados – totaliza aproximadamente 19,0 milhões de toneladas por ano (Mt/ano), com concentração predominante na América do Norte, Europa e Ásia[m]. Essa capacidade está distribuída em 146 instalações industriais, incluindo projetos com previsão de início de atividades até 2030, conforme **Infográfico 6**.[8,26] Em perspectiva comparativa, esse volume corresponde a 5,7% da demanda global de querosene de aviação registrada em 2024.[10]

INFOGRÁFICO 6 **Panorama mundial da capacidade instalada e em desenvolvimento para produção de SAF, por região, rota tecnológica e *status* dos projetos (2025)**



Fontes: Elaboração CNT, com base em (i) ARGUS MEDIA (2025) e (ii) EPE (2024). Acesso em: 26 mar. 2025. Links de Acesso em: (i) view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/PRO-Map-Argus-SAF-Capacity-Map-2025.pdf e (ii) epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras

Nota: PtL, ou *Power-to-Liquids* (energia para líquidos), é uma rota produtiva de SAF que gera hidrocarbonetos líquidos sintéticos utilizando eletricidade renovável, água e o dióxido de carbono capturado.

[m] Dados contabilizados até fevereiro de 2025.

Os países da **América do Norte** concentram a maior parcela da capacidade produtiva global de SAF, respondendo por 8,0 milhões de toneladas anuais (42,1% do total do mundo). Contudo, apenas 5,0% do citado valor encontra-se em operação na região, sendo o restante (95,0%) advindo de instalações com projetos anunciados que ainda não entraram em atividade.

A produção norte-americana tem sido estimulada, dentre outros fatores, por meio do Crédito para Produção de Combustível Limpo[n], o qual determina que, a partir de 1º de janeiro de 2025, o Departamento do Tesouro Americano passou a oferecer créditos fiscais aos produtores de combustíveis de baixa emissão, com valores que variam entre 0,35 e 1,75 dólar americano por galão[o] de SAF comercializado.[27]

Na **Ásia**, está em operação a maior instalação de SAF, onde se produz 1,3 milhão de toneladas anuais do insumo (21,0% da capacidade total da região). A produção desse continente contempla a parcela de 32,6% da capacidade do mundo mediante 36 instalações em países como China, Japão, Coreia do Sul e Filipinas. É importante destacar que a Coréia do Sul planeja implementar padrões específicos para a geração de SAF e estabelecer um mandato obrigatório de mistura a partir de 2026, o que pode aumentar ainda mais a oferta na região.[8]

A **Europa**, por sua vez, possui o maior número de instalações produtoras de SAF no mundo, dispondo de 65 unidades de refino – que correspondem a 44,5% do total global. A combinação da capacidade produtiva atual e projetada ofertará 3,3 milhões de toneladas/ano, o que corresponderá 17,4% da produção mundial, com contribuição do Reino Unido, França, Espanha, Países Baixos e Suécia.

Parte do forte impulsionamento de produção de SAF na União Europeia é explicado por meio de incentivos governamentais, como o *ReFuelEU*. Essa medida é aplicada aos voos comerciais de transporte aéreo, estabelecendo obrigações a fornecedores de combustível, operadores do setor e aeroportos, a fim de estimular o aumento do número de empresas produtoras de SAF no continente.[28]

Ainda de acordo com ReFuelEU, caberá aos fornecedores garantirem que todo o combustível de aviação contenha percentuais mínimos de SAF ou de combustíveis sintéticos, iniciando com 2,0%, em 2025, passando a 6,0%, em 2030, e atingindo 70,0%, em 2050. Quanto aos operadores aéreos, competirá a responsabilidade de assegurar que, anualmente, pelo menos 90,0% do combustível

[n] Seção 45Z do Código da Legislação Tributária Federal dos Estados Unidos da América.
[o] Um galão equivale a aproximadamente 3,785 litros.

necessário às suas atividades seja abastecido nos aeroportos europeus, a fim de evitar práticas de abastecimento em locais onde o SAF ainda não é exigido.

Isso ocorreria na tentativa de o operador buscar reduzir custos e implicaria em peso adicional indevido nas aeronaves em trajetos que não exigiriam o volume adquirido. Essa ação aumentaria as emissões de GEE das aeronaves durante seus voos.

Na **América do Sul**, há registros de sete instalações produtoras de SAF em fase de planejamento, distribuídas entre Brasil (4 unidades), Uruguai (2 unidades) e Colômbia (1 unidade), que, juntas, somarão a capacidade de 1,2 milhão de toneladas ao ano. As unidades brasileiras com previsão de início de operação entre 2026 e 2029 representam 0,9 milhão de toneladas dessa capacidade, ou seja, 75,0% de toda a produtividade potencial da região sul-americana.

O volume de 0,9 milhão de tonelada de SAF seria o suficiente para atender as metas estabelecidas pelo ProBioQAV (redução de emissões de 1% a 10% até 2037). Contudo, a citada quantidade não conseguiria cumprir as metas de emissões estipuladas pelo CORSIA (neutralidade de carbono até 2035). Para o devido atendimento do programa, seria necessário que o Brasil ampliasse a capacidade produtiva de SAF nos próximos anos.[8]

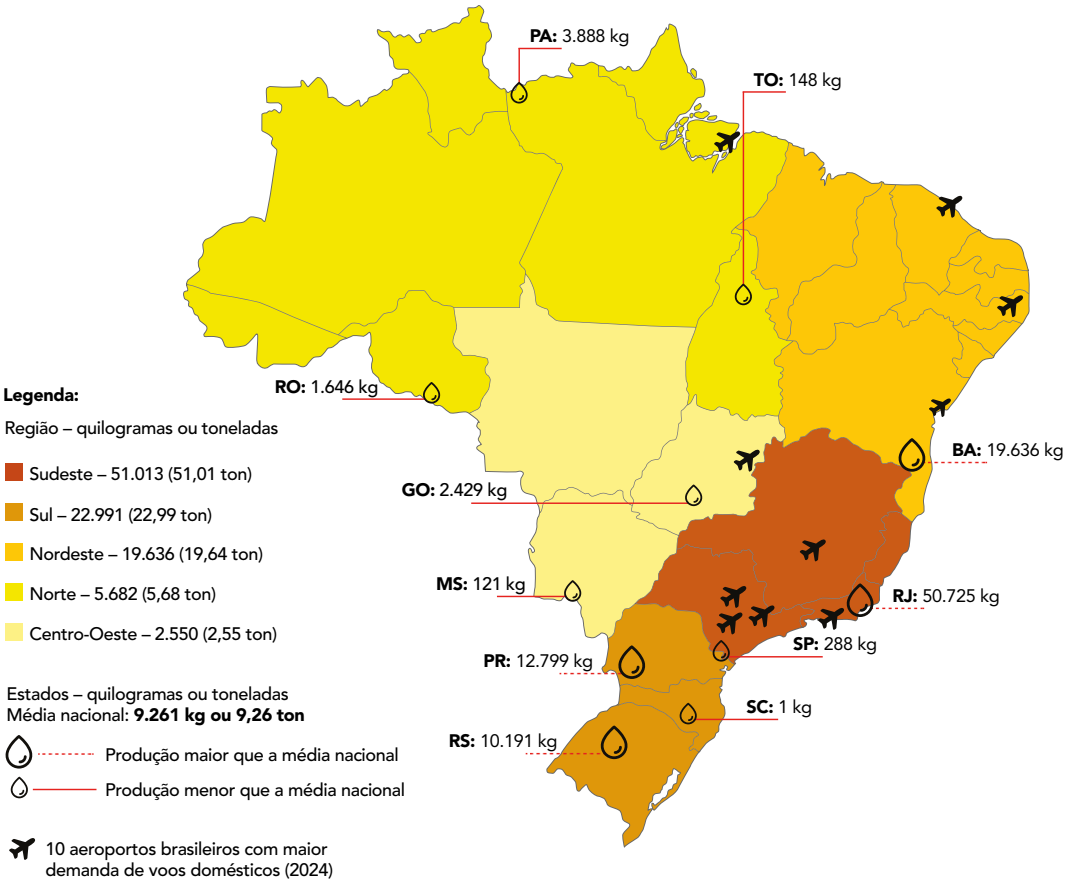
Até o momento, a predominância de instalações de SAF no Brasil tem sido incentivada pela promulgação da Lei do Combustível do Futuro, e, segundo a EPE, os projetos anunciados no país têm o potencial de atender a 12,0% da demanda estimada prevista para 2030.[8]

Voltando ao **Infográfico 6**, é possível constatar que a rota *Power-to-Liquids* (PtL) é promissora, pois conta com 52 instalações globais – a maior parcela entre os projetos contabilizados no mundo –, sendo responsável pela possível oferta de 2,7 milhões de toneladas de SAF até 2030.

Outras duas tecnologias que se destacam no Infográfico 6, são as rotas SPK-HEFA e SPK-ATJ, presentes em 35 e 25 instalações respectivamente. **Ambas possuem características que permitem a utilização de resíduos** como matéria-prima para a produção de SAF. No caso da rota HEFA, o **óleo de cozinha residual** é um insumo favorável, e, na ATJ, o **bagaço de cana**.

O **Infográfico 7**, adiante, demonstra a produção brasileira de óleo de cozinha usado no ano de 2024. A região Sudeste destaca-se pela produção de 51,01 toneladas, o que corresponde a 50,0% do contexto nacional. Na mesma região, o estado do Rio de Janeiro se sobressai, com 50,72 toneladas, representando 99,4% da oferta sudestina.[23,29] Esse insumo, apesar de apresentar, ainda, um baixo volume, pode vir a ter o potencial de crescer a partir do desenvolvimento de uma logística que estruture a coleta, tratamento e envio dessa matéria-prima para as unidades produtoras. Esse desenvolvimento seria muito importante, sob a ótica ambiental, a fim de ampliar a utilização de resíduos para a produção de SAF no Brasil.

