



Desenvolvimento do Cluster Produtivo Inovador de
Combustível Sustentável de Aviação (SAF) em Goiás
definindo uma linha de ação prioritária para posicionar o
estado na vanguarda da produção de biocombustíveis
voltados ao setor aeronáutico

-

Edital UNES 2366/2025

-

Análise de rotas tecnológicas

Elaborado por



ESSENZ
Soluções

Junho 2026



O presente documento corresponde ao Produto 2 - Análise de rotas tecnológicas, elaborado em conformidade com o Edital UNES nº 2366/2025.

O referido produto foi entregue em 15 de junho de 2026, por meio de envio eletrônico via e-mail, atendendo às condições e aos prazos estabelecidos no âmbito do referido Edital.

Sumário

Apresentação	7
1. Introdução.....	9
2. Rotas e Insumos Para a Produção de SAF.....	11
2.1 Rotas Baseadas em Óleos, Gorduras e Resíduos Oleosos (Matérias-Primas Lipídicas).....	13
2.1.1 HEFA-SPK	14
2.1.2 HC-HEFA-SPK	17
2.1.3 CHJ	18
2.2 Rotas Álcool-para-jet.....	20
2.2.1 ATJ-SPK.....	20
2.2.2 ATJ-SKA.....	22
2.2.3 MTJ-SPK.....	24
2.3 Rotas Termoquímicas Via Síntese Fischer-Tropsch.....	25
2.3.1 FT-SPK - <i>Biomass-to-Liquid</i> (BtL).....	26
2.3.2 FT-SPK - <i>Power-to-Liquid</i> (PtL) ou e-SAF	28
2.3.3 FT-SPK - <i>Gas-to-Liquid</i> (GtL)	31
2.3.4 FT-SPK/A	33
2.4 Rotas de Coprocessamento em Refinaria Convencional.....	33
2.4.1 Coprocessamento de Ésteres e Ácidos Graxos.....	34
2.4.2 Coprocessamento de Hidrocarbonetos Fischer-Tropsch	35
2.4.3 Coprocessamento de HEFA	36
2.5 Rotas Bioquímicas Via Açúcares (SIP).....	37
2.6 Resumo e Pontos de Destaque.....	38
3. Avaliação do Impacto Ambiental.....	45
3.1 Metodologia para a Avaliação de Impactos Ambientais.....	47
3.2 Impactos Ambientais da Produção de SAF	49
3.3.1 Triglicerídeos (oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais).....	49



3.3.2	Etanol e Isobutanol de Biomassa	50
3.1.1	Biomassa Lignocelulósica	52
3.1.2	Hidrogênio	52
3.1.3	Fonte de CO ₂	54
3.1.4	Outras Fontes.....	55
3.2	Comparação de Impactos Ambientais	55
4.	Estudo Comparativo entre as Rotas HEFA e ATJ Para Produção de SAF.....	63
5.	Levantamento de Patentes	67
5.1	Metodologia e Bases Utilizadas.....	67
5.2	Contexto Internacional dos Pedidos de Patente Relacionados a SAF	68
5.3	Contexto Nacional dos Pedidos de Patente Relacionados a SAF	74
5.4	O contexto de Patentes no Estado de Goiás	80
6.	Conclusão.....	83
	Referências	84

Figuras

Figura 1 - Rotas aprovadas ASTM.....	12
Figura 2 - Fluxograma simplificado da rota HEFA-SPK.....	15
Figura 3 - Fluxograma simplificado da rota HC-HEFA-SPK	17
Figura 4 - Fluxograma simplificado da rota CHJ	19
Figura 5 - Fluxograma simplificado da rota ATJ-SPK.....	21
Figura 6 - Fluxograma simplificado da rota ATJ-SKA.....	23
Figura 7 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch para produção de querosene paraafínico hidroprocessado (FT-SPK) e querosene sintético com aromáticos (FT-SPK/A)	27
Figura 8 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch com e-SAF	28
Figura 8 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch com biogás/biometano como matéria-prima para SAF	32
Figura 9 - Fluxograma simplificado do coprocessamento de correntes renováveis em refinaria convencional para produção de combustíveis de aviação.....	34
Figura 10 - Fluxograma simplificado da rota SIP.....	37
Figura 11 - Produção de SAF no mundo por via de fabricação, 2020-2050	44
Figura 12 - Evolução anual das invenções depositadas no mundo relacionadas a SAF	69
Figura 13 - Principais países de origem das invenções sobre SAF	70
Figura 14 - Principais depósitos de patentes	71
Figura 15 - Principais depositantes globais de patentes de SAF.....	72
Figura 16 - Áreas tecnológicas das invenções associadas ao SAF.....	73
Figura 17 - Distribuição das invenções por tipos de biomassa.....	74
Figura 18 - Evolução dos pedidos de patente depositados no Brasil e das famílias de pedidos no mundo	75
Figura 19 - País de origem dos depositantes dos pedidos de patente relacionados a SAF depositados no Brasil.....	76
Figura 20 - Principais depositantes de pedidos de patente relacionados a SAF no Brasil	77
Figura 21 - Áreas tecnológicas das invenções associadas aos SAF depositadas no Brasil	78
Figura 22 - Tipos de biomassa relacionados às invenções de SAF depositadas no Brasil	79

Tabelas

Tabela 1 - Rotas de SAF certificadas e organizadas em cinco grupos tecnológicos ...	39
Tabela 2 - Impactos ambientais e vantagens dos SAFs por categoria e rota de produção.	56
Tabela 3 - Comparação da performance ambiental das rotas HEFA e ATJ	59
Tabela 4 - Rotas Tecnológicas oportunidades e desafios	66

Apresentação

O presente relatório “Análise de mercado SAF e rotas tecnológicas”, elaborado pela Essenz Soluções, é um entregável do Projeto “Desenvolvimento do Cluster Produtivo Inovador de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) em Goiás definindo uma linha de ação prioritária para posicionar o estado na vanguarda da produção de biocombustíveis voltados ao setor aeronáutico”, no âmbito do Edital UNES 2366/2025.

O projeto tem como objetivo estruturar uma estratégia integrada para posicionar o estado de Goiás como referência nacional e potencial líder na produção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF, na sigla em inglês *Sustainable Aviation Fuel*), contribuindo para a descarbonização do setor da aviação, um dos mais desafiadores da transição energética, e para o desenvolvimento regional.

Em um contexto global, no qual o setor energético responde por cerca de 75% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (CLIMATEWATCHDATA, 2025, IEA, 2025) e a aviação representa aproximadamente 2,5% das emissões globais de CO₂¹ (OUR WORLD IN DATA, 2024), o SAF surge como uma importante solução por sua capacidade de reduzir significativamente emissões sem necessidade de mudanças na infraestrutura existente (solução *drop-in*).

Goiás apresenta vantagens competitivas relevantes para o desenvolvimento desta indústria. Apoiado por sua forte base agroindustrial, com elevada produção de cana-de-açúcar e etanol, além de milho e da disponibilidade de resíduos de diferentes matérias-primas e coprodutos agrícolas e agroindustriais, incluindo de resíduos da cana-de-açúcar e do milho, sebo bovino e outras biomassas com potencial energético. Além das vantagens próprias, a proximidade do estado com o Distrito Federal amplia o mercado relevante de SAF que pode ser atendido com maior competitividade. Esses fatores, combinados com a presença de infraestrutura logística relevante, ainda que sujeita a gargalos e necessidades de aprimoramento, e um ambiente favorável à inovação, criam condições propícias para a formação de um hub de SAF no estado. O projeto busca, portanto, avaliar de forma abrangente as condições técnicas, econômicas, ambientais e regulatórias necessárias para viabilizar esse *cluster*, com foco especial nas rotas tecnológicas mais promissoras.

A metodologia do projeto está estruturada de forma integrada, combinando análises técnicas, econômicas, regulatórias e territoriais para avaliar o potencial de desenvolvimento do SAF em Goiás. O estudo envolve o levantamento e análise de

¹Cerca de 12% das emissões relacionadas ao setor de transportes.

dados secundários, a realização de consultas com *stakeholders* estratégicos, a avaliação de mercado e das principais rotas tecnológicas, bem como o mapeamento de matérias-primas, infraestrutura e impactos associados. Adicionalmente, contempla o desenvolvimento de modelos analíticos e econômico-financeiros, aliados a ações de capacitação e disseminação do conhecimento, com o objetivo de subsidiar a tomada de decisão e apoiar a implementação de um *cluster* produtivo de SAF no estado.

Como resultado, espera-se fornecer subsídios para a estruturação de um ecossistema indutor de investimentos em SAF no estado de Goiás, contribuindo para a formulação de políticas públicas e decisões de investimento. O projeto também busca fortalecer capacidades locais, estimular inovação e criar condições para inserção competitiva de Goiás no mercado de combustíveis sustentáveis de aviação, alinhando-se às tendências internacionais de descarbonização e às metas climáticas de longo prazo.

Este relatório inclui levantamento de patentes e avaliação das rotas tecnológicas de produção de SAF. Também contempla uma comparação entre as rotas HEFA e SAF-ATJ, considerando eficiência produtiva, viabilidade econômica, impactos ambientais, aspectos regulatórios, riscos e potencial de geração de empregos.

1. Introdução

A consolidação do SAF como alternativa de baixo carbono depende de um conjunto diverso de rotas tecnológicas, matérias-primas, processos industriais e requisitos regulatórios. Diferentemente de outros segmentos da transição energética, nos quais uma tecnologia pode se tornar dominante de forma mais evidente, a produção de SAF tende a exigir uma estratégia de neutralidade tecnológica, combinando rotas com diferentes graus de maturidade, custos, disponibilidade de insumos, desempenho ambiental e potencial de escalabilidade.

Essa diversidade decorre tanto da complexidade técnica do combustível de aviação quanto da necessidade de produzir combustíveis avançados capazes de atender a requisitos rigorosos de segurança, estabilidade térmica, ponto de congelamento, densidade energética e compatibilidade operacional.

No arcabouço técnico-regulatório atual, as rotas de produção de SAF são qualificadas principalmente pelas especificações da ASTM International e incorporadas à regulação brasileira por meio das resoluções da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Essas rotas incluem alternativas baseadas no hidrocessamento de óleos, gorduras e resíduos oleosos, rotas álcool-para-jet, rotas termoquímicas via síntese Fischer-Tropsch, a partir de biomassa e via Power-to-Liquid, rotas de coprocessamento em refinarias convencionais e rotas bioquímicas via açúcares. Cada uma dessas alternativas apresenta oportunidades e restrições específicas, tanto em relação à disponibilidade de matérias-primas quanto à maturidade tecnológica, custo de produção, limites de mistura e potencial de redução de emissões.

O Brasil possui vantagens relevantes para se inserir nesse mercado, especialmente pela experiência acumulada na produção de biocombustíveis, pela disponibilidade de biomassa e resíduos agroindustriais, pela presença de cadeias consolidadas de etanol, óleos vegetais e gorduras animais, e pela matriz elétrica com elevada participação renovável. No caso de Goiás, essas vantagens são reforçadas por uma base agroindustrial forte, associada à produção de cana-de-açúcar, etanol, soja, milho, sebo bovino e resíduos agrícolas e agroindustriais. Essas condições conferem ao estado potencial para avaliar rotas como HEFA e ATJ no curto e médio prazo.

A avaliação das rotas tecnológicas, entretanto, não pode se restringir à viabilidade técnica ou ao potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa. Embora o principal benefício climático do SAF esteja associado à redução das emissões ao longo do ciclo de vida, a sustentabilidade dessas rotas depende também de outras dimensões ambientais, como uso da terra, biodiversidade, consumo hídrico, eutrofização,

acidificação, material particulado e consumo de energia. Ainda assim, a incorporação de categorias ambientais além do carbono permanece um desafio metodológico e regulatório, exigindo maior disponibilidade de dados, harmonização de critérios e estudos adaptados às condições brasileiras e regionais.

Além dos aspectos técnicos e ambientais, a análise tecnológica do SAF também envolve a compreensão das tendências de inovação e propriedade intelectual. O levantamento de patentes permite identificar rotas em desenvolvimento, principais depositantes, países líderes, mercados de proteção tecnológica e oportunidades para inserção nacional e regional.

Diante desse contexto, este relatório tem como objetivo analisar as principais rotas tecnológicas de produção de SAF, seus insumos, níveis de maturidade, limites regulatórios, custos de referência, impactos ambientais e tendências de inovação.

A seção 2 apresenta as rotas e matérias-primas para produção de SAF, organizadas por grupos tecnológicos. A seção 3 discute os impactos ambientais associados às diferentes matérias-primas e processos, com ênfase na abordagem de ciclo de vida e na comparação entre categorias de impacto. A seção 4 realiza um estudo comparativo entre as rotas HEFA e ATJ, considerando aspectos produtivos, econômicos, ambientais e estratégicos. A seção 5 apresenta o levantamento de patentes no contexto internacional, nacional e estadual, com foco nas tecnologias relacionadas ao SAF e nas oportunidades para Goiás. Por fim, a seção 6 reúne as conclusões e recomendações estratégicas do estudo, buscando subsidiar a tomada de decisão e apoiar a estruturação de um cluster produtivo inovador de SAF no estado.

2. Rotas e Insumos Para a Produção de SAF

O combustível de referência para a aviação comercial é o querosene de aviação, predominantemente nas especificações Jet A e Jet A-1². Esse combustível é formado por uma mistura de hidrocarbonetos com propriedades físico-químicas rigorosamente controladas, como densidade energética, estabilidade térmica, ponto de congelamento, ponto de fulgor e compatibilidade com os sistemas de combustível das aeronaves³ (WAHEED et al., 2026; KHALID et al., 2026).

Para ser utilizado como combustível *drop-in*, o SAF precisa atender a esses mesmos requisitos de desempenho e segurança operacional, respeitando os limites de mistura definidos pelas especificações técnicas aplicáveis. A avaliação das rotas tecnológicas parte da capacidade de cada processo gerar um componente sintético compatível com o querosene de aviação. Essa avaliação envolve a composição do produto final, seu enquadramento regulatório, a disponibilidade e o custo das matérias-primas e o estágio de maturidade técnica e comercial de cada alternativa (EPE, 2024; IATA, 2025; ICAO, 2026).

Essa exigência técnica ajuda a explicar por que cada rota de SAF precisa ser avaliada separadamente. O arcabouço técnico-regulatório atual, está estruturado pelas especificações da norma internacional ASTM⁴ e pelas resoluções da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)⁵. Basicamente, existem duas categorias estruturais: instalações baseadas em rotas tecnológicas dedicadas, projetadas especificamente para a síntese biológica ou termoquímica, e as rotas de coprocessamento, caracterizadas pela inserção de correntes renováveis na infraestrutura de refinarias preexistentes (ANP, 2024; EPE, 2024). Atualmente, 11 rotas tecnológicas são aprovadas pela ASTM para produção de SAF (a ANP já inclui todas as rotas aprovadas), com distintos níveis de maturidade e proporção de mistura (Figura 1).