INFOGRÁFICO 7 Mapa da oferta de óleo de cozinha residual, por região e estado, e localização dos 10 aeroportos com maior demanda (RPK) no Brasil (2024)



Fonte: Elaboração CNT no site mapchart.net, com base em (i) ANP (2025) e (ii) Anac (2024). Acesso em: 29 mar. 2025. Links de Acesso em: (i) gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados e (ii) gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/demanda-e-oferta

Nota: A demanda nos aeroportos é medida em termos de RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* ou passageiros-quilômetros pagos transportados), calculada por voo mediante a multiplicação do número de passageiros pagantes pela distância percorrida.

Além disso, o mapa demonstra que, na região Sudeste, estão localizados cinco[p] dos dez aeroportos com maior demanda por voos domésticos no país.[29] Essa característica regional propicia condições favoráveis para a potencial instalação de unidades produtivas de SAF, permitindo o aproveitamento dos resíduos disponíveis localmente e o transporte de curta distância entre a biorrefinaria e os aeroportos consumidores. Essa situação pode reduzir o custo logístico de distribuição e preço final do insumo.

No caso da região Sul, dois estados – Paraná e Rio Grande do Sul – apresentam produções de óleo residual acima da média nacional, totalizando 22,99 toneladas, o que representa 22,6% da oferta nacional. A terceira maior região produtora é o Nordeste, sendo a Bahia o único estado responsável pelo fornecimento de 19,63 toneladas desse insumo – o equivalente a 19,3% da produção do país. Nessa mesma região, se encontram três dos dez aeroportos com maior demanda brasileira[q], sendo um deles localizado no estado baiano, o que permitiria o abastecimento de SAF ao Aeroporto Internacional de Salvador Deputado Luís Eduardo Magalhães.

A região Norte é a quarta maior produtora, alcançando 5,68 toneladas do insumo. Por fim, a região Centro-Oeste ocupa a quinta posição e fornece 2,55 toneladas de óleo residual, advindo dos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul. Nessa região, encontra-se o 3º maior aeroporto com demanda, localizado em Brasília – o Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

Mais adiante, no **Infográfico 8**, é demonstrada a localização e a quantidade de produção de bagaço de cana-de-açúcar na safra de 2023/2024[r]. [23,30] A região Sudeste lidera o fornecimento nacional, concentrando mais de 117 milhões de toneladas desse resíduo. São Paulo e Minas Gerais se destacam com valores significativamente maiores que a média nacional, sendo, aproximadamente, 97,0 e 20,0 milhões de toneladas, respectivamente. Essa capacidade de produção reforça a importância estratégica da região na oferta potencial de SAF pelas rotas FT e ATJ.

É importante mencionar que esforços de produção por parte do governo já estão sendo feitos no Sudeste. Em 2024, a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Governo do Estado de São Paulo firmou uma parceria com a Alemanha, envolvendo 7,8 milhões de euros, dos quais 1,5 milhão serão

[p] Os cinco aeroportos do Sudeste, em ordem entre os dez com maior demanda, são: 1º Guarulhos – Governador André Franco Montoro (SP); 2º São Paulo/Congonhas – Deputado Freitas Nobre (SP); 5º Viracopos (SP); 6º Rio de Janeiro/Galeão – Antônio Carlos Jobim (RJ); e 8º Tancredo Neves (MG).

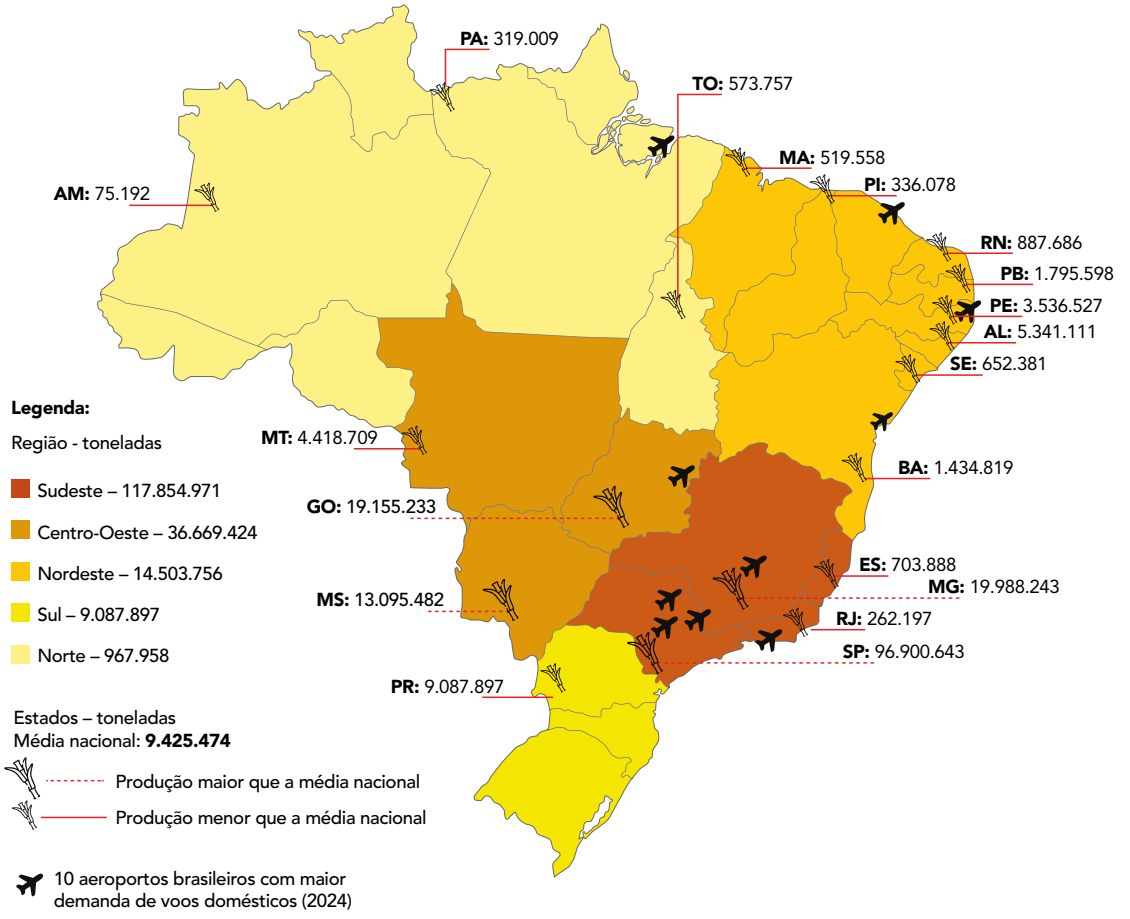
[q] Os três aeroportos do Nordeste, em ordem entre os dez com maior demanda, são: 4º Aeroporto Internacional Recife/Guararapes – Gilberto Freyre (PB); 7º Pinto Martins (CE); e 9º Deputado Luís Eduardo Magalhães (BA).

[r] A safra de cana-de-açúcar geralmente começa em abril e termina em março do ano seguinte.

recursos públicos alemães para instalar a primeira planta industrial de SAF no Brasil, a partir de resíduos de biomassa da cadeia sucroenergética. O projeto terá capacidade produtiva estimada de 750 litros diários, com operação prevista para iniciar em 2025.[31]

Adicionalmente, o **Infográfico 8** revela o Centro-Oeste como a segunda maior região produtora de bagaço de cana, com aproximadamente 37,0 milhões de toneladas. Nessa região, destacam-se os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, que superaram a produção média nacional. Os demais estados que contribuem com a produção de bagaço de cana em quantidades abaixo da média do país são: Alagoas (5,3 milhões de toneladas), Paraná (9,1 milhões de toneladas) e Tocantins (0,6 milhão de toneladas).

INFOGRÁFICO 8 Mapa da produção de bagaço de cana-de-açúcar, por região e estado na safra 2023/2024, e localização dos 10 aeroportos com maior demanda no Brasil (2024)



Fonte: Elaboração CNT no site mapchart.net, com base em (i) UNICA DATA (2024) e (ii) Anac (2024). Acesso em: 29 mar. 2025. Links de Acesso em: (i) unicadata.com.br/ e (ii) gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/demanda-e-oferta
Nota: A demanda nos aeroportos é medida em termos de RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* ou passageiros-quilômetros pagos transportados), calculada por voo mediante a multiplicação do número de passageiros pagantes pela distância percorrida.

Conforme observado nos **Infográficos 7 e 8**, o Brasil detém um importante papel potencial na produção global de combustível sustentável de aviação mediante o uso de resíduos, com mais de 179 milhões de toneladas anuais. Essa capacidade produtiva não apenas consolidaria o país como um protagonista do mercado internacional, como também representaria uma relevante contribuição na redução das emissões das empresas aéreas brasileiras.

Diante desse contexto, o governo tem atuado no fomento de projetos de desenvolvimento e implantação de biorrefinarias de combustíveis sustentáveis para o setor de transporte mediante chamada pública do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). Em 2024, a chamada recebeu 76 propostas, que totalizam um investimento potencial de R$ 167 bilhões. Dos projetos recebidos, mais da metade (43) visa a produção de SAF, correspondendo a R$ 120 bilhões, o que demonstra o concreto interesse do governo e das empresas em induzir uma economia de baixa emissão para o setor aéreo.[32]

APLICAÇÕES NO MODO AÉREO

Conforme mencionado na seção "O que é o combustível sustentável de aviação?", o teor de SAF é limitado na mistura com a parcela fóssil de querosene devido à sua compatibilidade restrita com as aeronaves e demais requisitos de segurança do setor, devendo ter seus percentuais de mistura validados pelas agências normalizadoras. No entanto, as empresas aéreas vêm realizando testes com o biocombustível aeronáutico para comprovar sua viabilidade técnica e mecânica em teores acima dos já permitidos em aplicações reais.

A Embraer[s], empresa brasileira de aeroespacial e 3ª maior fabricante de jatos comerciais do mundo, em parceria com a Pratt & Whitney[t], produtora de motores de aviação, realizou, em 2022, testes com 100% de SAF, em motorização instalada no jato E195-E2 (**Foto 1**). Essa aeronave é a terceira maior em tamanho da Embraer, podendo transportar até 132 passageiros. Com uma envergadura[u] de 35,12 metros, o jato atinge velocidade de cruzeiro[v] de 876 km/hora e possui peso máximo na decolagem de 61,5 toneladas.[33,34]

Os testes realizados pela Embraer comprovaram que os aviões de modelo E2, motorizados com *Geared TurboFan* (GTF, da sigla em inglês para turbofan com engrenagens) em suas turbinas, podem ser abastecidos com SAF em até 100% de teor, sem comprometer a segurança ou a *performance* da atividade. Os experimentos foram conduzidos durante dois dias no Aeroporto Internacional de Fort Lauderdale (em solo), resultando, posteriormente, em um voo teste de 70 minutos no Aeroporto Regional de Vero Beach, ambos nos Estados Unidos.[33]

Segundo a fabricante Pratt & Whitney, a aeronave com SAF emitiu 85,0% menos dióxido de carbono (CO_2) em comparação à aeronave de geração anterior abastecida com querosene fóssil, contabilizando todo o ciclo de vida do carbono. Cabe, ainda, destacar que o biocombustível utilizado pela Embraer foi produzido pela World Energy na rota SPK-HEFA.[33]

Ainda em 2022, a Airbus completou o primeiro voo teste utilizando SAF no modelo A330 (**Foto 2**). A

[s] A empresa foi fundada em 1969 e atualmente é líder mundial na fabricação de aeronaves do segmento de até 130 assentos, com unidades industriais, escritórios e centros de distribuição de peças e serviços nas Américas, África, Ásia e Europa. Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: embraer.com/br/pt/sobre-nos

[t] Pratt & Whitney é uma empresa norte-americana fundada em 1925 que produz motores de aviões.

[u] É a distância entre as pontas das asas de um avião.

[v] Velocidade quando os motores operam em seu regime mais eficiente e constante, compreendida entre o final da subida e o início da descida do avião.

empresa aeronáutica e espacial, inaugurada em 1969, é a maior da Europa em termos de fabricação de aeronaves e fornece produtos, serviços e soluções para os setores aeroespacial e de aeronaves comerciais, helicópteros e de defesa. A aeronave comercial testada possui envergadura de 60,3 metros e velocidade de cruzeiro de 880 km/hora, podendo transportar até 292 passageiros com peso máximo de decolagem de 233 toneladas.[34,35]

Foto 1. Divulgação/Embraer do modelo E195-E2– Leandro Dourado. 30 jun. 2022. Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: tinyurl.com/2p8ab2x4

Foto 2. Divulgação/UK MOD do modelo A330. 21 nov. 2022. Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: tinyurl.com/k5yx5v8c

Durante os testes da Airbus, uma aeronave militar em serviço foi utilizada para o primeiro voo com 100% de SAF no espaço aéreo do Reino Unido, em um esforço conjunto entre a RAF (Força Aérea Real do Reino Unido), a fabricante de aeronaves Airbus, a Agência de Equipamento e Apoio à Defesa do Ministério da Defesa do Reino Unido, a empresa Air Tanker[w] e a fabricante de motores Rolls-Royce.

No ensaio da Airbus, o combustível foi fornecido pela Air bp (de *British Petroleum*) e produzido a partir de óleo de cozinha usado, que gerou redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) em até 80,0% em relação ao querosene convencional, considerando todo o ciclo de vida do biocombustível. O voo experimental durou 90 minutos e incluiu uma simulação de reabastecimento durante a operação.[35]

Em 2023, houve um novo teste de contexto de defesa militar, com o nível de 43% de SAF na aeronave A330, no qual o reabastecimento foi concretizado, com sucesso, em pleno voo. O teste ocorreu em Oxfordshire, na Inglaterra, envolvendo uma aeronave da Força Aérea Real do Reino Unido.[36] O feito demonstrou a viabilidade operacional do biocombustível de aviação mesmo em manobras complexas, representando um avanço significativo para a sua adoção em operações militares.

[w] Empresa britânica, fundada em 2007, que opera uma linha aérea e oferece contratos de *leasing* e de operações de aviação.

No Brasil, os registros de testes com o SAF tiverem início em 2012, ano em que a empresa Azul Linhas Aéreas Brasileiras, em parceria com Amyris Inc. (empresa de biotecnologia), Embraer e General Electric (empresa de energia), realizou um voo experimental utilizando SAF produzido a partir da cana-de-açúcar. A companhia aérea utilizou nos testes um jato do modelo E195, que decolou do Aeroporto de Viracopos, em Campinas, com destino ao Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, marcando o primeiro voo da companhia comercial brasileira com o biocombustível.[37]

Este voo experimental, originado do projeto chamado Azul+Verde (**Foto 3**), contou com 9 mil litros de combustível, sendo 50% (4.500 litros) a parcela de SAF. O combustível sustentável recebeu o nome de AMJ 700 e foi produzido com o uso de microrganismos modificados, que convertem o açúcar de cana em hidrocarbonetos. Segundo a Amyris Inc., o experimento permitiu a redução de até 82,0% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) da aeronave, considerando o ciclo completo de carbono, em comparação ao querosene de origem fóssil.[37]

Já o grupo Latam, também presente no Brasil e que opera atualmente a maior malha aérea nacional, realizou em 2023, em parceria com a Airbus, o primeiro voo de entrega[x] em uma aeronave de modelo A320neo abastecida com SAF em solo brasileiro (**Foto 4**).

O voo foi realizado no trajeto entre a fábrica da Airbus em Toulouse, na França, até Fortaleza, Ceará, utilizando uma mistura de 30% de SAF com combustível tradicional. Segundo a operadora aérea, o biocombustível permitiu uma redução de 80% nas emissões de CO_2 ao longo do ciclo de vida do bioquerosene. No mesmo ano, a Latam recebeu um novo modelo, A321neo, que partiu da Alemanha com o mesmo destino, Fortaleza, desta vez utilizando uma mistura de 49% em seus motores.[38,39]

Foto 3. Divulgação/Azul. Aeronave operou com 50% de SAF. 01 ago. 2024. Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: tinyurl.com/48rwaffy

Foto 4. Divulgação/Airbus. Aeronave operou com 30% de SAF. 2 out. 2023. Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: tinyurl.com/3v6x9ty2

[x] É um tipo de voo que tem o objetivo de retornar a aeronave (nova ou usada) a sua base ou passar de um aeroporto a outro sem passageiros ou carga, também denominado *Ferry Flight*.

No segmento de aviação executiva, a Embraer testou os modelos Phenom 300E e Praetor 600 abastecidos com 100% de SAF, em suas instalações na Flórida, em 2023. A empresa brasileira considerou os testes satisfatórios, que contaram com a colaboração dos fornecedores de motores Pratt & Whitney e Honeywell e a produtora de biocombustível World Fuel. Embora as aeronaves da Embraer sejam aprovadas para uma mistura de até 50,0% de SAF, a empresa indicou que, mediante seus resultados, com novas especificações, o percentual poderá chegar a patamares superiores aos aprovados.[40]

A adoção de biocombustível no segmento da aviação executiva é importante para o Brasil, pois o país possui a segunda maior frota de aviões desse tipo no mundo. Em 2024, houve um novo estudo da Airbus que avaliou o impacto ambiental de aeronaves abastecidas com SAF para identificar a eventual emissão de partículas de fuligem[y], em comparação com aviões operando com combustível fóssil. O estudo detectou que os motores da aeronave de modelo A350, abastecidos com SAF da rota HEFA obtiveram uma redução de 35,0% na emissão do citado poluente[z], em comparação com o combustível convencional JET A-1. Além disso, o uso da parcela renovável diminuiu a formação de cristais de gelo, que são rastros brancos que acompanham a aeronave durante o voo. Esse fenômeno é denominado *contrail*[aa], formado a partir do congelamento da fuligem.[41]

O citado estudo foi conduzido em parceria com a fabricante de motores Rolls-Royce, o Centro Aeroespacial Alemão e a Neste e revelou que o número de cristais de gelo por massa de SAF consumida foi reduzido em 56% em relação ao mesmo voo com querosene fóssil.[41]