² Maior detalhamento é encontrado no Produto 1 - Análise das Perspectivas do Mercado de SAF e de suas Condições Regulatórias deste projeto

³ A mistura de SAF ao QAV fóssil precisa preservar requisitos de segurança e desempenho do combustível, incluindo comportamento em baixas temperaturas, estabilidade térmica e compatibilidade com materiais do sistema de combustível. Essa compatibilidade é especialmente relevante para rotas com baixo teor de aromáticos (EPE, 2024)

⁴ ASTM International (originalmente American Society for Testing and Materials) é uma organização internacional de normalização que desenvolve e publica normas técnicas voluntárias para materiais, produtos, sistemas e serviços. Suas normas são amplamente utilizadas em âmbito global para estabelecer critérios de qualidade, desempenho, segurança e métodos de ensaio, inclusive em setores como combustíveis, aviação, energia e indústria química. No caso do SAF, as normas ASTM definem especificações técnicas e procedimentos de certificação que viabilizam o uso seguro do combustível na aviação.

⁵ No âmbito infralegal brasileiro, a regulamentação do SAF pela ANP se apoia na Resolução ANP nº 856/2021, que estabelece as especificações dos querosenes de aviação e dos querosenes alternativos. A Resolução ANP nº 987/2025, disciplina a autorização para a produção de biocombustíveis, incluindo instalações produtoras de querosene de aviação alternativo oriundo de biomassa. A Resolução ANP nº 997/2026 (revisa a Resolução nº 856/2021) para atualizar parâmetros técnicos e adequar o regulamento à evolução das rotas e práticas aplicáveis aos combustíveis sustentáveis de aviação.

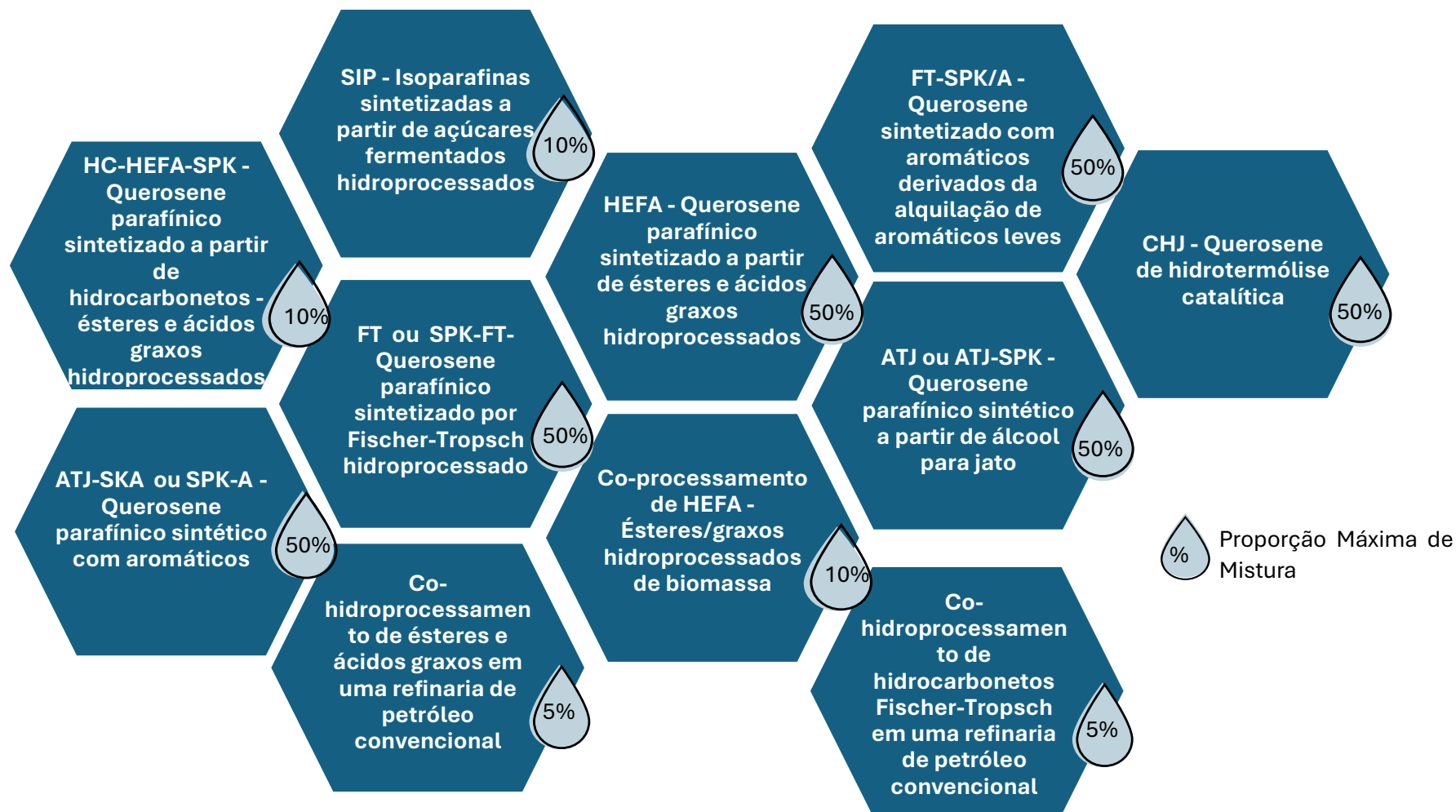


Figura 1 – Rotas aprovadas ASTM

Fonte: elaboração própria baseada em dados da ICAO (2026a)

Os processos de conversão aprovados foram organizados neste relatório em cinco grupos tecnológicos: rotas de hidrocessamento de matérias-primas lipídicas, rotas termoquímicas via síntese Fischer-Tropsch, rotas bioquímicas via açúcares, rotas álcool-para-jet e rotas de coprocessamento em refinaria convencional. O detalhamento de cada grupo tecnológico é apresentado na sequência.

- Rotas de hidrocessamento de matérias-primas lipídicas: HEFA-SPK, HC-HEFA-SPK e CHJ
- Rotas álcool-para-jet: ATJ-SPK, ATJ-SKA
- Rotas termoquímicas via síntese Fischer-Tropsch: FT-SPK (incluindo e-SAF), FT-SPK/A
- Rotas de coprocessamento em refinaria convencional: Coprocessamento com óleos/gorduras, Coprocessamento com hidrocarbonetos produzidos via FT, Coprocessamento de HEFA
- Rotas bioquímicas via açúcares: SIP

2.1 Rotas Baseadas em Óleos, Gorduras e Resíduos Oleosos (Matérias-Primas Lipídicas)

Rotas desse tipo consistem na conversão de triglicerídeos presentes em óleos vegetais, gorduras animais, óleos residuais ou microalgas em cadeias de hidrocarbonetos renováveis⁶. A conversão gira em torno do hidrocessamento⁷, etapa catalítica que utiliza hidrogênio para remover oxigênio e insaturações das moléculas. Esse processo aumenta a densidade energética e a estabilidade térmica do material e pode ser complementado por etapas de ajuste molecular⁸, de forma a atender às especificações exigidas para o querosene de aviação (EPE, 2024).

Do ponto de vista comercial, as rotas lipídicas não apresentam o mesmo grau de maturidade. Essa variação ocorre por diferentes motivos, com destaque para escolha da matéria-prima, do arranjo tecnológico de cada processo, da disponibilidade de fornecedores e do histórico de operação em escala industrial. Por isso, embora

⁶ Hidrocarbonetos renováveis são compostos formados por cadeias de carbono e hidrogênio obtidos a partir de matérias-primas de origem biológica, com propriedades compatíveis com combustíveis fósseis equivalentes.

⁷ O hidrocessamento compreende reações catalíticas voltadas à remoção de oxigênio e à adequação da composição do produto final às exigências do combustível de aviação.

⁸ No caso do SAF, essas etapas tendem a ser mais exigentes do que na produção de HEFA voltada a combustíveis marítimos ou diesel renovável, pois o querosene de aviação deve atender a especificações mais restritas de ponto de congelamento, volatilidade, estabilidade térmica, densidade e faixa de destilação. Por isso, além da remoção de oxigênio, podem ser necessárias etapas adicionais de isomerização, hidrocrackeamento e fracionamento para ajustar o comprimento e a ramificação das cadeias carbônicas à faixa do querosene de aviação (NREL, 2024)

pertencam ao mesmo grupo tecnológico, cada uma possui suas especificidades (EPE, 2024; NREL, 2024).

Óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais já possuem usos concorrentes em mercados como biodiesel, diesel renovável, alimentação animal, indústria química e outros segmentos energéticos, o que pode limitar a oferta efetivamente disponível para SAF e pressionar preços. No caso de matérias-primas residuais, há ainda desafios de coleta, rastreabilidade e certificação. Além disso, como essas rotas envolvem etapas de hidrocessamento, a disponibilidade de hidrogênio de baixa emissão também é relevante para o custo e para o desempenho ambiental do combustível (EPE, 2024; NREL, 2024).

A literatura classifica essas tecnologias em três rotas principais: HEFA-SPK, HC-HEFA-SPK e CHJ, que se diferenciam nas particularidades de matéria-prima, no arranjo reacional e na composição química do produto final e são detalhadas a seguir.

2.1.1 HEFA-SPK

A rota HEFA-SPK (querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidrocessados) processa óleos vegetais, gorduras animais, óleo de microalgas convencionais ou óleos residuais. Entre os insumos mais recorrentes nessa rota estão soja, palma, camelina, pinhão-mansão, óleo de fritura usado, sebo bovino e macaúba (ICAO, 2018; ANP, 2026; EPE, 2024).

Esse processo exige pré-tratamento da matéria-prima para remover impurezas e viabilizar o uso de insumos de menor qualidade. Essa etapa é necessária para remover água, sólidos, fósforo, metais, compostos nitrogenados, clorados e outras impurezas que podem comprometer o desempenho dos catalisadores, aumentar a corrosão e reduzir a estabilidade operacional do processo (NREL, 2024).

O pré-tratamento ganha ainda mais relevância no uso de matérias-primas residuais, como óleo de cozinha usado e gorduras animais. Nesses casos, a etapa amplia a possibilidade de aproveitamento desses insumos, mas também pode elevar custos e complexidade operacional (NREL, 2024).

Após o pré-tratamento, conversão ocorre por hidrocessamento, com uso de hidrogênio e catalisadores, sendo seguida por etapas de ajuste molecular para adequar o produto às especificações exigidas para o querosene de aviação⁹ (EPE, 2024). O

⁹ Na rota HEFA, a etapa de hidrogenação catalítica envolve reações como hidredesoxigenação, descarboxilação e descarbonilação, voltadas à remoção de oxigênio e insaturações. Em seguida, hidroisomerização e hidrocraqueamento

produto caracteriza-se por alcanos de cadeia longa saturados, com baixo teor de enxofre e de compostos aromáticos, além de elevado número de cetano (EPE, 2024).

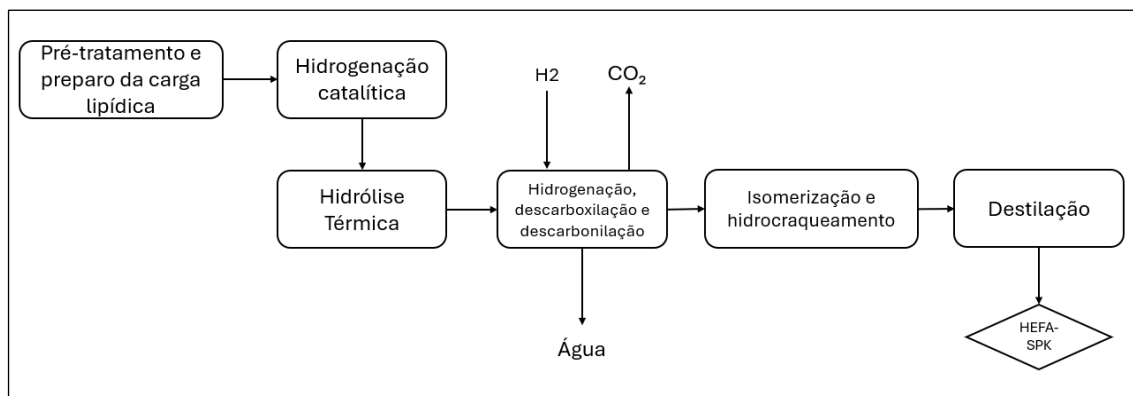


Figura 2 - Fluxograma simplificado da rota HEFA-SPK

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

A baixa presença de aromáticos restringe o uso do HEFA-SPK como combustível puro. O limite máximo de mistura com o querosene fóssil é de 50%, conforme previsto na ASTM D7566 (Anexo A2) e incorporado à regulação aplicável (EPE, 2024). As principais limitações da rota estão associadas à disponibilidade, origem e custo das matérias-primas lipídicas.

Sua competitividade permanece condicionada à disponibilidade de matérias-primas certificadas e ao custo do hidrogênio utilizado no processo (EPE, 2024). Ainda assim, o HEFA-SPK apresenta o maior nível de maturidade entre as rotas de SAF, com TRL entre 8 e 9 e plantas comerciais em operação (EPE, 2024).

Entre os casos mais consolidados na Europa, a Neste é um dos casos mais representativos. A empresa iniciou a produção de SAF em Roterdã em 2025 e possui capacidade produtiva em Singapura e Porvoo, na Finlândia. Com a expansão de Roterdã prevista para 2027, a companhia projeta alcançar 2,2 milhões de toneladas anuais de capacidade de produção de SAF, o equivalente a aproximadamente 2,75 bilhões de litros por ano¹⁰ (NESTE, 2025).

Ainda na Europa, a Enilive iniciou em 2025 a produção de SAF na biorrefinaria de Gela, na Itália, com capacidade de 400 mil toneladas por ano, equivalente a cerca de 500 milhões de litros anuais. A empresa informa que a unidade utiliza principalmente matérias-primas residuais, como óleo de cozinha usado, gordura animal e subprodutos

ajustam o comprimento e a ramificação das cadeias carbônicas para atendimento das propriedades exigidas no combustível de aviação (EPE, 2024)

¹⁰ Densidade média do QAV adotada foi de 0,799 t/m³ (ou 799 kg/m³)

do processamento de óleos vegetais, em alinhamento com a demanda criada pelo ReFuelEU Aviation (ENILIVE, 2025).

Nos Estados Unidos, a Montana Renewables opera em Great Falls, no estado de Montana, com capacidade anual de aproximadamente 30 milhões de galões¹¹ de SAF, ou 114 milhões L/ano. A localização da planta é apresentada pela empresa como uma vantagem logística para atendimento de aeroportos e redes ferroviárias no oeste dos Estados Unidos e no Canadá (MONTANA RENEWABLES, 2026).

Outro exemplo é a Diamond Green Diesel, joint venture entre Valero e Darling Ingredients, nos Estados Unidos. O projeto prevê a possibilidade de destinar cerca de metade da capacidade anual da unidade, de 470 milhões de galões, ou 890 milhões L/ano, para SAF, o que colocaria a planta entre as maiores produtoras da rota HEFA no mundo (VALERO, 2023).

No Brasil, a rota HEFA ainda se encontra em fase de estruturação. O caso mais relevante é o projeto da Acelen Renováveis na Bahia, voltado à produção de SAF e diesel renovável a partir de macaúba, com biorrefinaria associada à cadeia da Refinaria de Mataripe (ACELEN RENOVÁVEIS, 2026).