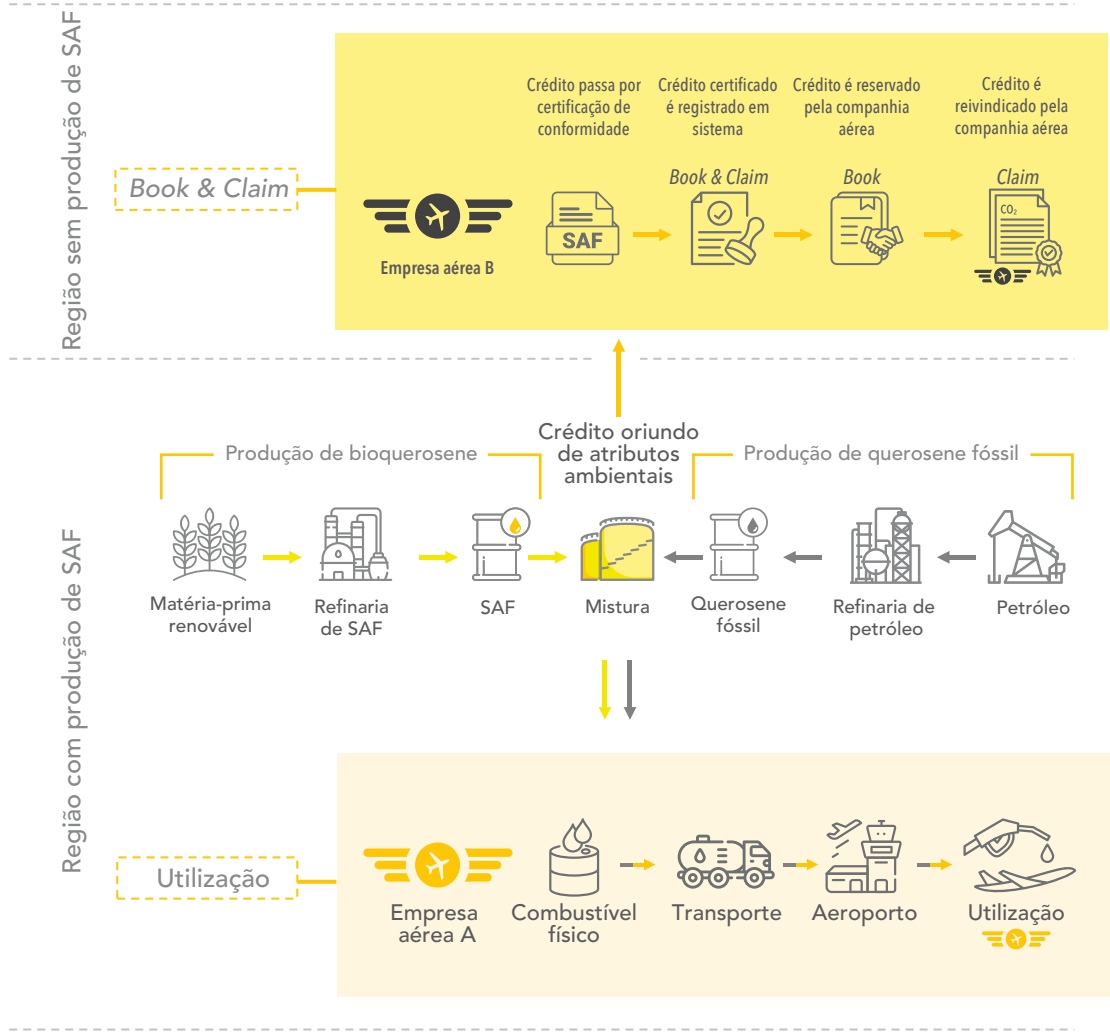
Outro aspecto positivo do SAF é que ele integra ao sistema de compensação global de emissões, denominado "*Book & Claim*". Nessa iniciativa, os benefícios ambientais do biocombustível são quantificados e podem ser adquiridos em forma de créditos pelas companhias aéreas que não podem utilizar o SAF em sua operação, conforme ilustra o **Infográfico 9**.[42]

[y] Caracteriza-se pela aglomeração de partículas ricas em carbono formadas durante a combustão incompleta de combustíveis, podendo aumentar o efeito do aquecimento global.

[z] Segundo Märkl e colaboradores (2024), na revista Atmospheric Chemistry and Physics. Acesso em: 09 mai. 2025. Link de acesso: acp.copernicus.org/articles/24/3813/2024/acp-24-3813-2024.pdf

[aa] Segundo o Instituto Rock Mountain, os gases de exaustão dos motores aeronáuticos podem fornecer a energia necessária para que o vapor d'água presente na atmosfera ao redor da aeronave se condense, formando cristais de gelo em torno das partículas de fuligem geradas pela combustão em formato de rastros de nuvem branca (*contrail*). Além disso, esses gases de exaustão contêm vapor d'água, contribuindo para a formação dessa nuvem de gelo, que se desenvolve progressivamente conforme o avião se desloca no ar. Quando presentes em grande quantidade, essas formações podem alterar significativamente o equilíbrio entre o calor absorvido e o calor refletido pela superfície terrestre, resultando em um aumento do aquecimento atmosférico. Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: rmi.org/aviation-contrails-what-we-know-and-what-we-dont-about-this-warming-phenomenon/

INFOGRÁFICO 9 Modelo *book & claim* de compensação de emissões e utilização de SAF



Legenda:

Contabiliza a redução de emissões mediante a declaração de uso de SAF, mesmo que não tenha utilizado o biocombustível fisicamente.

Não contabiliza a redução de emissões, pois os benefícios ambientais do SAF foram desvinculados do biocombustível no sistema *Book & Claim*.

Fonte: Elaboração CNT, com base em World Energy (2023). Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: worldenergy.net/our-approach/book-claim.

Este esquema de compensação envolve a reserva e reivindicação de certificados para neutralizar as emissões da atividade aérea. Funciona como um mecanismo que permite a transferência de créditos a partir da produção de SAF para um operador que deseja neutralizar as suas emissões

sem a necessidade de utilizar o combustível renovável. Para concluir a neutralização, é necessário que a empresa aérea divulgue em seus canais de comunicação a utilização do crédito certificado. Dessa forma, o processo poderá ser devidamente concluído e finalizado no sistema (*Book & Claim*), impedindo que o crédito seja novamente utilizado por qualquer outra parte.[43]

No Brasil, a GOL Linhas Aéreas, fundada em 2001, tornou-se a empresa pioneira na adoção do modelo *Book & Claim* para utilização de créditos de SAF. Em 2023, a companhia anunciou uma operação-piloto, em conjunto com a SkyNRG[ab] e a fornecedora Vibra, resultando na compensação de 180,0 toneladas[ac] de emissão de CO_2. O SAF, que originou os créditos, foi produzido a partir de óleo de cozinha usado e consumido por outra operadora aérea no Aeroporto de Schiphol, em Amsterdã.[44]

Com base no exposto nesta seção, fica constatada a compatibilidade técnica da aplicação de SAF para descarbonizar o modo aéreo de transporte. No entanto, conforme **Gráfico 5**, por ser uma fonte energética alternativa, a sua viabilidade econômica ainda é um desafio, pois trata-se de um combustível mais caro em relação ao convencional. Seu custo de produção varia de duas a três vezes a mais do que o valor do querosene fóssil por litro, podendo alcançar até oito vezes em rotas produtivas específicas, a depender das matérias-primas utilizadas e dos processos empregados.[45]

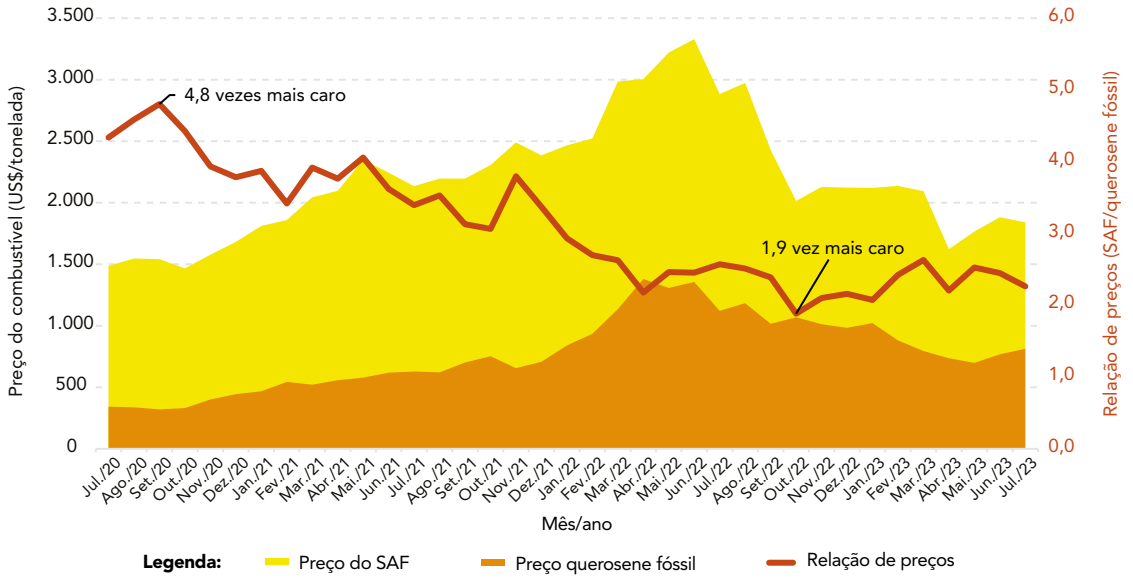
No **Gráfico 5**, adiante, é demonstrada a evolução mensal dos preços do querosene fóssil e do SAF entre julho de 2020 e julho de 2023 nos mercados dos Estados Unidos, Europa e Ásia. A linha verde indica a razão entre os dois combustíveis ao longo do referido período.[46] O SAF chegou a custar 4,8 vezes mais que o combustível convencional em setembro de 2020, enquanto no mês de menor assimetria (outubro de 2022), o preço foi 1,9 vez mais caro, com a média de 3 vezes no período.

Ainda no **Gráfico 5**, a consistência de preço elevado do SAF em comparação ao querosene fóssil é demonstrada durante todo o período apurado, atingindo seu valor máximo em junho de 2022, quando chegou a custar US$ 3.330 por tonelada, e seu menor preço, de US$ 1.467 por tonelada, em outubro de 2020, durante a pandemia.

[ab] Empresa especializada em soluções tecnológicas para a produção de SAF.

[ac] Esse valor corresponderia à emissão média de 2.093 trajetos de aeronave partindo de Brasília com destino a São Paulo, sem paradas, considerando que todo o gás emitido é CO_2. Acesso em: 29 abr. 2025. Link de acesso: google.com/travel/flights?gl=BR&hl=pt-BR

GRÁFICO 5 Evolução e razão dos preços do combustível sustentável de aviação e do querosene fóssil nos Estados Unidos, Europa e Ásia (2020-2023)



Fonte: The Wall Street Journal (2023), com adaptações da CNT. Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: wsj.com/articles/sustainable-aviation-fuel-leader-talks-green-premiums-and-impact-of-tax-incentives-22f77d81

Nota: os números do gráfico referem-se ao preço à vista de atacado nos mercados dos Estados Unidos, Europa e Ásia, considerando remessas de grandes volumes de combustível.

É importante destacar que o combustível faz parte dos insumos de maior impacto na tarifa média praticada pelas companhias aéreas, uma vez que compõe 36% dos custos operacionais desse tipo de transporte em 2023[ad]. A imposição do uso do SAF sem uma estratégia político-econômica de incentivo poderia resultar em aumentos representativos nas despesas operacionais das empresas, o que inviabilizaria diversas rotas e trajetos comercialmente praticados atualmente.

Assim, para tornar o SAF mais economicamente viável, serão necessários mecanismos de incentivo ao setor produtor para diminuir o seu custo, a fim de evitar o repasse no preço das tarifas aéreas, provocando consequentemente uma redução da demanda do setor. Também importante é o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas que tornem a produção de SAF mais eficiente, conferindo-lhe escala e meios para reduzir o seu preço final.

[ad] Dados da Associação Brasileira das Empresas Aéreas (Abear) (2024) que contemplam a distribuição de custos em 2023 de 36% em combustíveis e lubrificantes; 15% em despesas operacionais; 14% em seguros, arrendamentos e manutenção das aeronaves; 12% em pessoal; 7% em depreciação e amortização; 4% em tarifas de navegação aérea; 3% em comissaria e limpeza; 2% em tarifas aeroportuárias; 1% em assistência a passageiros; e 6% em demais custos. Acesso em: 14 abr. 2025. Link de acesso: panorama.abear.com.br

SALDO DE EMISSÕES

A utilização de SAF na aviação contribui para a redução de GEE, uma vez que a maior parte do carbono liberado durante a sua combustão é considerado neutro, por ter origem renovável biogênica[ae] e ser derivado de matérias-primas que podem ser biomassas e/ou resíduos orgânicos. Assim, para compreender detalhadamente o seu saldo de emissões é necessária uma análise completa do ciclo de vida do carbono, abrangendo as etapas de produção, coleta de matéria-prima, extração, energia empregada, distribuição e utilização final, com a contabilização em unidades de dióxido de carbono equivalente por unidade de energia produzida (CO_{2eq}/MJ)[af].

Nesse contexto, um estudo realizado nos Estados Unidos apresentou um comparativo de emissões de ciclo de vida de diversas rotas e fontes primárias para a produção de SAF.[47] O levantamento considerou as tecnologias HEFA, ATJ, FT (com e sem pirólise[ag]) e PtL, conforme demonstradas no **Gráfico 6**, com insumos comumente utilizados no país norte-americano, que também são produzidos no território brasileiro, como soja e gordura animal. Os dados foram coletados e estruturados mediante modelos de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA, da sigla em inglês para *Life Cycle Assessment*).

No supracitado Gráfico, nota-se que a média de emissões de GEE das rotas consideradas no estudo é de 29,4 gCO_{2eq}/MJ, representando uma redução média de 67,0% em relação ao combustível fóssil. Dentre as matérias-primas utilizadas na rota HEFA, é possível destacar o desempenho do SAF produzido com óleo de cozinha residual, que obteve apenas 17,1 gCO_{2eq}/MJ, indicando uma redução de 80,8%.

Na rota com **soja** – matéria-prima abundante no Brasil –, ainda sob o processo HEFA, constata-se que a maior quantia das emissões de GEE está associada à produção de hidrogênio, sinalizada pela cor laranja no **Gráfico 6** (■), para o hidroprocessamento do óleo, com parcela de 32,3% do total de emissões nesse tipo de processo. Cabe ressaltar que, atualmente, o hidrogênio é majoritariamente produzido por fontes fósseis no mundo, o que resulta no aumento de emissões desta etapa da cadeia.

[ae] Fontes biogênicas são provenientes de fontes orgânicas, que absorvem carbono da atmosfera durante seu crescimento. Quando essas fontes são utilizadas como matéria-prima para produção de combustíveis, o carbono liberado durante a sua combustão é o mesmo anteriormente capturado do meio ambiente, tornando as emissões neutras.

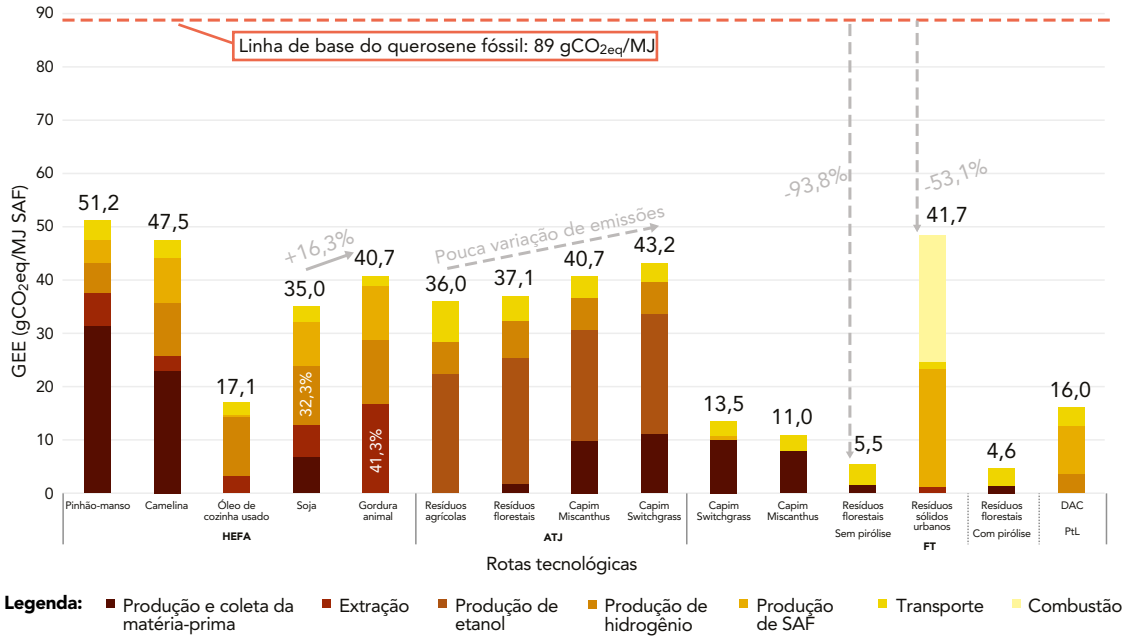
[af] O dióxido de carbono equivalente é a multiplicação das quantidades emitidas de diferentes gases de efeito estufa pelos seus potenciais de aquecimento global, em unidade de referência ao CO_2.

[ag] Pirólise é o processo de gaseificação de biomassa sob altas temperaturas, na ausência de oxigênio.

Diferentemente da soja, a rota HEFA com gordura animal concentra maior saldo de emissão na etapa de sua extração, pois o processo de obtenção deste insumo é feito por renderização, um processo térmico que separa a gordura útil dos demais restos do animal, demandando, assim, grande quantidade de energia, especialmente elétrica, para o aquecimento.[47] Nesse caso, essa fase de renderização contribui com 41,3% das emissões totais do SAF, resultando em uma tecnologia 16,3% mais intensa em termos de emissões que a de soja.

Adicionalmente, o **Gráfico 6** revela que a rota ATJ apresenta um perfil de emissões consistente, independentemente da matéria-prima utilizada. Dentro dessa tecnologia, os resíduos agrícolas e florestais se destacam com menor intensidade de carbono por energia produzida, com emissões médias de 36,5 gCO_{2eq}/MJ. De todos os insumos utilizados nessa rota tecnológica, a maior parcela de emissão está localizada na etapa de produção de etanol, que serve como fase prévia ao processo de conversão em SAF.

GRÁFICO 6 Emissões (GEE) do ciclo de vida de diferentes rotas e matérias-primas para a produção de SAF, em gramas de CO_2 equivalente (CO_{2eq}) por unidade de energia produzida (MJ)



Fonte: Yang e Yao (2025), com adaptações da CNT. Acesso em: 03 abr. 2025. Link de acesso: sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925000035

Nota: os valores apresentados sobre cada barra referem-se à média calculada no estudo. A categoria "Produção de hidrogênio" inclui as emissões de sua cadeia produtiva, considerando tecnologias como a reforma a vapor de metano a partir de gás natural ou eletrólise com energia renovável. "DAC" corresponde à captura de CO_2 da atmosfera (*Direct Air Capture*) que servirá de insumo para a produção de SAF sob a rota PtL. Pinhão-manso e camelina são plantas oleaginosas, enquanto capim miscanthus e switchgrass são gramíneas de alto rendimento de biomassa.

No que tange à tecnologia FT, que apresenta reduções expressivas de gases poluentes, as parcelas emissoras mais significativas se concentram nas etapas de produção, coleta de matéria-prima e transporte do combustível. No caso de resíduos florestais, como serragem, casca de árvores e troncos, há uma redução de 93,8% de emissões em comparação com o querosene convencional. Em contrapartida, os resíduos sólidos urbanos (RSU), utilizados sob a mesma rota FT, geram uma emissão de 41,7 gCO_{2eq}/MJ, representando uma diminuição de 53,1% de GEE em relação ao fóssil.

O motivo pelo qual ocorre uma grande emissão na alternativa com RSU é que grande parte do carbono fica presente no próprio lixo, advindo de plásticos e borrachas de origem petroquímica. Além disso, é necessária muita energia para efetuar a separação de componentes orgânicos dos não orgânicos. Devido a esse contexto, a matéria-prima RSU se torna a única que gera emissões durante a etapa de combustão sinalizada pela cor amarelo claro no gráfico ( ) na operação da aeronave.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em todo o conteúdo apresentado nessa edição, os combustíveis sustentáveis de aviação se consolidam como uma alternativa estratégica para a redução das emissões de GEE do setor aéreo. O SAF tem sido produzido a partir de diferentes rotas tecnológicas e misturado em diversas proporções ao querosene fóssil, sendo validado globalmente por órgãos competentes.

Apesar de seu potencial, a produção ainda se encontra em estágio inicial no Brasil, dispondo de vantagens, mas, também, enfrentando desafios como custos elevados, escala industrial limitada e a necessidade de avanços regulatórios e mecanismos de incentivo financeiro para estimular a sua produção e viabilidade econômica. Visando potencializar a capacidade produtiva deste combustível, parcerias público-privadas podem impulsionar a construção de biorrefinarias e adaptação de unidades produtoras existentes.