Do ponto de vista econômico, a HEFA-SPK é apontada de forma recorrente como uma das rotas de menor custo e maior maturidade comercial entre as alternativas certificadas de SAF. A literatura recente, porém, mostra que os custos variam de forma relevante conforme matéria-prima, escala, localização, grau de integração industrial, pré-tratamento, custo do hidrogênio, logística e premissas financeiras. Em termos de ordem de grandeza, os estudos disponíveis indicam uma faixa aproximada de US\$ 0,5/L a US\$ 2,0/L para HEFA-SPK, com valores mais baixos geralmente associados a matérias-primas residuais e configurações mais favoráveis, e valores mais elevados associados a óleos vegetais, maior complexidade logística ou menor integração industrial (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025).

A atratividade econômica da HEFA-SPK permanece fortemente condicionada ao custo, à disponibilidade e à certificação de matérias-primas lipídicas, que também são demandadas por outros mercados, como biodiesel, diesel renovável, alimentos e rações.

¹¹ 1 galão = 3,785 litros

2.1.2 HC-HEFA-SPK

A rota HC-HEFA-SPK (querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados) constitui uma variação da rota HEFA, distinguindo-se principalmente pela natureza da matéria-prima. Essa tecnologia utiliza óleo da microalga *Botryococcus braunii*, atualmente a única reconhecida nessa classificação (ANP, 2026; EPE, 2024). Ao contrário de outras matérias-primas processadas via HEFA convencional, essa microalga apresenta composição química específica, com elevada presença de hidrocarbonetos bioderivados, o que justifica seu enquadramento em uma rota própria dentro das rotas lipídicas de produção de SAF¹² (NREL, 2024).

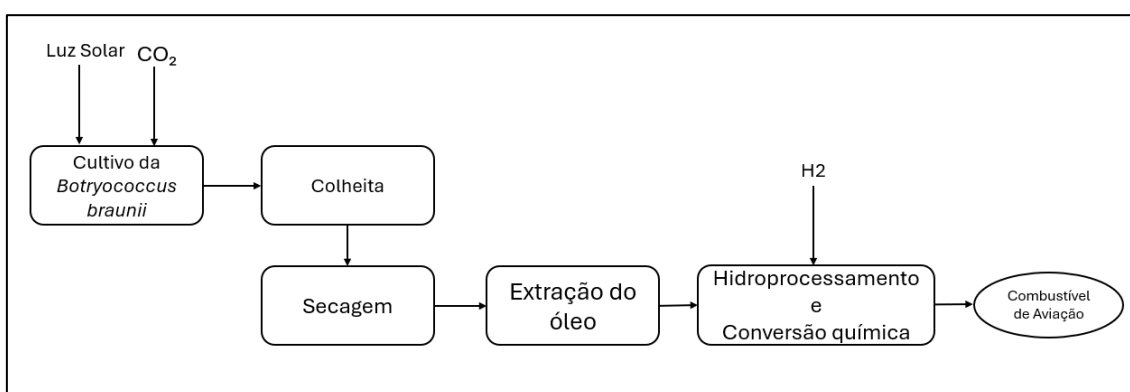


Figura 3 - Fluxograma simplificado da rota HC-HEFA-SPK

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

O mecanismo de conversão da rota HC-HEFA-SPK segue, em termos gerais, o mesmo arranjo de hidroprocessamento empregado na rota HEFA, com uso de hidrogênio e etapas de refino para adequação do combustível às especificações necessárias (NREL, 2024). O produto resultante mantém caráter parafínico sintético¹³, ainda que a composição da matéria-prima justifique seu enquadramento em anexo próprio da ASTM para essa rota baseada em *Botryococcus braunii*.

Os principais gargalos técnicos concentram-se na viabilidade do cultivo, da extração e do processamento do óleo de microalgas em escala ampliada, o que contribui para que a rota permaneça menos madura que a HEFA convencional (ANP, 2024; EPE, 2024).

¹²Essa microalga contém alta proporção de hidrocarbonetos insaturados, conhecidos como botriococenos, razão pela qual a rota envolve o processamento de hidrocarbonetos, além de ácidos graxos livres e ésteres, diferentemente da HEFA convencional, que se baseia em matérias-primas lipídicas mais usuais (NREL, 2024)

¹³ O produto final continua sendo um combustível sintético predominantemente parafínico, com predominância de isoalcanos e baixo teor de aromáticos, ainda que derivado de uma matéria-prima com composição distinta da HEFA convencional (NREL, 2024).

Do ponto de vista econômico, as referências disponíveis indicam que combustíveis derivados de microalgas tendem a apresentar custos superiores aos da HEFA convencional, em razão dos custos de cultivo, produtividade, extração, nutrientes, processamento e necessidade de maior controle da qualidade do óleo (FAROOQ et al., 2025; ATNOORKAR et al., 2024).

A HC-HEFA-SPK está enquadrada no Anexo A7 da ASTM D7566, com limite máximo de mistura de 10% em volume com o querosene fóssil. Esse percentual está associado ao procedimento de aprovação da rota, realizado pelo Fast Track¹⁴ da ASTM D4054, que admite uma avaliação técnica mais abreviada e, por isso, restringe a mistura a 10%. O limite inferior ao da HEFA-SPK convencional reflete, portanto, o menor histórico de qualificação e de experiência operacional da rota. Dessa forma, o TRL apontado gira entre 5 e 6. (RUMIZEN, 2021; IEA BIOENERGY, 2021).

2.1.3 CHJ

O processo CHJ (querosene de hidrotermólise catalítica) utiliza matérias-primas semelhantes às da rota HEFA, com a vantagem de também admitir biomassa com maior teor de umidade (EPE, 2024). Diferentemente da HEFA convencional, sua etapa central de conversão é a hidrotermólise catalítica¹⁵, precedida por um pré-condicionamento da matéria-prima¹⁶. Em seguida, o lipídio reage com água em condições hidrotérmicas, gerando uma mistura de hidrocarbonetos que, ao final, passa por hidrotratamento e fracionamento para adequação às especificações do combustível de aviação (EPE, 2024; NREL, 2024).

¹⁴ O Fast Track é um procedimento abreviado da ASTM D4054 aplicado a combustíveis candidatos com composição e propriedades próximas às do querosene de aviação convencional. A avaliação exige menor volume de testes em comparação ao processo completo de qualificação, mas restringe a aprovação a misturas de até 10% em volume na ASTM D7566. No caso da HC-HEFA-SPK, essa limitação consta no Anexo A7, aprovado para mistura máxima de 10% com querosene fóssil (RUMIZEN, 2021; ICAO, 2026).

¹⁵ Na rota CHJ, a etapa inicial de conversão não ocorre pelo mesmo arranjo de hidroprocessamento da HEFA. Seu núcleo é a hidrotermólise catalítica, processo em que o óleo reage com água aquecida sob alta pressão e temperatura, na presença de catalisadores, para quebrar e reorganizar as moléculas em uma mistura de hidrocarbonetos (EPE, 2024).

¹⁶ O pré-condicionamento pode envolver reações como conjugação, ciclização e ligação cruzada, empregadas para alterar a estrutura dos ácidos graxos e melhorar o desempenho das etapas posteriores (EPE, 2024).

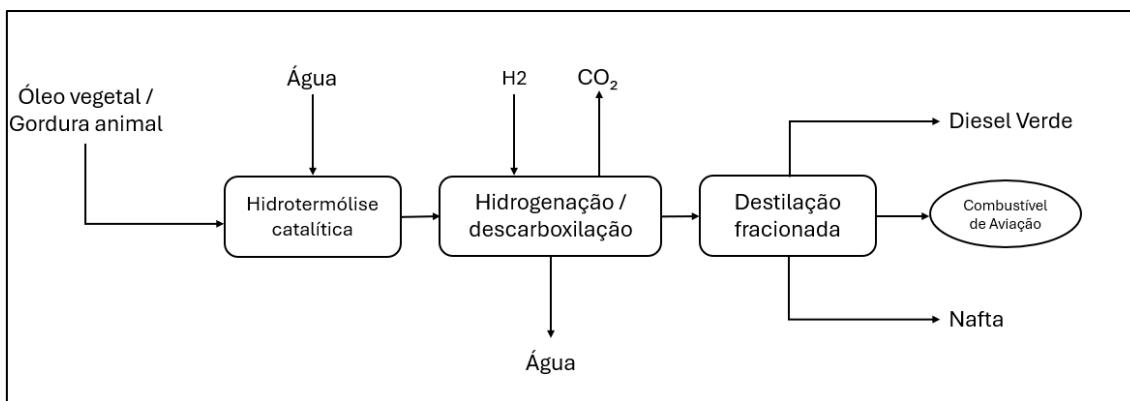


Figura 4 - Fluxograma simplificado da rota CHJ

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

O diferencial do produto CHJ é sua formulação integral, gerando querosene sintético composto naturalmente por parafinas e compostos aromáticos. O CHJ apresenta formulação mais próxima à do querosene de aviação fóssil, por conter parafinas e compostos aromáticos (ANP, 2024; RUMIZEN, 2021). A certificação ASTM D7566 (Anexo A6) e a Resolução ANP nº 997/2026 mantêm o limite de mistura fixado em 50%. A limitação de mistura imposta não decorre de incompatibilidades físico-químicas, mas da exigência técnica de experiência operacional do produto em serviço antes da liberação para uso puro (RUMIZEN, 2021).

As restrições tecnológicas da rota envolvem o alto consumo de água, a necessidade de hidrogênio e a demanda por reatores adequados a temperaturas e pressões severas. Em contrapartida, o pré-condicionamento inicial garante uma demanda de hidrogênio inferior à exigida pela via HEFA tradicional (EPE, 2024). Em termos de maturidade, o CHJ ocupa posição intermediária entre HC-HEFA e HEFA, sendo descrito como TRL 7, tecnologia demonstrada em ambiente relevante (EPE, 2024).

Do ponto de vista econômico, a literatura ainda apresenta base mais limitada para o CHJ comparado a outras rotas mais maduras, influência direta da menor experiência comercial e a menor quantidade de estudos técnico-econômicos disponíveis. Sua competitividade está atrelada ao custo das matérias-primas lipídicas, do consumo de água e da escala da planta (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025).

2.2 Rotas Álcool-para-jet

As rotas tecnológicas álcool-para-jet (ATJ) consistem na conversão de álcoois de cadeia curta em hidrocarbonetos de cadeia mais longa¹⁷ compatíveis com as especificações do combustível de aviação. Essas rotas permitem transformar bioálcoois, como etanol, em querosenes sintéticos (EPE, 2024; NG; FAROOQ; YANG, 2021).

No caso do etanol, a matéria-prima pode ter diferentes origens produtivas, incluindo etanol de primeira geração, produzido a partir de açúcares ou amidos, e etanol de segunda geração, obtido a partir de resíduos lignocelulósicos, como bagaço e palha de cana-de-açúcar. Essa diferenciação é relevante porque pode alterar o desempenho ambiental da rota, especialmente em relação ao uso da terra e à intensidade de carbono do combustível final (Maga et al., 2019).

Por essa razão, regiões que já dispõem de base agroindustrial e produção relevante de álcoois despertam um interesse maior do mercado por esse potencial (PROQR; MCTI; GIZ, 2022).

2.2.1 ATJ-SPK

A rota de querosene parafínico sintetizado por álcool (ATJ-SPK) baseia-se no processamento de álcoois, principalmente etanol e isobutanol, para a geração de um combustível puramente parafínico. A conversão ocorre por uma sequência de etapas químicas que transforma moléculas leves de álcool em hidrocarbonetos compatíveis com a faixa do querosene de aviação, incluindo desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento¹⁸ (PROQR; MCTI; GIZ, 2022; NG; FAROOQ; YANG, 2021).

¹⁷ Na rota ATJ-SPK, os produtos finais de interesse para o combustível de aviação situam-se, em geral, na faixa de hidrocarbonetos entre C8 e C16 (EPE, 2024; NG; FAROOQ; YANG, 2021).

¹⁸ O álcool é inicialmente desidratado para formar olefinas. Em seguida, essas moléculas são combinadas em cadeias maiores por oligomerização, depois hidrogenadas para saturação das ligações duplas e, por fim, fracionadas para obtenção da fração de hidrocarbonetos correspondente ao querosene de aviação (PROQR; MCTI; GIZ (2022); NG; FAROOQ; YANG, 2021).

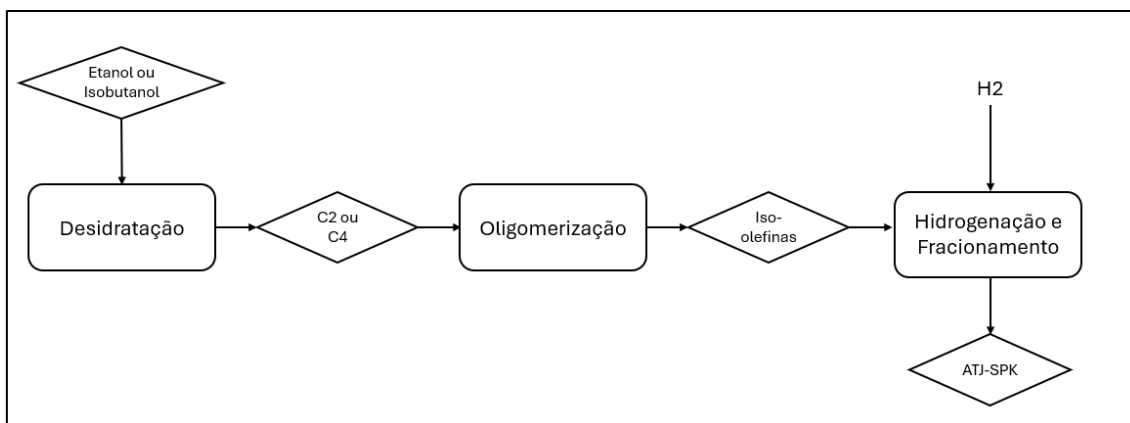


Figura 5 - Fluxograma simplificado da rota ATJ-SPK
Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

O produto resultante da rota ATJ-SPK é constituído integralmente por hidrocarbonetos parafínicos, sem traços de compostos aromáticos e de enxofre. Essa característica química impõe restrições ao seu uso puro em turbinas de aeronaves comerciais, porque os aromáticos presentes no querosene fóssil contribuem para o funcionamento adequado de componentes de vedação do sistema de combustível (EPE, 2024; RUMIZEN, 2021). A tecnologia é certificada pelo Anexo A5 da norma ASTM D7566 e pela Resolução ANP nº 997/2026, que fixam o limite regulatório de mistura em até 50% em volume com o querosene de origem fóssil (ANP, 2026; ANP, 2024).

As limitações da via ATJ-SPK concentram-se no rendimento da fração querosene e na formação de produtos menos desejáveis, como gases leves e cortes mais pesados. Além disso, soma-se a competição pela matéria-prima, uma vez que o etanol já possui mercado consolidado e ampla demanda no transporte rodoviário (EPE, 2024; PROQR; MCTI; GIZ, 2022). Em termos de maturidade tecnológica, a rota ATJ-SPK apresenta TRL estimado entre 7 e 8, com demonstração em ambiente operacional e primeiros movimentos de implantação comercial¹⁹ (BAUEN et al., 2020; PROQR; MCTI; GIZ, 2022; EPE, 2024).

Do ponto de vista comercial, a ATJ-SPK começa a sair da etapa de demonstração para a fase de implantação comercial. A principal referência atual é a empresa LanzaJet, que desenvolve tecnologia ATJ a partir de etanol e inaugurou a unidade Freedom Pines Fuels, na Geórgia, Estados Unidos, considerada a primeira planta comercial de etanol para SAF. A unidade tem capacidade de até 10 milhões de galões anuais de

¹⁹<https://safmagazine.com/articles/axens-launches-frances-first-industrial-scale-saf-unit-based-on-advanced-bioethanol-using-jetanol-technology>

combustíveis, sendo 9 milhões de galões de SAF e 1 milhão de galões de diesel renovável no primeiro ano de operação (DOE, 2024; LANZAJET, 2026).

A base comercial da rota ainda é mais restrita que a da HEFA, mas já envolve contratos e investidores relevantes. A Freedom Pines informa ter contratos garantidos para a produção dos próximos dez anos, e a LanzaJet conta com apoio de empresas como British Airways, Southwest Airlines, Microsoft, Airbus, Shell e Mitsui. Outro player relevante é a Gevo, que desenvolve projetos ATJ nos Estados Unidos, incluindo a plataforma ATJ-60, localizada na Dakota do Sul e projetada para produzir cerca de 60 milhões de galões anuais de SAF, ainda em fase de estruturação e financiamento (LANZAJET, 2026; LANZATECH, 2025; GEVO, 2025).

As estimativas de custo da ATJ-SPK são mais dispersas do que as da HEFA-SPK. A literatura indica uma faixa aproximada de US\$ 0,75/L a US\$ 4,1/L, refletindo diferenças de matéria-prima, tipo de álcool intermediário, escala da planta, grau de integração industrial, custos de conversão, receitas de coprodutos e premissas de CAPEX e OPEX (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025). Em termos gerais, a ATJ-SPK tende a apresentar custos superiores aos da HEFA-SPK no curto prazo, mas sua competitividade pode melhorar com fatores externos, como ganhos de escala, disponibilidade de etanol de baixo carbono, integração com cadeias alcooleiras existentes e redução dos custos de conversão.

2.2.2 ATJ-SKA

A rota de querosene sintético com aromáticos sintetizado por álcool (ATJ-SKA), desenvolvido pela empresa sueca Swedish Fuels (INPI, 2026), difere da vertente ATJ-SPK por incluir uma etapa adicional voltada à formação ou incorporação de compostos aromáticos ao combustível. Com isso, o produto final deixa de ser exclusivamente parafínico e passa a reunir, em uma mesma formulação, frações parafínicas e aromáticas compatíveis com o uso em aviação (ANP, 2024).

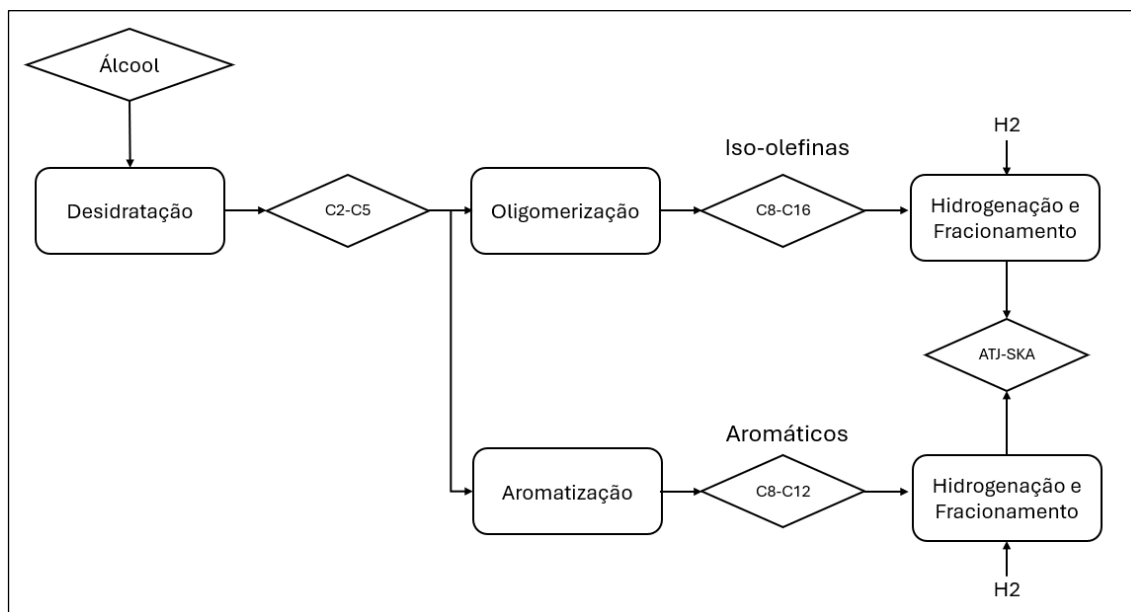


Figura 6 - Fluxograma simplificado da rota ATJ-SKA

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

A formação de aromáticos na própria estrutura do combustível confere propriedades finais superiores ao ATJ-SKA em comparação aos produtos puramente parafínicos. A presença de aromáticos aproxima o ATJ-SKA do comportamento do querosene fóssil, especialmente quanto à compatibilidade com componentes de vedação. Essa característica pode favorecer discussões futuras sobre maiores teores de mistura, superiores a 50% ou até 100%, sem depender da mistura com querosene fóssil para obter aromáticos (INPI, 2026), embora a rota ainda esteja limitada a 50% no enquadramento atual (ANP, 2024; EPE, 2024).

Nesse sentido, o principal desafio está na consolidação técnica e econômica da etapa de aromatização (ANP, 2024). Por se tratar de rota certificada mais recentemente, a ATJ-SKA ainda apresenta menor maturidade tecnológica e comercial que a ATJ-SPK, com TRL estimado entre 5 e 6. Seu avanço depende da consolidação técnica e econômica da etapa adicional de aromatização (ANP, 2024; EPE, 2024).

Do ponto de vista econômico, a ATJ-SKA possui uma base ainda menor de estudos específicos do que a ATJ-SPK. A etapa adicional de formação ou incorporação de aromáticos tende a aumentar a complexidade técnica e pode elevar custos de capital, operação e qualificação do produto (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025).

2.2.3 MTJ-SPK

A ASTM incorporou rota *Methanol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene* (MTJ-SPK) ao próprio Anexo A5 da rota ATJ-SPK (ASTM D7566). Essa atualização foi formalizada em julho de 2026²⁰, submetendo-se ao limite de mistura de até 50% em volume com combustível convencional previsto para o ATJ-SPK.

A rota consiste na conversão de metanol em hidrocarbonetos compatíveis com a faixa do QAV. Embora seja enquadrada no grupo das rotas álcool-para-jet, a química de conversão difere daquela empregada no ATJ convencional a partir de etanol ou isobutanol. Enquanto essas rotas utilizam tipicamente uma sequência de desidratação, oligomerização e hidrogenação, o MTJ pode se apoiar em processos petroquímicos já consolidados, como *methanol-to-olefins* (MTO) e *methanol-to-gasoline* (MTG), utilizando catalisadores zeolíticos para converter o metanol em intermediários hidrocarbonetos. Posteriormente, são realizadas etapas de oligomerização, hidrogenação ou hidroprocessamento, separação e fracionamento para obtenção da fração adequada ao combustível de aviação.

Uma das principais vantagens da rota é a flexibilidade na origem do metanol. O insumo pode ser produzido a partir de gás de síntese de origem renovável, obtido da gaseificação de biomassa e resíduos, ou na forma de e-metanol, por meio da combinação de hidrogênio eletrolítico de baixa emissão de carbono com CO₂ capturado. Essa característica amplia a base potencial de matérias-primas da produção de SAF e permite aproveitar uma cadeia global de metanol já estabelecida. Entretanto, o desempenho climático depende da origem do carbono, da forma de produção do hidrogênio e da eletricidade utilizada nas etapas a montante, sendo particularmente favorável quando associado a biometanol ou e-metanol produzido com energia de baixa emissão.

Sua maturidade industrial permanece inferior à das rotas HEFA e ATJ baseadas em etanol. Moriarty et al. (2026)²¹ estimaram TRL próximo de 6 para o sistema MTJ integrado, embora diversas operações individuais empregadas na rota sejam tecnologias petroquímicas maduras, algumas com TRL 9, a integração completa das etapas especificamente para produção de combustível de aviação ainda não havia sido demonstrada comercialmente em grande escala. Dessa forma, a certificação reduz uma barreira relevante à entrada no mercado, mas ainda permanecem desafios relacionados

²⁰ <https://www.astm.org/news/aviation-turbine-fuel-standard-revised>

²¹ <https://docs.nlr.gov/docs/fy26osti/100028.pdf>

à integração industrial, ao *scale-up* e à comprovação de desempenho operacional em plantas comerciais.

Economicamente, a competitividade do MTJ depende principalmente do custo e da intensidade de carbono do metanol utilizado. Em configurações baseadas em e-metanol, parcela significativa do custo encontra-se a montante da unidade MTJ, particularmente na produção de hidrogênio eletrolítico, no fornecimento de eletricidade renovável e na obtenção de CO₂. Além disso, a própria conversão envolve múltiplas etapas catalíticas e hidroprocessamento e gera uma distribuição de hidrocarbonetos que exige separação e *upgrading* para maximizar a fração destinada ao querosene.

2.3 Rotas Termoquímicas Via Síntese Fischer-Tropsch

As rotas termoquímicas via síntese de Fischer-Tropsch (FT) caracterizam-se pela conversão de gás de síntese, ou *syngas*, em hidrocarbonetos líquidos e gasosos. O *syngas* é formado principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), sendo convertido em cadeias de hidrocarbonetos sob ação de catalisadores e em condições controladas de temperatura e pressão. A partir dessa base, a rota pode produzir diferentes combustíveis sintéticos, como diesel, gasolina e querosene de aviação (SUN et al., 2019; GUPTA; KUMAR; MAITY, 2021).

Historicamente, o processo FT foi utilizado para converter carvão e gás natural em combustíveis líquidos como alternativa ao petróleo. No contexto atual, a mesma tecnologia pode ser aplicada a matérias-primas não fósseis. No caso da biomassa, o *syngas* é obtido por gaseificação de fontes de carbono renováveis, seguido de síntese FT e refino para obtenção da fração querosene compatível com o SAF (PROQR; MCTI; GIZ, 2022; GUPTA; KUMAR; MAITY, 2021). A conversão de biomassa em líquidos pela síntese de FT (BtL, do inglês *Biomass-to-Liquid*) é um processo termoquímico que transforma biomassa orgânica (como resíduos agrícolas, palha ou lascas de madeira) em combustíveis sintéticos de hidrocarbonetos de alta qualidade (Figura 7).

Existe ainda a rota FT *power-to-liquid* (PtL)²², com destaque especialmente na Europa, baseada no uso de energia de baixo carbono, água (para eletrólise e produção de hidrogênio) e CO₂ como principais matérias-primas (Figura 8). Essa configuração é considerada relevante para estratégias de descarbonização, pois combina recursos

²² Power-to-Liquid (PtL) é uma plataforma tecnológica para a produção de combustíveis sintéticos a partir de eletricidade de baixo carbono, hidrogênio e dióxido de carbono capturado. A síntese FT constitui uma das principais rotas PtL para a produção de e-SAF, convertendo gás de síntese derivado de H₂ e CO₂ em hidrocarbonetos líquidos compatíveis com a aviação.

renováveis como insumos para a produção de combustíveis líquidos. Ainda assim, sua adoção enfrenta custos elevados, baixa escala comercial e desafios operacionais. Por isso, as vias renováveis via síntese de FT ainda se encontram em estágio inicial de validação e demonstração, com iniciativas conduzidas por empresas e consórcios como Carbon Engineering, Zenid e Norsk e-Fuel (ABABNEH; HAMEED, 2022; SZKLO et al., 2022). Hoje em dia, a rota de FT a partir de CO_2 e H_2 ²³ é o caminho oficialmente aprovado²⁴ de PtL para produção de combustível de aviação.

Uma das desvantagens da síntese de FT é que tem baixa tolerância a variações de fornecimento de energia, portanto, não pode ser usada diretamente em sistemas de fornecimento de energia intermitentes, como energia eólica e fotovoltaica sem baterias. Além disso, é um processo catalítico, que requer reatores de alta temperatura e alta pressão, exigindo usinas com altos custos operacionais e de capital (ABABNEH; HAMEED, 2022).

O querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (FT-SPK) é uma rota termoquímica versátil que processa matérias-primas como carvão, gás natural, biomassas diversas e energia elétrica associada a carbono sustentável. Para a produção de SAF há a síntese de FT da biomassa (FT-BtL) e o FT de H_2 e CO_2 (FT-PtL), que serão detalhados a seguir.

2.3.1 FT-SPK - Biomass-to-Liquid (BtL)

No caso da biomassa (a rota FT-BtL), predominam materiais lignocelulósicos²⁵, como madeira, resíduos florestais, resíduos agrícolas e culturas energéticas, incluindo espécies como eucalipto e pinheiro (ANP, 2024) (Figura 7). O processo industrial envolve o pré-tratamento da biomassa, seguido de gaseificação para produção de gás de síntese, que é convertido em hidrocarbonetos de diferentes comprimentos de cadeia. Na etapa final, o produto passa por refino, com craqueamento, isomerização e fracionamento, para ampliar o rendimento da fração querosene e adequá-la às especificações do combustível de aviação (EPE, 2024).

²⁴ ASTM: FT-SPK e FT-SPK/A com mistura máxima de 50% e Coprocessamento FT Syncrude com mistura máxima de 5% (matéria prima para essas rotas pode ser lignocelulose ou H_2+CO_2).

²⁵ Materiais lignocelulósicos são fontes renováveis de biomassa seca, compostos principalmente por celulose (40% a 60%), hemicelulose (20% a 40%) e lignina (10% a 25%) (Embrapa, 2026).