VANTAGENS

- reduz as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com as metas globais de descarbonização, estabelecidas por órgãos competentes;
- dispensa modificações nas aeronaves e na infraestrutura aeroportuária de abastecimento por ser *drop-in*;
- dispõe de legislação técnica brasileira para a sua especificação;
- conta com testes em campo, comprovando sua viabilidade técnica-operacional;
- está integrado a esquemas internacionais de compensação das emissões;
- pode ser produzido a partir de grande variedade de biomassas;
- impulsiona o Brasil na liderança global de biocombustíveis; e
- aumenta a segurança energética do país.

DESAFIOS

- apresenta custos de produção mais elevados do que o querosene fóssil, devido ao seu complexo processo produtivo;
- possui oferta limitada no Brasil e no mundo, com volume ainda insuficiente para atender à demanda da aviação;
- carece de políticas públicas em mecanismos de incentivo para estimular sua produção e consumo;
- enfrenta a concorrência com combustíveis fósseis consolidados no mercado global;
- apresenta limitações associadas ao baixo nível de prontidão tecnológica devido à complexidade de seus processos de conversão; e
- compete com outros processos industriais que utilizam as mesmas matérias-primas.

O Brasil, por contar com ampla disponibilidade de biomassas, apresenta vantagens importantes que o tornam competitivo para ser um dos principais produtores globais de SAF, potencializando a sua balança comercial favorável, devido à possibilidade de exportação para demais países. Além disso, a matriz energética brasileira possui grande parcela de renovabilidade, facilitando a produção de SAF de baixo carbono e criando um cenário favorável para a transição energética ao setor aeroviário.

ANEXO I

Processo	Nome em inglês	Nome em português
I – SPK-FT	*Synthetic Paraffinic Kerosene Fischer-Tropsch*	Querosene Parafínico Sintético Fischer-Tropsch

Na rota SPK-FT, biomassas vegetais – como eucalipto, pinheiro, bagaço de cana-de-açúcar, capim-elefante, algas e palhada[ah] – são convertidas em combustíveis, como o querosene parafínico[ai], por meio da síntese Fischer-Tropsch (FT). O processo é iniciado com o pré-tratamento da biomassa removendo o seu excesso de umidade, diminuindo as impurezas e reduzindo o tamanho de suas partículas. Em seguida, o material é submetido ao processo termoquímico de gaseificação, no qual a biomassa sólida é transformada em gás mediante a aplicação de altas temperaturas (700 – 1.500 °C) na presença de oxigênio.[8,48]

Esse gás é conhecido como de síntese, também chamado *Syngas* – sendo composto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2). Suas moléculas reagem na presença de um catalisador, geralmente à base de ferro ou cobalto, formando uma faixa de hidrocarbonetos com diferentes comprimentos de cadeias de carbono. Posteriormente, essa mistura passa por etapas de refino, incluindo craqueamento, isomerização e fracionamento[aj], para aumentar o rendimento da produção de SAF, adequar as suas especificações técnicas e

[ah] Resíduos de vegetais que se depositam na superfície do solo.

[ai] Compostos parafínicos pertencem ao grupo de hidrocarbonetos que são formados por hidrogênio e carbono, com ligações simples entre os seus átomos, de alto peso molecular e com a fórmula geral C_nH_{2n+2}.

[aj] Craqueamento é a quebra de moléculas com a finalidade de transformá-las em outras frações e compostos químicos. Isomerização é a transformação da substância em um isômero, o que mantém sua composição química, mas com uma estrutura diferente. Fracionamento é a separação de uma

melhorar a sua qualidade. Outros subprodutos, como diesel verde[ak], gases leves, nafta verde e ceras, também são gerados neste processo, capaz de converter cerca de seis toneladas de biomassa em uma de biocombustível.[8,48-49]

Nessa mesma rota (SPK-FT) é possível obter o gás de síntese pelo processo *Power-to-Liquid* (energia para líquido, ou PtL na sigla em inglês). Nesta tecnologia, dióxido de carbono (CO_2) é capturado diretamente de fontes industriais ou da atmosfera (processo conhecido como DAC, da sigla em inglês *Direct Air Capture*). Após a captura de CO_2, ocorre uma combinação com o hidrogênio (H_2), que deve ser produzido a partir de energia renovável. A mistura dos gases (CO_2 + H_2) passa por etapas de processamento que geram o gás de síntese (CO + H_2), o qual servirá como matéria-prima ao processo Fischer-Tropsch, permitindo a produção de SAF.[50]

A tecnologia supracitada foi aprovada em 2009 pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, da sigla em inglês para *American Society for Testing and Materials*) e possui nível 7, em uma escala de 1 a 9, em termos de Nível de Prontidão Tecnológica (TRL, da sigla em inglês para *Technology Readiness Level*[al]). Isso significa que essa rota já foi demonstrada em ambiente de produção, com condições operacionais semelhantes às reais de larga escala.

No Brasil, sua produção é autorizada e a mistura do SAF resultante ao querosene fóssil pode ser feita na proporção máxima de 50,0%, pois é considerado um biocombustível semelhante ao JET A, mas não idêntico. A ASTM e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) são responsáveis por atestar a combinação da mistura renovável com fóssil; contudo nem todo SAF é compatível com toda frota de aeronaves e infraestruturas de abastecimento do país. [8-9,48-49]

mistura de substâncias em outros componentes por meio de processos diversos, como, por exemplo, a destilação.

[ak] Gases leves são gases de baixa densidade, como o metano (CH_4) e etano (C_2H_6). Nafta verde é um composto líquido leve, com faixa de destilação semelhante à da gasolina, sendo utilizada como solvente de tintas. Cera é a fração sólida resultante do processo FT, no qual o CO é polimerizado sob alta pressão. A cera é empregada na produção de plásticos. Diesel verde é um biocombustível líquido idêntico ao seu equivalente de origem fóssil e pode ser utilizado em máquinas e motores do ciclo diesel. A Confederação Nacional do Transporte (CNT) publicou, em 2024, a 4ª edição da Série CNT Energia no Transporte, que trata sobre o diesel verde – uma opção de baixo carbono para caminhões e ônibus rodoviários, disponível gratuitamente em: cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-lanca-publicacao-sobre-o-diesel-verde-serie-cnt-de-energia.

[al] Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o TRL é um método desenvolvido pela NASA (da sigla em inglês para *National Aeronautics and Space Administration*) para estimar a maturidade das tecnologias e sua progressão em um determinado processo de inovação. A escala varia de 1 a 9, sendo: TRL 1 – idealização do projeto e pesquisa dos conceitos básicos; TRL 2 – concepção e determinação de aplicações práticas; TRL 3 - prova de conceito por meio de modelagens e simulações; TRL 4 – otimização da prova de conceito; TRL 5 – validação da prototipagem em ambientes representativos da realidade de aplicação; TRL 6 – escalonamento do protótipo para experimentos finais; TRL 7 – demonstração da tecnologia em ambiente operacional; TRL 8 – produção e desenvolvimento em ambiente operacional; e TRL 9 – produção comercial. Acesso em: 10 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf

Processo	Nome em inglês	Nome em português
II – SPK-HEFA	*Synthetic Paraffinic Kerosene Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*	Querosene Parafínico Sintético Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados

A rota SPK-HEFA, aprovada pela ASTM em 2011, é a mais consolidada mundialmente, com nível 9 de prontidão tecnológica, indicando uma alternativa madura e comercialmente disponível. Sua mistura ao querosene fóssil é autorizada no Brasil em até 50,0%, sendo considerado um JET alternativo semelhante ao JET A, porém não idêntico. No processo HEFA, triglicerídeos de óleos vegetais e gorduras animais, como sebos bovino e suíno, óleo de soja, palma, pinhão-manso, colza/canola e de fritura usado, são convertidos em cadeias de hidrocarbonetos renováveis mediante reações com hidrogênio e catalisadores. Geralmente, é necessária 1,2 tonelada de triglicerídeos para produzir 1 tonelada de SAF.[8-9,48-49]

A primeira etapa consiste na extração do óleo, rico em triglicerídeos, que possui, em sua composição química, ligações duplas entre carbono e oxigênio (C=O). O óleo extraído passa por um processo de pré-tratamento, onde impurezas, como fósforo e metais, são removidas, evitando impactos negativos na eficiência dos catalisadores. Em seguida, o óleo é submetido à hidrogenação catalítica, um processo em que as ligações duplas são extinguidas na presença de hidrogênio e catalisadores à base de níquel.[8-9,48-49]

Subsequentemente, o oxigênio presente na molécula do óleo e outros compostos indesejáveis são eliminados por meio de processos industriais, resultando na formação de hidrocarbonetos de cadeia longa, além de subprodutos como água (H_2O), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) que serão extraídos do SAF. Ao final, o composto obtido passa por etapas que envolvem a utilização de hidrogênio, responsáveis por reorganizar e encurtar a estrutura das moléculas com o intuito de melhorar as suas propriedades, como ponto de fluidez e desempenho em baixas temperaturas. Assim, o combustível passa a apresentar cadeias de carbono variando entre 9 e 15 átomos, tornando-se um combustível sustentável de aviação.[8-9,48-49]

Processo	Nome em inglês	Nome em português
III – SPK/A	*Synthetic Paraffinic Kerosene Fischer-Tropsch with Aromatics*	Querosene Parafínico Sintético Fischer-Tropsch com Aromáticos

A rota SPK/A é uma variação do processo de Fischer-Tropsch (I - SPK-FT), anteriormente apresentado, com a adição de compostos aromáticos[am] em sua produção, a qual foi aprovada pela ASTM em 2015. Nesse processo, além da síntese FT, ocorre, também, uma etapa que transfere grupos químicos de aromáticos leves, como o benzeno, para a molécula do SAF mediante a presença de catalisadores.[8-9,48-49]