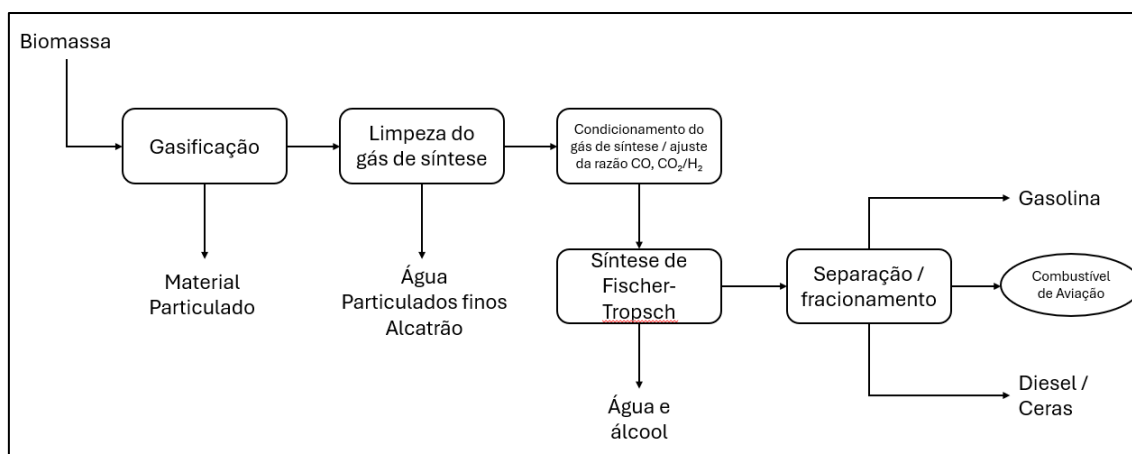


Figura 7 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch para produção de querosene parafínico hidroprocessado (FT-SPK) e querosene sintético com aromáticos (FT-SPK/A)

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

O produto final é de base parafínica, certificado pelo Anexo A1 da norma internacional ASTM D7566 e pela Resolução ANP nº 997/2026, legislações que estabelecem o limite máximo de mistura de 50% em volume com o querosene fóssil (ANP, 2026; ANP, 2024).

Entre as principais limitações técnicas e econômicas da FT-SPK, destaca-se a etapa termoquímica. A gaseificação de biomassa ocorre em alta temperatura, normalmente acima de 800°C, podendo chegar a 1.300°C em algumas configurações. Trata-se, portanto, de uma etapa intensiva em energia, especialmente quando se consideram o condicionamento da biomassa, a secagem, a moagem e o controle de umidade da matéria-prima (PROQR; MCTI; GIZ, 2022).

Além disso, antes da síntese FT, o gás precisa passar por uma limpeza para remoção de sólidos, alcatrões, compostos nitrogenados e sulfurados. Esses contaminantes podem causar incrustação, corrosão e perda de desempenho dos catalisadores, elevando a exigência de equipamentos e controle operacional. Dessa forma, o processo é considerado altamente intensivo em CAPEX (PROQR; MCTI; GIZ, 2022).

Em termos econômicos, a FT-SPK (BtL) apresenta uma das faixas de custo mais amplas entre as rotas certificadas, com estimativas de referência entre aproximadamente US\$ 0,9/L e US\$ 3,7/L, com média de US\$ 2,08/L (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025). Essa amplitude decorre de diferenças de matéria-prima, escala, grau de integração industrial, custo de biomassa, logística, receitas de coprodutos, CAPEX, OPEX e premissas financeiras (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025). Os valores mais baixos estão associados a configurações integradas e condições específicas, como aproveitamento de subprodutos agroindustriais e créditos de

carbono. Já os valores mais elevados refletem condições com maior custo de matéria-prima, menor integração ou maior intensidade de capital (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025).

2.3.2 FT-SPK - Power-to-Liquid (PtL) ou e-SAF

A rota de e-SAF, também denominada *Power-to-Liquid* (PtL), constitui uma configuração específica da rota Fischer-Tropsch aplicada à produção de combustíveis sintéticos de aviação. Diferentemente das rotas baseadas em biomassa ou em matérias-primas lipídicas, o e-SAF utiliza como insumos principais o hidrogênio eletrolítico, proveniente da eletrólise da água com eletricidade renovável, e uma fonte não fóssil de carbono, geralmente CO₂ capturado de processos biogênicos, de fontes concentradas industriais (CCS- *carbon capture and storage*)²⁶ ou diretamente do ar (DAC, *Direct Air Capture*)²⁷ (Figura 8).

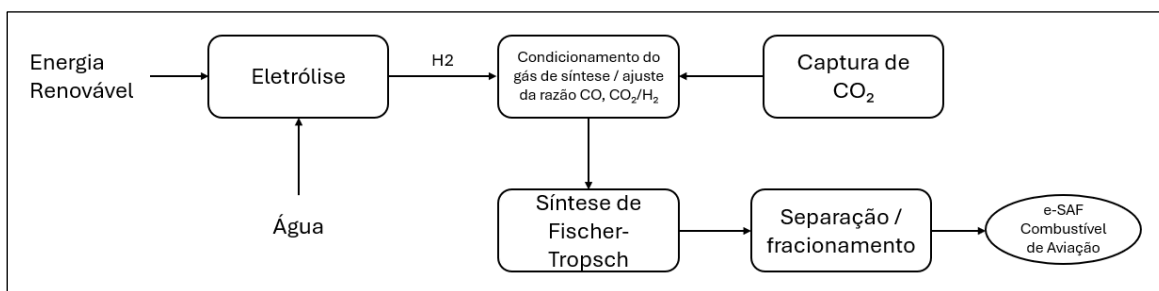


Figura 8 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch com e-SAF

Fonte: Elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

A partir desses insumos, produz-se gás de síntese, composto essencialmente por hidrogênio e monóxido de carbono, que é posteriormente convertido em hidrocarbonetos líquidos por meio da síntese FT. Em seguida, o produto passa por etapas de refino, hidrotratamento, isomerização e fracionamento, de modo a isolar a fração compatível com o querosene de aviação. Por esse motivo, o e-SAF não é uma

²⁶ Fontes que não acrescentam mais CO₂ a atmosfera. O benefício na redução de carbono dependerá da origem do dióxido de carbono utilizado na produção.

²⁷ DAC é uma tecnologia emergente que remove CO₂ diretamente da atmosfera por meio de processos químicos. Tem elevado custo e a grande demanda energética, que se tornam desafios para sua implementação em larga escala. Como apenas uma pequena fração do ar é composta de CO₂, o processo exige muita energia para separar e capturar o gás de forma eficiente. Existem dois principais métodos de captura direta de ar: sistemas à base de solventes líquidos (fazem o ar passar por substâncias químicas que absorvem o CO₂ e o gás é liberado por meio de calor e vácuo, permitindo que os solventes sejam reutilizados no processo, enquanto o ar tratado, com menos CO₂, é devolvido à atmosfera) e sistemas à base de sorventes sólidos (filtros físicos que se ligam quimicamente ao CO, quando aquecidos ou submetidos a vácuo, esses filtros liberam o CO₂ em uma corrente concentrada).

rota tecnológica independente no enquadramento ASTM, mas uma forma específica de produzir FT-SPK a partir de eletricidade renovável, água e carbono sustentável.

Para melhorar a qualidade do e-querosene, produzido por meio do processo FT, é necessário quebrar as longas cadeias de hidrocarbonetos em uma planta de hidrocrackeamento. Essa etapa do processo permite a formação de hidrocarbonetos na gama média de destilados, na qual reside o querosene (RAM; SALKUTI, 2023).

Do ponto de vista regulatório, o e-SAF está contido na rota FT-SPK, certificada no Anexo A1 da ASTM D7566 e incorporada à regulação brasileira pela Resolução ANP nº 997/2026, com mistura máxima de 50% em volume com o querosene de aviação fóssil. Essa limitação decorre do fato de o produto ser predominantemente parafínico, com baixo ou nenhum teor de compostos aromáticos, característica que exige mistura com QAV convencional para garantir compatibilidade plena com os sistemas de combustível das aeronaves, especialmente componentes de vedação. Nesse sentido, o e-SAF compartilha com outras rotas parafínicas, como HEFA-SPK e ATJ-SPK, a necessidade de mistura com combustível fóssil ou com componentes aromáticos certificados.

Essa é considerada a rota mais promissora em termos de descarbonização total, pois usa CO₂ e H₂ produzidos por fontes renováveis, porém ainda enfrenta elevados custos de produção e limitações de escalabilidade (SECCHI et al., 2025).

A principal vantagem do e-SAF está em seu potencial de descarbonização profunda. Como a rota pode utilizar eletricidade renovável e CO₂ capturado, sua intensidade de carbono pode ser significativamente inferior à do querosene fóssil, desde que toda a cadeia energética e de suprimento seja efetivamente de baixo carbono. Além disso, a rota reduz a dependência de matérias-primas biológicas disputadas. Essa característica torna o e-SAF especialmente relevante em cenários de longo prazo, nos quais a demanda global por SAF tende a superar a disponibilidade sustentável de biomassas e resíduos. Em outras palavras, enquanto rotas como HEFA e ATJ dependem diretamente da expansão de cadeias agroindustriais ou residuais, o e-SAF depende principalmente da disponibilidade de eletricidade renovável competitiva, água, CO₂ e infraestrutura industrial para produção de hidrogênio e síntese dos combustíveis sintéticos (e-refinaria).

Apesar desse potencial, o e-SAF ainda enfrenta obstáculos para sua implantação comercial em larga escala. O principal é o custo, principalmente devido a produção de hidrogênio eletrolítico, que permanece intensiva em capital e energia. A eletrólise

representa uma das etapas mais relevantes na composição do custo final do combustível. Além disso, a rota exige elevada disponibilidade de eletricidade renovável, com fornecimento estável e de baixo custo, pois a síntese FT possui menor tolerância a variações operacionais e demanda condições contínuas de temperatura, pressão e alimentação do reator. Essa característica cria desafios de integração com fontes renováveis não despacháveis, como solar e eólica, quando não há sistemas de armazenamento, suprimento complementar ou gerenciamento operacional.

Do ponto de vista econômico, a PtL/e-SAF ainda tende a ocupar a faixa superior de custos entre as rotas de SAF no curto prazo. Estimativas recentes para e-fuels, fortemente atrelada ao contexto europeu e às exigências do ReFuelEU Aviation, indicam custos atuais de produção entre aproximadamente US\$ 2,3/L e US\$ 5,2/L, com valor médio próximo de US\$ 3,9/L²⁸. Esses valores também podem variar conforme a localização da planta, o custo da eletricidade renovável, a fonte de CO₂, o fator de capacidade, a eficiência do processo e o custo de capital (AGORA VERKEHRSWENDE; PTX HUB, 2024).

Outro desafio está associado à fonte de carbono. Para que o e-SAF seja considerado combustível sintético de baixa emissão, o CO₂ utilizado precisa ser rastreável, certificado e compatível com critérios de sustentabilidade.

Dessa forma, a competitividade e a elegibilidade regulatória do e-SAF dependem não apenas da tecnologia de conversão, mas também da origem da eletricidade, do hidrogênio e do carbono utilizados.

O e-SAF é entendido como uma rota estratégica de longo prazo no mundo. Especificamente no Brasil, é uma oportunidade devido a elevada disponibilidade de recursos renováveis na matriz elétrica, possibilidade de expansão de energia solar e eólica e presença de fontes biogênicas de CO₂ associadas à produção de etanol, biogás, biometano e bioenergia. Essas condições podem favorecer a construção de projetos integrados de hidrogênio eletrolítico, captura de carbono biogênico e produção de combustíveis sintéticos. No entanto, em comparação com HEFA e ATJ, a rota e-SAF ainda apresenta menor maturidade comercial, maior custo de produção e maior complexidade sistêmica, pois depende da coordenação simultânea de novas cadeias,

²⁸Valores convertidos de €/t para US\$/L a partir das estimativas originais de € 2.440/t a € 5.660/t, com média de € 4.240/t. A conversão adotou densidade de 0,8 kg/L, premissa também utilizada por Agora Verkehrswende e PtX Hub (2024), e câmbio de 1 EUR = US\$ 1,15737, consultado em 12 jun. 2026.

como a produção de hidrogênio eletrolítico com eletricidade renovável, captura de carbono e síntese química.

O e-SAF oferece a vantagem de escalabilidade. A principal tarefa nos próximos anos será avançar nas curvas de aprendizado e explorar economias de escala para obter as maiores reduções possíveis nos custos de produção de e-SAF (AGORA VERKEHRSWENDE; PTX HUB, 2024).

Dessa forma, a rota e-SAF não deve ser vista como substituta imediata das rotas biogênicas mais maduras, mas como uma alternativa complementar e estruturante para a expansão futura do mercado de SAF. No curto prazo, sua contribuição tende a ser limitada por custos e escala. No médio e longo prazo, porém, o e-SAF pode se tornar uma das principais alternativas para ampliar a oferta de SAF. Para regiões com potencial renovável, disponibilidade de CO₂ biogênico e interesse em desenvolver cadeias industriais de hidrogênio, essa rota pode representar uma oportunidade estratégica de inserção em mercados internacionais mais exigentes.

Hoje, apesar do volume de produção de e-querosene ser negligenciável em comparação com o de combustível de aviação convencional, os principais players do setor de e-querosene incluem SkyNRG, Neste e LanzaTech. A Lufthansa, KLM e a United Airlines estão explorando o uso de e-querosene em voos de teste e anunciaram a intenção de utilizar regularmente este combustível para reduzir seu impacto ambiental (DELL'AVERSANO et al., 2024).

2.3.3 FT-SPK - Gas-to-Liquid (GtL)

A rota Gas-to-Liquid (GtL) aplicada à produção de FT-SPK consiste na conversão de uma matéria-prima gasosa rica em metano em combustíveis líquidos sintéticos por meio da síntese de FT. Tradicionalmente, essa rota foi desenvolvida a partir do gás natural fóssil, cuja conversão em gás de síntese ocorre por reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma autotérmica. Em seguida, o *syngas* é ajustado em sua razão H₂/CO, purificado e enviado à síntese FT, gerando hidrocarbonetos sintéticos (*syncrude*, petróleo cru sintético) que passam por hidrotratamento, isomerização, hidrocrackeamento e fracionamento para obtenção da fração compatível com querosene de aviação.

No contexto de SAF o GtL é renovável. O metano é proveniente de biogás purificado ou biometano, a rota pode ser tratada como uma alternativa renovável de produção de

combustíveis líquidos, desde que atendidos os critérios de sustentabilidade, rastreabilidade e redução de emissões aplicáveis. Essa configuração tem recebido atenção recente porque permite transformar resíduos agropecuários, vinhaça, resíduos urbanos, efluentes e outros fluxos orgânicos em biometano e, posteriormente, em combustível sintético de aviação por FT.

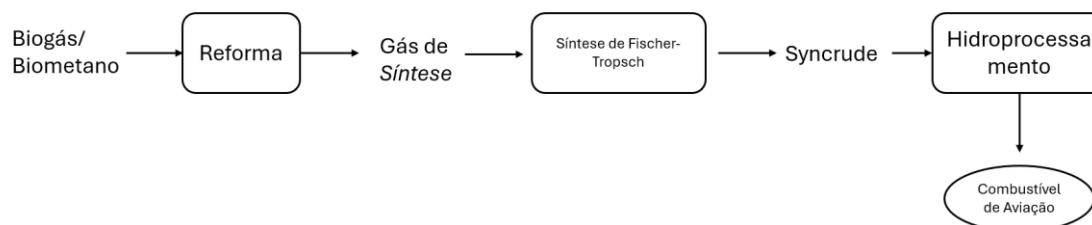


Figura 9 - Fluxograma simplificado da rota Fischer-Tropsch com biogás/biometano como matéria-prima para SAF

Fonte: elaboração própria

A conversão de biometano em SAF segue, em linhas gerais, a lógica do GtL convencional, mas com substituição da fonte fóssil de metano por uma fonte renovável. O biogás bruto, normalmente composto por CH_4 , CO_2 e contaminantes, precisa passar por limpeza e *upgrading* para obtenção de biometano com qualidade adequada. Em seguida, o biometano pode ser reformado para geração de syngas, que alimenta a síntese FT.