A inclusão de aromáticos confere ao SAF do processo SPK/A propriedades químicas essenciais para a operação da aeronave, visando auxiliar na prevenção de vazamentos e na proteção de componentes de borracha que vedam os motores do avião, mantendo a pressão hidráulica ideal dos sistemas vinculados ao combustível da aeronave. Os aromáticos funcionam como moléculas reativas capazes de interagir com os elastômeros (materiais de borracha), promovendo a expansão dos anéis de vedação.[8-9,48-51]

Atualmente, essa tecnologia está em fase de testes sob escala piloto e possui nível 5 de prontidão tecnológica; entretanto, devido à presença de aromáticos em sua composição, o SPK/A é considerado um biocombustível 100% *drop-in*, ou seja, é idêntico ao JET A e possui compatibilidade com toda a frota de aeronaves e a infraestrutura de abastecimento existente.[8-9,48-49]

Processo	Nome em inglês	Nome em português
IV – SPK-ATJ	*Synthetic Paraffinic Kerosene Alcohol-to-Jet*	Querosene Parafínico Sintético Álcool-para-Aviação

O processo de produção do SPK-ATJ envolve a transformação de bioálcoois de cadeia curta, como metanol e etanol, em hidrocarbonetos de cadeia longa, como o SAF. Nessa tecnologia, existem duas principais formas de obtenção desses álcoois: a primeira, mediante a fermentação de açúcares e amidos presentes em cana-de-açúcar, cereais, mandioca, beterraba e milho, utilizando a ação de microrganismos; e a segunda, por intermédio do processo de gaseificação de biomassa lignocelulósica.[8-9,48-49,52]

[am] São compostos químicos que possuem a cadeia carbônica fechada e estrutura molecular com anel benzênico (hexágono formado por átomos de carbono, com ligações duplas alternadas com ligações simples).

Após a obtenção dos álcoois, duas rotas de conversão podem ser empregadas, uma com metanol e outra com etanol. No caso do metanol (CH_3OH), reatores com catalisadores à base de alumínio, silício e oxigênio operados em altas temperaturas são utilizados para transformar sua molécula em compostos como metano (CH_4), parafinas leves (C_2 – C_4), olefinas (C_2 – C_4) e gasolina (C_5 – C_{11}), em um processo chamado metanol-para-olefinas (MTO). Em seguida, esses compostos produzidos são fracionados e refinados para obter combustível renovável de aviação (C_8 – C_{16}), diesel verde (C_{14+}) e outros subprodutos, como gasolina verde e gases leves.[8-9,48-49,52]

Quando o etanol (C_2H_5OH) é utilizado, outros processos são empregados para a produção de SPK-ATJ. Nesse caso, o álcool passa por desidratação para remover as moléculas de água, em temperatura que varia de 288 °C a 343 °C. O líquido resultante é então direcionado para reatores, onde moléculas menores são combinadas para formar hidrocarbonetos de cadeia mais longa. Por fim, esses hidrocarbonetos passam por um procedimento na presença de hidrogênio e catalisadores (geralmente à base de platina) para remover ligações duplas indesejadas no composto e produzir querosene parafínico.[8-9,48-49,52]

Esse método SPK-ATJ foi consolidado como uma rota autorizada pela ASTM em 2018, permitindo misturas de até 50,0% com querosene de origem fóssil. Sua maturidade tecnológica já alcança o nível 7 da escala TRL, uma vez que sua produção já foi demonstrada em ambiente de testes, possuindo, inclusive, plantas de produção planejadas ou em fase de implementação. O SAF advindo dessa rota é considerado um biocombustível semelhante, mas não idêntico ao querosene de aviação tradicional. A depender do tipo da matéria-prima utilizada em suas rotas (metanol ou etanol), ele pode ser classificado como biocombustível não semelhante ao querosene, limitando a sua compatibilidade para misturas inferiores ao teor de 50% e impossibilitando o aproveitamento de toda a infraestrutura existente de abastecimento.[8-9,48-49,52]

Processo	Nome em inglês	Nome em português
V – SIP	*Synthetic Iso-Paraffins*	Isoparafinas Sintéticas

A rota bioquímica SIP, aprovada pela ASTM em 2014 como uma das alternativas para produção de SAF, também ocorre mediante a fermentação de açúcares. Nesse processo, após o pré-tratamento e a

hidrólise[an] da matéria-prima, são introduzidos microrganismos geneticamente modificados capazes de transformar os açúcares, por meio de fermentação, em uma molécula de hidrocarboneto chamada farneseno ($C_{15}H_{24}$). Após esta etapa, o composto passa por hidrotratamento e fracionamento, quando moléculas de hidrogênio são adicionadas à sua estrutura química, resultando no farnesano ($C_{15}H_{32}$), o qual pode ser misturado com o querosene fóssil na proporção máxima de 10,0%.[8-9,48-49]

Esse processo, empregado por poucas refinarias, utiliza a fermentação do caldo da cana-de-açúcar, rico em açúcares, junto a cepas específicas do fungo *Saccharomyces cerevisiae* (PE-2), a fim de obter o farnesano. Seu nível de prontidão tecnológica está entre 5 com protótipos validados e 7 com demonstrações de produção ainda em escala reduzida. É importante destacar que o combustível final possui propriedades físico-químicas distintas em comparação ao querosene de aviação e, por isso, sua aplicabilidade é limitada e não deve ser considerado semelhante ao JET A/A-1.[8-9,48-49]

Processo	Nome em inglês	Nome em português
VI – CHJ	*Catalytic Hydrothermolysis to Jet Fuel*	Querosene de hidrotermólise catalítica

Outro caminho para converter triglicerídeos em querosene é mediante o processo CHJ, também conhecido como liquefação hidrotérmica. Esse processo ocorre em temperaturas moderadas, entre 250 °C e 380 °C, e sob altas pressões, na presença de água. Inicialmente, o material lipídico passa por um pré-condicionamento, que envolve etapas de reações químicas para modificar sua estrutura molecular e aumentar a eficiência do processo térmico. Em seguida, ocorre a hidrólise catalítica, na qual os óleos reagem com água em condições supercríticas de temperatura e pressão, utilizando catalisadores à base de metais como a platina, suportados em meio a materiais como alumina ou zeólitas, para transformá-los em uma mistura de hidrocarbonetos.[8-9,48-49]

Esses hidrocarbonetos, então, passam por uma série de reações com hidrogênio para refino. Após o refinamento, obtém-se o SAF, além de subprodutos como o diesel e gasolina verdes. O resultado é rico em compostos aromáticos, que, conforme citado anteriormente, é uma característica essencial para os combustíveis de aviação, contribuindo com a segurança da operação aérea.[8-9,48-49]

[an] Processo químico que fraciona as moléculas das substâncias mediante ação da água.

Dessa forma, a rota CHJ, aprovada mais recentemente, em 2020, pela ASTM, produz um JET alternativo considerado análogo ao querosene fóssil, permitindo misturas de até, no máximo, 50,0% com o combustível tradicional. Atualmente, essa rota encontra-se no nível 6 de prontidão tecnológica, com testes sendo escalonados para ambientes que simulam operações reais de produção. Um dos seus pontos positivos é o menor consumo de hidrogênio em comparação com outros processos, como o HEFA.[8-9,48-49]

Processo	Sigla em inglês	Sigla em português
VII – SPK-HC-HEFA	*Synthetic Paraffinic Kerosene Bio-Derived Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids*	Querosene Parafínico Sintético Hidrocarbonetos bioderivados, Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados

A tecnologia SPK-HC-HEFA segue os mesmos procedimentos aplicados na SPK-HEFA, mas necessita da adição de hidrocarbonetos bioderivados durante o processo de hidroprocessamento. Atualmente, a ASTM reconhece, nessa classificação, apenas o óleo extraído da microalga verde *Botryococcus braunii*, encontrada em água doce e salobra em diversas partes do mundo. Essa microalga possui capacidade de acumular hidrocarbonetos de cadeia longa e lipídios em sua estrutura celular, o que a torna uma matéria-prima viável para a produção de biocombustíveis.[8-9,48-49,53]

Após a extração do óleo, as demais etapas do processo são semelhantes às da SPK-HEFA, em que os triglicerídeos são pré-tratados e refinados, resultando em SAF, diesel e nafta verdes. Em 2020, a ASTM autorizou a mistura desse biocombustível em proporções de até 10,0% com o querosene fóssil, pois não é considerado um JET alternativo idêntico ao querosene. Atualmente, o seu nível de prontidão tecnológica é de, apenas, 5, visto que ainda está em fase de validação mediante protótipos, com testes sendo realizados em escala piloto de produção.[8-9,48-49,53]

REFERÊNCIAS

[1] PETROBRAS. **BioQAV: veja como investimos em tecnologia rumo ao futuro dos combustíveis sustentáveis.** Transição Energética. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2025. Acesso em: 27 mar. 2025. Link de acesso: nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/bioqav-veja-como-investimos-em-tecnologia-rumo-ao-futuro-dos-combustiveis-sustentaveis

[2] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Introduction to the ICAO Basket of Measures to Mitigate Climate Change**. Canadá: ICAO, 2019. Acesso em: 26 fev. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg111-115.pdf

[3] MCTI. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília: MCTI, 2021. Acesso em: 18 fev. 2025. Link de acesso: repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4782

[4] MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **BRAZIL'S NDC – National determination to contribute and transform**. Brasília: MMA, 2024. Acesso em: 18 fev. 2025. Link de acesso: gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/brazils-ndc.pdf

[5] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Sustainable Aviation Fuels Guide**. Canadá: ICAO, 2018. Acesso em: 18 fev. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf

[6] ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021** – DOU de 25.10.2021. Brasília: ANP, 2021. Acesso em: 27 fev. 2025. Link de acesso: atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021

[7] ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biocombustíveis de aviação.** Brasília: ANP, 2023. Acesso em: 06 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis-de-aviacao

[8] EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil – Perspectivas Futuras**. Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Acesso em: 06 mar. 2025. Link de acesso: epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras

[9] KRAMER, S. *et al.* Perspectives on fully synthesized sustainable aviation fuels: direction and opportunities. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, p. 782823, 2022. Acesso em: 06 mar. 2025. Link de acesso: doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823

[10] IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Disappointingly Slow Growth in SAF Production**. Canadá: IATA, 2024. Acesso em: 12 mar. 2025. Link de acesso: iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03

[11] ATAG. AIR TRANSPORT ACTION GROUP. **Aviation Benefits Beyond Borders - Sustainable aviation fuel**. Suíça: ATAG, 2025. Acesso em: 12 mar. 2025. Link de acesso: aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel

[12] IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023 - Analysis and forecast to 2028**. Paris: IEA, 2023. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

[13] IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Greenhouse Gas Emissions from Energy**. Paris: IEA, 2024. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy

[14] ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **CORSIA**. Brasília: ANAC, 2019. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia

[15] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CORSIA – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation: Implementation Plan**. Canadá: ICAO, 2023. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-communication.aspx

[16] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CORSIA Eligible Fuels**. Canadá: ICAO, 2023. Acesso em: 13 mar. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx

[17] IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **CORSIA – Fact sheet**. Canadá: IATA, 2024. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia

[18] ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Resolução nº 496, de 28 de novembro de 2018**. Brasília: ANAC, 2018. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2018/resolucao-no-496-28-11-2018

[19] ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Portaria nº 4.005, de 26 de dezembro de 2018**. Brasília: ANAC, 2018. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/portarias/2018/portaria-no-4005-asint-26-12-2018/@@display-file/arquivo_norma/PA2018-4005%20-%20Compilado%20at%C3%A9%20PA2019-1018.pdf

[20] BRASIL. **Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021**. Brasília: Diário Oficial da União, 2021. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.248-de-25-de-novembro-de-2021-362681641

[21] BRASIL. **Lei nº 14.993, de 08 de outubro de 2024**. Brasília: Diário Oficial da União, 2024. Acesso em: 14 mar. 2025. Link de acesso: planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm

[22] NESTE. **Product Data Sheet – Neste MY Sustainable Aviation Fuel™**. Finlândia: NESTE, 2021. Acesso em: 18 mar. 2025. Link de acesso: neste.com/files/pdf/6v1bbJbh2Q0qSaputzkCQE-productdatasheet_neste_my_saf.pdf

[23] ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painéis dinâmicos de produtores de combustíveis e derivados**. Brasília: ANP, 2025. Acesso em: 20 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados

[24] TRUSTED SOLUTIONS FOR A NEW WORLD. **Disponibilidade de matéria-prima para combustível de aviação no Brasil**. Desafios e oportunidades - Relatório 2021. Suíça: RSB, 2021. Acesso em: 24 mar. 2025. Link de acesso: boeing.com.br/content/dam/boeing/po_br/sustentabilidade/combustiveis/RSB-jetfuel-saf-factsheets_portuguese.pdf

[25] ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis**. Brasília: ANP, 2025. Acesso em: 24 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-biocombustiveis

[26] ARGUS MEDIA. **SAF Capacity Map**. Londres: ARGUS MEDIA, 2025. Acesso em: 26 mar. 2025. Link de acesso: view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/PRO-Map-Argus-SAF-Capacity-Map-2025.pdf

[27] DOE. THE UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Alternative Fuels Data Center – Clean Fuel Production Credit.** Washington: USA, 2025. Acesso em: 26 mar. 2025. Link de acesso: afdc.energy.gov/laws/13321

[28] CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Iniciativa ReFuelEU Aviação: Conselho adota nova lei para descarbonizar o setor da aviação (2023)**. Acesso em: 26 mar. 2025. Link de acesso: consilium.europa.eu/pt/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector

[29] ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Painel de Demanda e Oferta**. Brasília: ANAC, 2024. Acesso em: 29 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/demanda-e-oferta

[30] UNICA DATA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Observatório da cana e bioenergia**. São Paulo, ÚNICA DATA, 2024. Acesso em: 29 mar. 2025. Link de acesso: unicadata.com.br

[31] SEMIL. SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **SP terá 1ª planta industrial de combustível 'verde' de aviação a partir de resíduos do Brasil** (2024). Acesso em: 29 mar. 2025. Link de acesso: semil.sp.gov.br/2024/10/sao-paulo-tera-primeira-planta-industrial-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao-saf-a-partir-de-residuos-do-brasil

[32] AGÊNCIA GOV. **Edital para produção de combustível de aviação sustentável recebeu R$ 167 bilhões em propostas** (2024). Acesso em: 29 mar. 2025. Link de acesso: agenciagov.ebc.com.br/noticias/202411/edital-do-bndes-e-da-finep-para-producao-do-saf-recebeu-r-167-bi-em-propostas

[33] EMBRAER. **Embraer e Pratt & Whitney completam teste de voo 100% SAF com motor GTF em um jato E195-E2** (2022). Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: embraer.com/br/pt/noticias/?slug=1207055-embraer-e-pratt-whitney-completam-teste-de-voo-100-saf-com-motor-gtf-em-um-jato-e195-e2

[34] KLM. ROYAL DUTCH AIRLINES. **Tipos de aeronaves** (2025). Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: klm.com.br/information/travel-class-extra-options/aircraft-types

[35] AIRBUS. **Airbus A330MRTT completes first 100% SAF test flight on both** (2022). Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-11/en_press_release_airbus_a330mrtt_flight_with_100_saf_.pdf

[36] AIRBUS. **Airbus A330 MRTT performs landmark air-to-air sustainable aviation refuelling mission** (2023). Acesso em: 31 mar. 2025. Link de acesso: airbus.com/en/newsroom/stories/2023-05-airbus-a330-mrtt-performs-landmark-air-to-air-sustainable-aviation

[37] GLOBO. **Campinas e região - Azul faz voo experimental usando combustível à base de cana** (2012). Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2012/06/azul-faz-voo-experimental-usando-combustivel-base-de-cana-de-acucar.html

[38] LATAM AIRLINES BRASIL. **LATAM recebe no Brasil primeira aeronave abastecida com Combustível Sustentável de Aviação (SAF)** (2023). Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: latamairlines.com/br/pt/imprensa/noticias/latam-recebe-no-brasil-primeira-aeronave-abastecida-com-combustivel-sustentavel-de-aviacao

[39] LATAM AIRLINES BRASIL. **LATAM recebe no Brasil seu primeiro A321neo e anuncia compra adicional de mais 13 aviões do modelo** (2023). Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: latamairlines.com/br/pt/imprensa/noticias/latam-recebe-primeiro-a321neo-no-brasil

[40] EMBRAER. **Phenom 300E e Praetor 600 da Embraer completam testes de voo utilizando combustível de aviação 100% sustentável** (2023). Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: embraer.com/br/pt/noticias?slug=1207281-phenom-300e-e-praetor-600-da-embraer-completam-testes-de-voo-utilizando-combustivel-de-aviacao-100-sustentavel

[41] AIRBUS. **World's first in-flight study of commercial aircraft using 100% sustainable aviation fuel show significant non-CO2 emission reductions** (2024). Acesso em: 01 abr. 2025. Link de acesso: airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-06-worlds-first-in-flight-study-of-commercial-aircraft-using-100

[42] WORLD ENERGY. **Book the Fuel, Claim the Benefits** (2025). Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: worldenergy.net/our-approach/book-claim/

[43] DHL. **Book and claim explained**. Alemanha: DHL, 2025. Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: dhl.com/global-en/delivered/responsibility/book-and-claim-explained.html

[44] VIBRA. **GOL, com apoio da Vibra, lança iniciativa para compensação pioneira de SAF no Brasil** (2024). Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: vibraenergia.com.br/sites/default/files/2024-06/gol-com-apoio-da-vibra-lan%C3%A7a-iniciativa-para-conpensacao-pioneira-de-saf-no-brasil.pdf

[45] A&M INFRA. **Mercado de SAF no Brasil: Desafios e oportunidades**. São Paulo: A&M INFRA, 2025. Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: tinyurl.com/mr2vwe2j

[46] THE WALL STREET JOURNAL. **Sustainable Aviation Fuel Leader Talks Green Premiums and Impact of Tax Incentives** (2023). Acesso em: 02 abr. 2025. Link de acesso: wsj.com/articles/sustainable-aviation-fuel-leader-talks-green-premiums-and-impact-of-tax-incentives-22f77d81

[47] YANG, F.; YAO, Y. Sustainable aviation fuel pathways: Emissions, costs and uncertainty. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 215, p. 108124, 2025. Acesso em: 03 abr. 2025. Link de acesso: sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925000035

[48] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CORSIA Supporting Document: Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology**. Canadá: ICAO, 2022. Acesso em: 07 mar. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/CORSIA_Supporting_Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA_Methodology_V5.pdf

[49] MCTI. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação**. ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos - Cooperação Técnica Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: MCTI, 2022. Acesso em: 10 mar. 2025. Link de acesso: gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf

[50] ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Project - Power-to-Liquid (PtL) for Aviation**. Canadá: ICAO, 2025. Acesso em: 29 mar. 2025. Link de acesso: icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Project.aspx?ProjectID=46

[51] GREENAIR. **Sustainable aviation fuels are not all the same and regular commercial use of 100% SAF is more complex** (2022). Acesso em: 10 mar. 2025. Link de acesso: greenairnews.com/?p=2460

[52] DE JESUS SOUZA, G. *et al*. Perspectivas da rota SPK-ATJ para produção de bioquerosene de aviação: uma análise do potencial brasileiro e maranhense. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 2, p. e9039-e9039, 2025. Acesso em: 11 mar. 2025. Link de acesso: ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/9039

[53] MORAIS JUNIOR, W. G. *et al*. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. **Aquaculture**, v. 528, p. 735562, 2020. Acesso em: 11 mar. 2025. Link de acesso: sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848620302246

Combustível Sustentável de Aviação

Uma das soluções para a transição energética do setor aéreo

CNT | Confederação Nacional do Transporte