Apesar do potencial, a rota GtL baseada em biometano apresenta desafios relevantes. O primeiro é a necessidade de escala e regularidade de suprimento de gás renovável, pois plantas FT tendem a exigir operação contínua e alimentação estável. O segundo é o custo de purificação do biogás, especialmente a remoção de enxofre e outros contaminantes que podem comprometer catalisadores nas etapas de reforma e síntese FT. O terceiro é o CAPEX elevado associado à integração entre biodigestão, *upgrading*, reforma, condicionamento do *syngas*, síntese FT e refino. Além disso, a intensidade de carbono do combustível depende da origem do biometano, do tratamento de emissões fugitivas de metano, do consumo energético da planta e da eventual suplementação com hidrogênio de baixo carbono.

O FT-GtL para SAF é uma configuração específica da rota FT-SPK, definida pela origem gasosa da matéria-prima.

Do ponto de vista normativo, o produto final se enquadra na família FT-SPK, aprovada na ASTM D7566, desde que atenda às especificações de qualidade e seja misturado ao QAV fóssil nos limites estabelecidos para o combustível sintético parafínico (até 50%).

2.3.4 FT-SPK/A

O querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A) representa uma variação do processo Fischer-Tropsch anterior, pensado para permitir a adição e formação de compostos aromáticos junto ao fluido sintético parafínico (EPE, 2024). Esta tecnologia compartilha, em linhas gerais, as mesmas opções de matérias-primas da rota SPK-FT, abrangendo desde biomassas e gás até matrizes de carbono sustentável (ANP, 2024).

A principal diferença da FT-SPK/A em relação à FT-SPK convencional é a presença de aromáticos sintéticos no produto final. Esses compostos resultam de uma etapa adicional de alquilação, na qual aromáticos leves reagem com olefinas formadas no próprio processo FT. O resultado é um querosene sintético composto por frações parafínicas e aromáticas, com teor de aromáticos entre 15% e 20% em volume (RUMIZEN, 2021; ANP, 2026).

A incorporação desses compostos reduz limitações características das frações exclusivamente parafínicas, pois ajuda a preservar as componentes de vedação do sistema de combustível da aeronave, diminuindo o risco de vazamentos e problemas operacionais²⁹ (EPE, 2024).

Do ponto de vista regulatório, a rota é prevista no Anexo A4 da ASTM D7566 e pela Resolução ANP nº 997/2026, operando sob o mesmo limite legal de 50% de mistura atribuído à via SPK-FT (ANP, 2026; ANP, 2024). Em termos de maturidade tecnológica, a FT-SPK/A apresenta TRL inferior ao da FT-SPK convencional, estimado entre 5 e 6, refletindo a menor difusão da etapa voltada à incorporação ou formação de aromáticos sintéticos no combustível final (EPE, 2024).

2.4 Rotas de Coprocessamento em Refinaria Convencional

O coprocessamento em refinarias convencionais caracteriza-se pela introdução de matérias-primas renováveis diretamente nas unidades de operação de uma refinaria existente, operando de forma simultânea com as correntes de origem fóssil. Uma das

²⁹ Os compostos aromáticos ajudam a manter o comportamento adequado de anéis, juntas e outras peças de vedação presentes no sistema de combustível da aeronave. Quando o teor de aromáticos é muito baixo, essas peças podem perder parte de sua capacidade de vedação, o que aumenta o risco de vazamentos (ICAO, 2024).

principais vantagens do coprocessamento envolve o reaproveitamento da infraestrutura já instalada, reduzindo custos de implantação (DOE, 2020).

A literatura indica que, em relação ao CAPEX, a adaptação ou refuncionalização de refinarias pode representar cerca de 20% a 25% do custo de implantação de uma nova unidade *greenfield*³⁰ (WATSON et al., 2024).

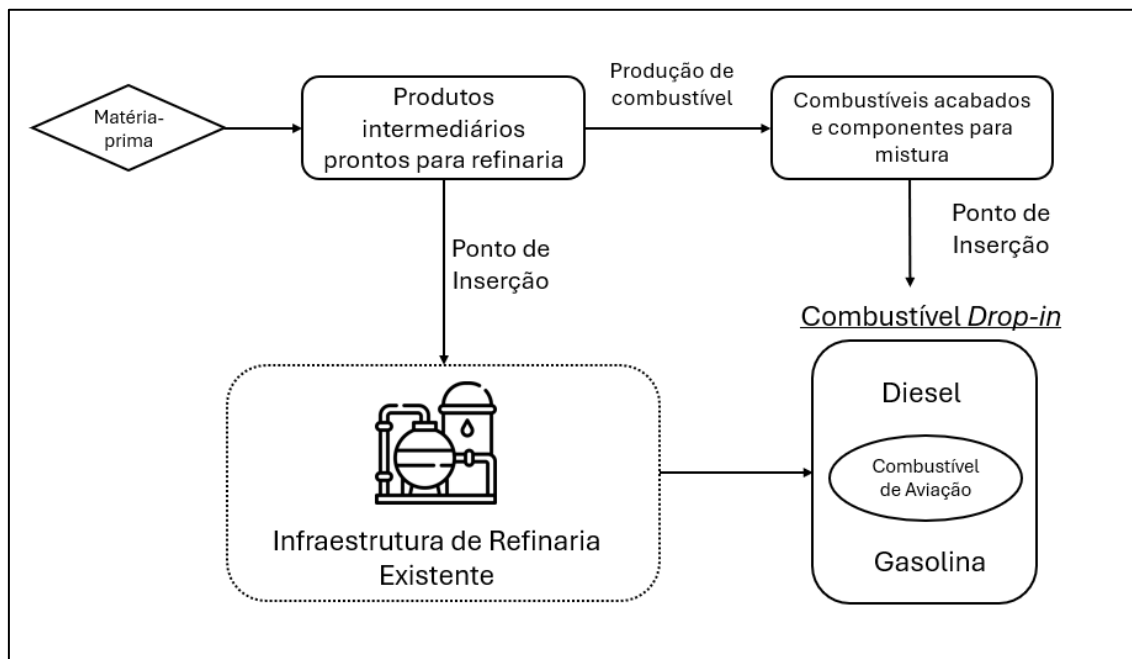


Figura 10 - Fluxograma simplificado do coprocessamento de correntes renováveis em refinaria convencional para produção de combustíveis de aviação

Fonte: elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

2.4.1 Coprocessamento de Ésteres e Ácidos Graxos

O coprocessamento de ésteres e ácidos graxos consiste na inserção direta de matrizes lipídicas, como óleos vegetais, gorduras animais e óleo de cozinha usado em unidades de hidrotratamento, hidrocrackeamento ou craqueamento catalítico fluido (FCC) da refinaria (DOE, 2020). Nessa configuração, a parte renovável é processada em conjunto com as correntes fósseis, aproveitando a infraestrutura já existente. O combustível resultante é uma mistura contendo querosene fóssil e hidrocarbonetos sintéticos renováveis, cuja certificação é feita pela especificação ASTM D1655 (Anexo A1) e pela Resolução ANP nº 997/2026 (Art. 3º, I). Ambas as resoluções estabelecem um limite

³⁰ Unidade *greenfield* é uma planta industrial construída do zero, em novo local ou sem aproveitamento relevante de infraestrutura existente.

regulatório máximo de 5% em volume da matéria-prima lipídica na corrente de alimentação (ANP, 2026; ANP, 2024).

As principais limitações técnicas decorrem do fato de que matérias-primas lipídicas se comportam de maneira diferente das correntes fósseis normalmente processadas nas refinarias. Na prática, isso pode exigir mais hidrogênio, reduzir a eficiência operacional das unidades e aumentar a sensibilidade do processo à qualidade da carga renovável³¹ (DOE, 2020).

Do ponto de vista econômico, pode reduzir barreiras de entrada por aproveitar parte da infraestrutura de refino existente, evitando a necessidade de uma planta dedicada de SAF. No entanto, os custos dependem fortemente da refinaria, do teor de coprocessamento, da adaptação das unidades, da corrente renovável utilizada, do pré-tratamento, da segregação ou rastreabilidade das correntes e dos requisitos de certificação (WATSON et al., 2024; XU et al., 2025).

2.4.2 Coprocessamento de Hidrocarbonetos Fischer-Tropsch

O coprocessamento de hidrocarbonetos Fischer-Tropsch baseia-se na alimentação de refinarias convencionais com ceras e correntes sintéticas não refinadas provenientes da gaseificação de biomassa, resíduos ou do uso de carbono associado à eletricidade renovável (ANP, 2024; DOE, 2020). A integração ocorre pela mistura desse material intermediário às correntes fósseis que seguem para hidroprocessamento. Essa configuração permite distribuir parte da produção em unidades menores, próximas às fontes de biomassa, enquanto as etapas mais complexas de refino e adequação do combustível são realizadas na estrutura já existente da refinaria, o que pode reduzir entraves logísticos na cadeia (CHIRESHE et al., 2025).

A estrutura econômica, no caso do coprocessamento via FT, depende tanto do custo de produção do gás de síntese quanto das condições de integração com a refinaria convencional. Embora o aproveitamento de infraestrutura existente possa reduzir investimentos em comparação com uma rota dedicada, os custos permanecem sensíveis à escala, à qualidade da corrente, às adaptações necessárias na refinaria e às exigências de rastreabilidade e certificação (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025; XU et al., 2025).

³¹ Entre os principais entraves estão o aumento da formação de água e gases oxigenados, maior demanda por hidrogênio, possibilidade de formação de coque, perda parcial de rendimento em carbono e desativação de catalisadores por contaminantes presentes nos óleos, como fósforo e metais. Em algumas unidades, isso pode levar à redução da capacidade operacional em relação ao processamento exclusivamente fóssil (DOE, 2020).

A tecnologia encontra-se respaldada pelo Anexo A1 da norma ASTM D1655 e pelo Art. 3º (Inciso II) da Resolução ANP nº 997/2026, que fixam a permissão regulatória de coprocessamento em, no máximo, 5% em volume de hidrocarbonetos FT em relação ao volume total (ANP, 2026; ANP, 2024). Os principais desafios estão na infraestrutura necessária para transportar essas correntes até a refinaria e na dificuldade de ser competitivo economicamente utilizando estruturas originalmente concebidas para fósseis.

2.4.3 Coprocessamento de HEFA

O coprocessamento de HEFA, definido em literatura recente como coprocessamento por fracionamento, diverge das rotas anteriores por não injetar hidrocarbonetos crus ou lipídios *in natura* na refinaria. Esta via utiliza correntes biogênicas que já foram previamente hidrocessadas e desoxigenadas de modo isolado (DOE, 2023). A carga biogênica tratada é então inserida nas unidades de fracionamento da refinaria de petróleo para isolamento e recuperação da faixa específica de querosene de aviação.

O produto final é um querosene de aviação híbrido, como previsto na norma ASTM D1655 (Anexo A1.2.2.3). A regulamentação aponta que o combustível de aviação resultante deva conter no máximo 10% de hidrocarbonetos de origem renovável (ANP, 2024; DOE, 2020).

Os desafios operacionais mapeados para essa rota concentram-se na etapa de separação. Diferentemente das unidades voltadas à produção de diesel renovável, a obtenção da fração correspondente ao querosene de aviação exige sistemas de destilação e fracionamento mais precisos para isolar os destilados médios. No plano econômico, a rota também enfrenta concorrência com a produção de diesel renovável para uso rodoviário, que tende a ser mais atrativa para as refinarias. Isso ocorre porque o mercado rodoviário admite percentuais maiores de incorporação e conta, em geral, com condições comerciais mais favoráveis, o que reduz o incentivo para ajustes operacionais voltados especificamente à produção de SAF (DOE, 2020).

Essa rota também pode se beneficiar do uso de infraestrutura de refino existente, mas sua competitividade efetiva depende de fatores como o tipo de corrente lipídica utilizada, do nível de adaptação da refinaria, do teor de coprocessamento e das condições de certificação do produto final (WATSON et al., 2024; XU et al., 2025).

2.5 Rotas Bioquímicas Via Açúcares (SIP)

As rotas bioquímicas via açúcares caracterizam-se pela conversão de fontes ricas em carboidratos em hidrocarbonetos aplicáveis à aviação, integrando processos biológicos e termoquímicos. O processamento fundamenta-se em uma etapa preliminar de pré-tratamento para separação dos açúcares da lignina presente na biomassa, seguida por hidrólise enzimática e fermentação por microrganismos. O diferencial desse arranjo reside na geração inicial de uma molécula intermediária que, após etapas de separação e purificação, é submetida ao hidrocessamento catalítico em condições severas para alcançar a especificação final de SAF (PROQR; MCTI; GIZ, 2022; NG; FAROOQ; YANG, 2021).

A rota de isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidrocessados (SIP), baseia-se na transformação metabólica de açúcares extraídos de biomassas, com destaque para a cana-de-açúcar, em um querosene de formulação estritamente parafínica (PROQR; MCTI; GIZ, 2022; NG; FAROOQ; YANG, 2021). Entre as matérias-primas mais associadas a essa rota, destaca-se a cana-de-açúcar, embora o processo também possa partir de outras correntes açucaradas compatíveis com fermentação (EPE, 2024).

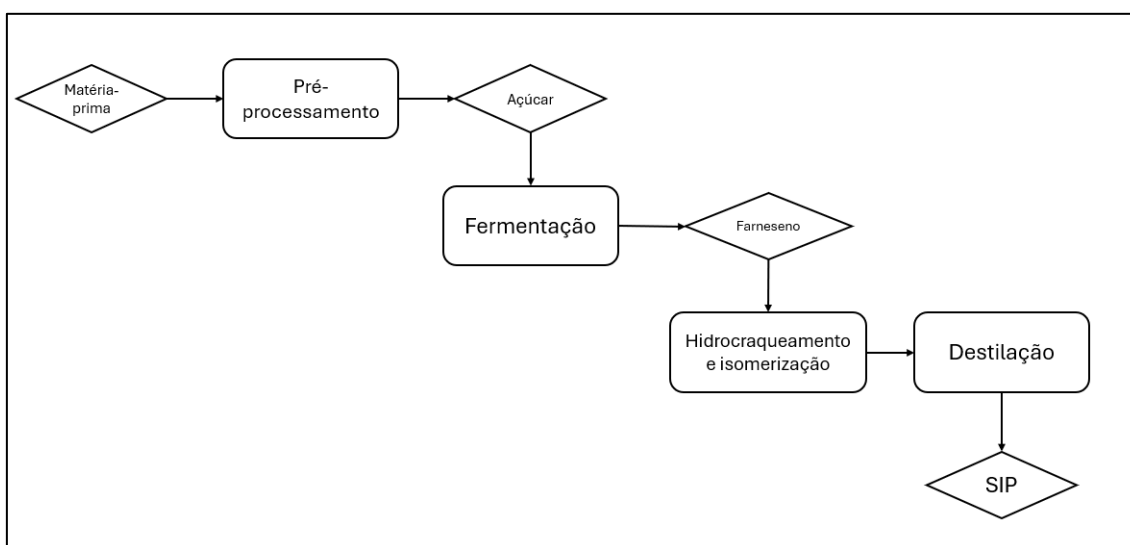


Figura 11 - Fluxograma simplificado da rota SIP

Fonte: Elaboração própria, adaptado de ANP (2024)

A conversão ocorre por fermentação dos açúcares para produção de um intermediário hidrocarboneto, o farneseno, que depois é recuperado e submetido a hidrotreatamento

para gerar o farnesano, molécula que compõe o produto final da rota SIP³² (EPE, 2024). Aprovada em 2014, a tecnologia foi normatizada pelo Anexo A3 da especificação internacional ASTM D7566 e, no Brasil, pela Resolução ANP nº 997/2026, fixando o limite regulatório de mistura em apenas 10% em volume com o querosene de origem fóssil (ANP, 2026; ANP, 2024; RUMIZEN, 2021).

No aspecto econômico, a rota enfrenta limitações atreladas aos custos da matéria-prima (açúcar) e da própria fermentação. Nesse contexto, a rota tende a enfrentar concorrência com aplicações químicas de maior valor agregado, o que reforça a necessidade de ganhos de escala, aumento de rendimento e redução de custos para sua consolidação como via competitiva de SAF (HOLLADAY; ABDULLAH; HEYNE, 2020; NG; FAROOQ; YANG, 2021). Estudos indicam faixa aproximada de US\$ 2,8/L a US\$ 5,8/L, patamar que reforça o caráter mais restrito da rota no curto prazo, especialmente em comparação com alternativas mais maduras (WATSON et al., 2024).

Em relação à maturidade tecnológica, a via encontra-se validada em escalas demonstrativa e comercial, existindo histórico de operação tecnológica no Brasil³³. O TRL da rota SIP é avaliado por instituições de referência na faixa de 5 a 7, o que indica uma operação entre os estágios de protótipo avançado e demonstração em ambiente operacional (PROQR; MCTI; GIZ, 2022; NG; FAROOQ; YANG, 2021).

2.6 Resumo e Pontos de Destaque

As rotas de produção de SAF apresentam níveis bastante distintos de maturidade tecnológica, disponibilidade de matéria-prima, custo, complexidade operacional e prontidão comercial. Embora o conjunto de alternativas certificadas venha se ampliando, a expansão efetiva do mercado ainda se concentra em poucas rotas, sobretudo naquelas capazes de aproveitar cadeias de suprimento já existentes e infraestrutura industrial parcialmente consolidada. A Tabela 1 apresenta as principais características de cada rota.

³² Na rota SIP, a fermentação costuma empregar leveduras modificadas para direcionar o metabolismo dos açúcares à produção de farneseno. Em seguida, o hidrotratamento satura as ligações duplas dessa molécula, convertendo-a em farnesano, uma isoparafina de quinze átomos de carbono que constitui o combustível dessa rota (EPE, 2024).

³³ Entre os exemplos mais citados estão a planta de Brotas (SP), cuja operação começou em 2012 para produção em larga escala de farneseno, e a parceria entre Amyris e Total, iniciada em 2014 (TOTALENERGIES, 2014).

Tabela 1 - Rotas de SAF certificadas e organizadas em cinco grupos tecnológicos

Tipo	Rota / Coprocessamento	Matérias-primas	Mistura máx.	ASTM / ANP	TRL	Projetos e propostas de comercialização ³⁴	Faixa de custo de referência do SAF (US\$ ₂₀₂₄ /L)
Rotas de hidroprocessamento de matérias-primas lipídicas	HEFA-SPK	Óleos vegetais, gorduras animais e óleo usado (UCO)	50%	D7566 – Anexo A2; RANP 997/2026 ³⁵	TRL 8–9	World Energy, Honeywell UOP, Neste Oil, EERC, Dynamic Fuels	0,5-2,0
	HC-HEFA-SPK	Microalga <i>Botryococcus braunii</i>	10%	D7566 – Anexo A7; RANP 997/2026	TRL 5–6	IHI Corporation	Dado não disponível
	CHJ	Óleos vegetais, gorduras animais e óleo usado (UCO)	50%	D7566 – Anexo A6; RANP 997/2026	TRL 7	Applied Research Associates (ARA)	Dado não disponível
Rotas álcool-para-jet	ATJ-SPK	Etanol, isobutanol e isobuteno de biomassa	50%	D7566 – Anexo A5; RANP 997/2026	TRL 7–8	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, Lanzatech, Swedish Biofuels, Byogy	0,75-4,1
	ATJ-SKA	Álcoois C2–C5 de biomassa	50%	D7566 – Anexo A8; RANP 997/2026	TRL 5–6	Swedish Biofuels ³⁶	0,75-4,1 ³⁷
Rotas termoquímicas via síntese Fischer-Tropsch	FT-SPK	Carvão, gás natural, biomassas e energia elétrica/carbono sustentável	50%	D7566 – Anexo A1; RANP 997/2026	TRL 7–8	Sasol, Fulcrum Bioenergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaidi, Shell, Syntroleum	0,9–5,2 FT BtL (0,9-3,7; valor médio 2,08) FT PtL (2,3- 5,2; valor médio 3,9)

³⁴ Exemplos não exaustivos

³⁵ RESOLUÇÃO ANP Nº 997, DE 25 DE MARÇO DE 2026. <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anp-n-997-de-25-de-marco-de-2026-695460631>

³⁶ [INPI, 2026](#) e [Swedish Biofuels](#)

³⁷ A etapa adicional de formação/incorporação de aromáticos tende a acrescentar complexidade técnica e econômica, aumentando os custos associados à rota.



Tipo	Rota / Coprocessamento	Matérias-primas	Mistura máx.	ASTM / ANP	TRL	Projetos e propostas de comercialização ³⁴	Faixa de custo de referência do SAF (US\$ ₂₀₂₄ /L)
						PtI (SkyNRG, Neste e LanzaTech)	
	FT-SPK/A	Carvão, gás natural, biomassas e energia elétrica/carbono sustentável	50%	D7566 – Anexo A4; RANP 997/2026	TRL 5–6	Sasol	0,9–3,9 ³⁸
Rotas de coprocessamento em refinaria convencional	Coprocessamento com óleos/gorduras	Óleos vegetais, gorduras animais e óleo usado (UCO)	5%	D1655 – Anexo A1; RANP 997/2026	TRL 8–9		Não há custo público específico divulgado. ³⁹
	Coprocessamento com hidrocarbonetos produzidos via FT	Hidrocarbonetos FT produzidos a partir de biomassa, resíduos ou carbono sustentável	5%	D1655 – Anexo A1; RANP 997/2026	TRL 6–7	Fulcrum	Não há custo público específico divulgado ³⁵
	Coprocessamento de HEFA	HEFA previamente hidroprocessado	10%	D1655 – Anexo A1; RANP 997/2026	TRL 8	Petrobras	Não há custo público específico divulgado ³⁵
Rotas bioquímicas via açúcares	SIP	Açúcares	10%	D7566 – Anexo A3; RANP 997/2026	TRL 5–7	Amyris, Total	2,8–5,8

Fonte: Elaboração própria, com base em ANP (2024; 2026), EPE (2024), WATSON *et al.* (2024), FAROOQ *et al.*, (2025) e Rumizen (2021)

³⁸ A etapa adicional de formação/incorporação de aromáticos tende a acrescentar complexidade técnica e econômica, aumentando os custos associados à rota.

³⁹ Não há divulgação pública de preço de referência para SAF coprocessado. As informações disponíveis indicam produção/testes na Reduc e na Revap, com teor renovável de até 1,2%, e CAPEX de R\$ 3,0 bilhões para 63 mil bpd de coprocessamento de óleo vegetal até 2028 (EPE, 2024; PETROBRAS, 2025a; PETROBRAS, 2025b).

Nesse contexto, a rota HEFA-SPK ocupa hoje a posição dominante no mercado global de SAF. Devido a sua maior maturidade tecnológica (TRL entre 8 e 9), menor custo relativo frente às demais rotas e possibilidade de adaptação de ativos e conhecimentos já existentes no setor de refino e biocombustíveis. Atualmente, a tecnologia mais madura e amplamente utilizada para a produção de SAF é a rota de HEFA⁴⁰, enquanto FT, ATJ e PtL ainda avançam em demonstração, primeiros projetos comerciais ou escalonamento.

A principal vantagem da HEFA é sua prontidão para implantação no curto prazo. A rota utiliza óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais, gera um combustível *drop-in* certificado para mistura de até 50% e apresenta o menor custo entre as alternativas analisadas. Por isso, tende a continuar sendo a principal rota de atendimento inicial a mandatos e metas de incorporação de SAF.

No entanto, seu potencial de expansão depende de matérias-primas lipídicas sustentáveis⁴¹, há a competição com outros usos (por exemplo a produção de biodiesel como alternativa mais econômica), restrições de rastreabilidade e certificação, além da demanda por hidrogênio, o que limita sua escalabilidade. Assim, a HEFA é a rota mais importante para o curto prazo, mas não deve ser tratada como solução única.

A segunda rota mais empregada é a ATJ⁴². As rotas ATJ possuem importância estratégica sobretudo para países com cadeia alcooleira consolidada, como o Brasil. A sua principal vantagem é a possibilidade de aproveitar uma base produtiva já existente de etanol, infraestrutura agroindustrial madura e experiência logística. Isso torna o ATJ uma alternativa relevante para uma estratégia nacional de SAF. No entanto, a rota ainda enfrenta desafios de rendimento, custo de conversão, necessidade de escala e competição do etanol com outros mercados, especialmente o transporte rodoviário e usos industriais. Assim, o ATJ pode se tornar uma opção promissora para países com etanol de baixo carbono e disponibilidade de expansão sustentável da produção.

Seguida pela rota FT⁴³, com aproximadamente 4% da produção de SAF (através das rotas termoquímicas envolvendo gaseificação de biomassa ou resíduos sólidos urbanos para produzir gás de síntese (*syngas*), que é então convertido em hidrocarbonetos líquidos). As rotas FT apresentam papel estratégico diferente. Seu principal ponto

⁴⁰ Representa aproximadamente 86% da produção global de SAF (THOMSEN; MISTRY; BLOCK, 2023).

⁴¹ Resíduos gordurosos, como a gordura animal e o óleos de cozinha usados, que embora sejam renováveis, são capazes de suprir apenas 5% e 1,5% da demanda total de querosene de aviação o no Brasil. Além de apresentarem desafios técnicos adicionais devido a sua qualidade inferior (AGROICONE, 2021).

⁴² Responsável por aproximadamente 6% da produção o global de SAF.

⁴³ O SAF pela rota de FT pode ser a partir de resíduo sólido, de biomassa ou a partir de CO₂ e H₂ (e-SAF)

positivo é a flexibilidade de matérias-primas, pois podem utilizar biomassas lignocelulósicas, resíduos, gás de síntese e, no caso das configurações *Power-to-Liquid*, hidrogênio e carbono. Essa característica amplia o potencial de redução de emissões e reduz a dependência de óleos e gorduras. A rota que vem ganhando destaque, especialmente na Europa, é a PtL (uso de energia renovável, água e CO₂ como principais matérias-primas). Hoje em dia, a rota de FT a partir de CO₂ e H₂ é o caminho oficialmente aprovado⁴⁴ de PtL para produção de combustível de aviação, mas se espera que futuramente outros caminhos se tornem possíveis (AGORA VERKEHRSWENDE; PTX HUB, 2024). Por outro lado, a rota FT a partir de biomassa exige gaseificação, limpeza do gás, síntese catalítica e refino, o que eleva o CAPEX, a complexidade operacional e o risco de implantação. Portanto, a FT tende a ser uma alternativa relevante para o médio e longo prazo, especialmente em regiões com disponibilidade de resíduos lignocelulósicos, biomassa florestal ou energia renovável competitiva, mas ainda não apresenta a mesma competitividade comercial da HEFA no curto prazo.

As rotas bioquímicas via açúcares, como SIP, têm menor protagonismo no mercado de SAF. Embora possam utilizar matérias-primas como a cana-de-açúcar, sua limitação de mistura a 10%, os custos associados à fermentação e a competição com aplicações químicas de maior valor agregado reduzem sua atratividade como rota principal de expansão. Sua contribuição tende a ser mais específica e complementar, dependendo de nichos tecnológicos, ganhos de rendimento e condições econômicas favoráveis.

As rotas com formação ou incorporação de aromáticos (FT-SPK/A e ATJ-SKA), são tecnicamente relevantes pois ajudam a enfrentar uma limitação comum dos combustíveis sintéticos puramente parafínicos: a ausência de aromáticos, compostos importantes para a compatibilidade com sistemas de vedação das aeronaves. Ainda assim, essas rotas permanecem menos maduras, com menor histórico operacional e maior incerteza econômica. Seu valor está mais associado à evolução futura dos combustíveis sintéticos e à possibilidade de maiores teores de substituição, mas ainda não representam a principal via de implantação comercial.

Por fim, o coprocessamento em refinarias pode cumprir papel de transição. Seu ponto positivo é o aproveitamento da infraestrutura existente, reduzindo barreiras iniciais de investimento e permitindo incorporação de conteúdo renovável em combustíveis de aviação. Entretanto, os limites regulatórios de mistura são baixos, variando de 5% a

⁴⁴ ASTM: FT-SPK e FT-SPK/A com mistura máxima de 50% e Coprocessamento FT Syncrude com mistura máxima de 5% (matéria prima para essas rotas pode ser lignocelulose ou H₂+CO₂).

10%, e o controle da qualidade da carga renovável pode gerar desafios operacionais. Além disso, o coprocessamento não elimina a dependência da base fóssil da refinaria. Por isso, deve ser entendido como uma alternativa incremental e de curto prazo, não como solução estrutural para produção dedicada de SAF.

Dessa forma, a rota HEFA é a rota líder hoje e a opção mais viável para expansão imediata, mas sua dependência de matérias-primas lipídicas limita a capacidade de atendimento de longo prazo. Para ampliar a oferta de SAF em escala compatível com as metas de descarbonização da aviação, será necessário diversificar o portfólio tecnológico.

No curto prazo, HEFA e coprocessamento tendem a responder pela maior parte da oferta. No médio prazo, ATJ ganha relevância em países com etanol competitivo e de baixa intensidade de carbono como no Brasil. No longo prazo, rotas FT BtL, FT PtL e tecnologias com aromáticos poderão ser decisivas para ampliar escala, diversificar matérias-primas e reduzir a dependência de óleos e gorduras.

Essa perspectiva é ilustrada pela Figura 12 da IATA (2024) para o mundo. As quatro principais vias de produção de SAF (HEFA, ATJ, FT e PtL) contribuirão para a produção total de SAF em ritmos diferentes ao longo do tempo. Nos primeiros anos até 2030, o volume virá quase exclusivamente de HEFA. Sua participação diminui à medida que as vias alternativas atingem a viabilidade comercial. É importante observar que uma participação decrescente não significa uma queda no volume produzido, apenas uma estabilização. Após 2030, a produção a partir das vias AtJ e FT BtL aumentará gradualmente. Entre 2040 e 2045, a quantidade de SAF produzida por ATJ, FT BtL e PtL excederá a produção da HEFA. A participação do SAF produzido por FT PtL deverá aumentar substancialmente a partir de 2045, quando a tecnologia se tornar comercialmente madura, devido ao seu fornecimento teoricamente ilimitado de matéria-prima de CO₂ e eletricidade renovável.

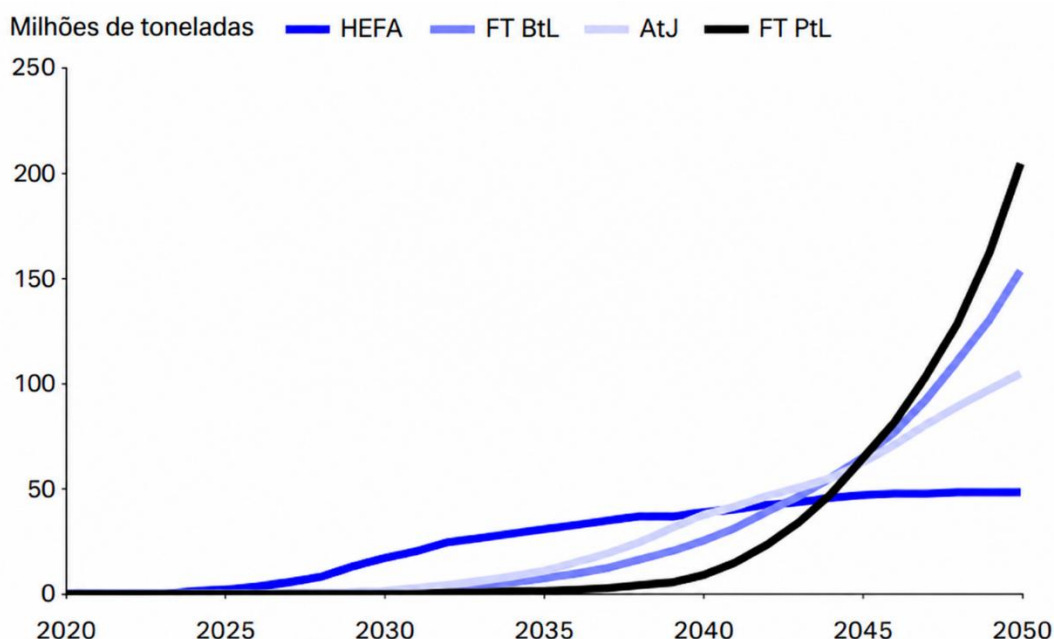


Figura 12 - Produção de SAF no mundo por via de fabricação, 2020-2050

Fonte: adaptado e traduzido de IATA, 2024

Logo, a estratégia não é escolher uma única rota (neutralidade tecnológica), mas combinar prontidão comercial, disponibilidade de insumos, custo, desempenho ambiental e segurança regulatória. Para o Brasil, em particular, HEFA e coprocessamento podem abrir o mercado, mas ATJ a partir de etanol e rotas baseadas em biomassas e resíduos, além de e-SAF devem ser consideradas como vetores estratégicos para uma cadeia nacional de SAF mais diversificada.

3. Avaliação do Impacto Ambiental

Como já relatado, o SAF possui papel estratégico na descarbonização do setor aéreo diante das metas globais de redução das emissões de GEE. Além das emissões de gases de efeito estufa, as aeronaves também emitem NO_x (óxidos nitrogenados), óxidos de enxofre (SO_x), material particulado e fuligem (IPCC, 1999). Essas emissões estão associadas não apenas ao aquecimento global, mas também a outros impactos ambientais, como acidificação, formação de ozônio troposférico, degradação da qualidade do ar e efeitos sobre a saúde humana e os ecossistemas.

A avaliação ambiental de combustíveis deve considerar múltiplos indicadores, para evitar que a redução de emissões de GEE seja acompanhada pela transferência de impacto para outras dimensões ambientais e sociais. Essa preocupação é particularmente relevante para os SAFs, cujos desempenhos ambientais dependem da rota tecnológica adotada, da matéria-prima utilizada, da origem dos insumos energéticos e das práticas de manejo empregadas ao longo da cadeia produtiva.

Nessas bases, embora os avanços regulatórios nacionais e internacionais estejam fortemente direcionados à redução das emissões de GEE, a sustentabilidade dos SAFs não pode ser avaliada exclusivamente pela intensidade de carbono. Essa limitação é frequentemente descrita na literatura como *carbon tunnel vision*, um fenômeno caracterizado pela priorização excessiva da redução de CO₂ em detrimento de outros impactos ambientais relevantes, como uso da terra, perda de biodiversidade, consumo de recursos hídricos, poluição de corpos d'água e degradação de ecossistemas (SEI, 2022).

Como resultado, uma determinada rota tecnológica pode apresentar elevado potencial de mitigação climática e, ainda assim, gerar pressões ambientais significativas em outras dimensões. No caso dos SAFs, isso é particularmente relevante devido à forte dependência de cadeias agrícolas (rotas dependentes de biomassa) e processos industriais intensivos em energia (como a rota FT-PtL para a produção do H₂ eletrolítico), que podem gerar impactos ambientais significativos em outras categorias, como uso da terra, perda de biodiversidade, consumo hídrico, eutrofização, acidificação do solo, contaminação por defensivos agrícolas e pressão sobre ecossistemas naturais.

Por outro lado, no contexto brasileiro, a elevada produtividade agrícola, a disponibilidade de áreas já antropizadas e a matriz elétrica predominantemente renovável podem reduzir parte desses impactos quando comparados a outros países. Além disso, o aproveitamento de resíduos agroindustriais e florestais como matéria-prima para a

produção de SAFs pode minimizar a competição por terras e contribuir para uma expansão mais sustentável da oferta de combustíveis renováveis.

No contexto da transição energética, o principal benefício ambiental do SAF é a redução das emissões de GEE no ciclo de vida. Contudo, para garantir que a expansão dos SAFs ocorra de maneira compatível com objetivos mais amplos de sustentabilidade ambiental, o desafio não consiste apenas em reduzir emissões de carbono, mas em garantir que a expansão dos SAFs ocorra de maneira compatível com objetivos mais amplos de sustentabilidade.

O CORSIA considera que as reduções das emissões de GEE devem considerar o ciclo do combustível, em uma abordagem completa do seu ciclo de vida (poço-à-roda ou *well-to-wake*) (ICAO, 2025a). Além disso, estabelece requisitos de sustentabilidade baseados principalmente em salvaguardas ambientais relacionadas ao uso da terra e à proteção de áreas com elevado estoque de carbono e alta relevância para a biodiversidade⁴⁵.

Nesse contexto, o sistema estabelece restrições ao uso de matérias-primas provenientes de áreas com elevado estoque de carbono ou alta relevância para a biodiversidade, de modo a evitar emissões associadas à conversão de ecossistemas sensíveis. A verificação do cumprimento desses requisitos é realizada por Esquemas de Certificação de Sustentabilidade (*Sustainability Certification Schemes – SCSs*) reconhecidos pela ICAO, que auditam a conformidade das cadeias produtivas com os critérios estabelecidos pelo programa (ICAO, 2022).

Apesar dessa abordagem ampliada, a presente seção não tem como objetivo desenvolver uma avaliação exaustiva de todos os impactos socioambientais associados às rotas de SAF. O foco quantitativo dos impactos ambientais será sobre as emissões de CO₂. Assim, os aspectos sociais e ambientais para além das emissões de CO₂ são tratados de forma sintética e orientada à identificação de riscos e condicionantes críticos, servindo como base para comparações qualitativas entre rotas, e não como substituto de uma avaliação de ciclo de vida completa ou de estudos específicos de impacto ambiental.

⁴⁵ Os critérios de sustentabilidade do CORSIA para combustíveis elegíveis abrangem, além da redução de emissões de GEE em ciclo de vida, salvaguardas ambientais e sociais relacionadas à proteção de estoques de carbono, permanência das reduções de emissões, qualidade e disponibilidade hídrica, saúde do solo, qualidade do ar, conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, gestão de resíduos e produtos químicos, minimização de impactos sísmicos, acústicos e vibracionais, respeito aos direitos humanos, trabalhistas, fundiários e de uso da água, promoção do desenvolvimento local e proteção da segurança alimentar (ICAO, 2025).

3.1 Metodologia para a Avaliação de Impactos Ambientais

Na Lei do Combustível do Futuro (Brasil, 2024), que instituiu o ProBioQAV⁴⁶, entre seus principais instrumentos está a contabilização das emissões de GEE associadas às diferentes rotas tecnológicas de produção, a partir de uma abordagem baseada no ciclo de vida. Para esse fim, a legislação atribui à ANP a responsabilidade de definir os valores de emissões equivalentes por unidade de energia, bem como os procedimentos de certificação, monitoramento e verificação necessários à implementação do programa. No Brasil, a ACV também fundamenta políticas voltadas à descarbonização dos transportes, como o RenovaBio.

Nesse contexto, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como a principal ferramenta para a avaliação da sustentabilidade ambiental dos SAFs, permitindo quantificar os impactos associados às diferentes etapas da cadeia produtiva, desde a obtenção das matérias-primas até a produção e utilização do combustível. A metodologia é internacionalmente padronizada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, que estabelecem princípios e requisitos para sua implementação, garantindo consistência metodológica, transparência e comparabilidade entre estudos (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Diferentemente de abordagens focadas exclusivamente nas emissões diretas de carbono, a ACV permite uma avaliação sistêmica dos impactos ambientais ao longo de toda a cadeia de valor. Além das mudanças climáticas, podem ser avaliadas categorias como uso da terra, consumo de energia e água, eutrofização, acidificação, toxicidade humana e ecotoxicidade.

No cenário regulatório internacional, a ACV constitui a principal base técnica para a certificação e elegibilidade dos SAFs. A metodologia é empregada em instrumentos regulatórios como a Diretiva de Energias Renováveis da União Europeia (RED III), a iniciativa ReFuelEU Aviation e o esquema CORSIA, da ICAO⁴⁷.

Esse cenário reforça a consolidação da ACV como metodologia de referência para a avaliação e certificação de SAF, à medida que avançam os esforços de harmonização regulatória internacional. Em consonância com essa tendência, a Lei do Combustível do Futuro estabelece que a regulamentação brasileira deve buscar alinhamento com os critérios de sustentabilidade internacionais. Embora a regulamentação específica para

⁴⁶ProBioQAV: Contabilização através da ACV do poço-à-roda de cada rota tecnológica de produção de SAF

⁴⁷A metodologia do CORSIA considera emissões de CO₂, CH₄ e N₂O associadas às atividades de produção e fornecimento do combustível, em abordagem “well-to-pump”, além das emissões de CO₂ da combustão em “well-to-wake”. A unidade funcional utilizada é gCO₂e/MJ de combustível produzido e consumido na aeronave, o que significa que insumos energéticos e químicos utilizados na conversão, incluindo hidrogênio, eletricidade, calor e transporte, devem ser incorporados à intensidade de carbono do SAF (ICAO, 2026)

os SAFs ainda esteja em desenvolvimento, a legislação já prevê uma abordagem *well-to-wake* (poço-à-roda), alinhada às fronteiras de avaliação do CORSIA, que consideram as emissões ao longo de todo o ciclo de vida do combustível, desde a produção da matéria-prima até sua utilização final.

Métodos de ACV contemplam múltiplas categorias de impacto ambiental, incluindo, além das mudanças climáticas, uso da terra, consumo de recursos energéticos e hídricos, eutrofização, acidificação e ecotoxicidade. No caso dos recursos hídricos, por exemplo, os impactos não dependem apenas do volume de água consumido, mas também de fatores como disponibilidade local, qualidade da água e nível de escassez hídrica da região analisada. Essa abordagem permite uma avaliação mais abrangente dos potenciais impactos ambientais associados às diferentes rotas de produção de SAF.

Apesar da ampla gama de categorias de impacto contempladas pelos métodos de ACV, os principais referenciais regulatórios para SAFs concentram-se predominantemente na quantificação das emissões de GEE, complementada pelos impactos da mudança do uso da terra (LUC). Essa ênfase reflete que a avaliação dos impactos dos SAFs ainda prioriza impactos climáticos em detrimento de outros impactos ambientais.

Assim, as categorias de impacto ambiental tradicionalmente avaliadas em estudos completos de ACV⁴⁸, não são incorporadas como requisitos para a avaliação da sustentabilidade dos SAF, embora possam oferecer uma compreensão mais abrangente dos efeitos ambientais das diferentes rotas tecnológicas.

A incorporação de outras categorias de impacto ambiental implica desafios metodológicos relevantes, sobretudo quanto à harmonização de abordagens, disponibilidade de dados consistentes e comparabilidade entre diferentes rotas tecnológicas. Além disso, questões metodológicas como a alocação de impactos entre SAFs e seus co-produtos⁴⁹, (De Jong et al., 2017) ainda precisam ser exploradas para uma correta avaliação dos seus impactos

Assim, o avanço na avaliação da sustentabilidade dos SAFs depende do aprimoramento e da convergência de metodologias internacionalmente aceitas, de modo a garantir maior consistência, transparência e robustez nas análises. Apenas dessa maneira poderá ser possível incorporar outras categorias de impacto ambiental de forma consistente, ampliando a proteção de diferentes compartimentos ambientais. Essa ampliação do escopo é particularmente relevante no contexto brasileiro, onde a

⁴⁸ Por exemplo, como acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade, formação de ozônio fotoquímico e consumo de recursos, entre outras.

⁴⁹ Eletricidade excedente, calor, combustíveis intermediários ou subprodutos agrícolas.

diversidade de rotas produtivas e matérias-primas contribui para maior variabilidade dos resultados e exige abordagens mais abrangentes.

3.2 Impactos Ambientais da Produção de SAF

Os impactos ambientais associados à produção de SAF dependem principalmente da origem das matérias-primas utilizadas, da intensidade energética dos processos de conversão e da matriz energética empregada ao longo da cadeia produtiva. Embora existam diversas rotas tecnológicas para produção de SAF, muitas compartilham matérias-primas semelhantes e, conseqüentemente, apresentam impactos ambientais comuns.

Dessa forma, a análise apresentada nas próximas seções é organizada de acordo com os principais grupos de matérias-primas, conforme a classificação apresentada pela EPE (2024).

3.3.1 Triglicerídeos (oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais)

Este grupo inclui todas as matérias-primas compostas por triglicerídeos, abrangendo óleos vegetais de culturas oleaginosas, gorduras animais, óleos e gorduras residuais, óleo de cozinha usado e lipídios de microalgas. Essas matérias-primas são utilizadas nas rotas CHJ, HEFA, HC-HEFA-SPK e em processos de coprocessamento com óleos e gorduras.

Os principais impactos ambientais dessa rota estão associados à origem das matérias-primas lipídicas utilizadas. Quando há predominância de óleos vegetais provenientes de cadeias agrícolas intensivas, podem ocorrer impactos relacionados à mudança direta e indireta do uso da terra (ILUC), desmatamento, perda de biodiversidade, elevado consumo hídrico e uso intensivo de fertilizantes e defensivos agrícolas (DE JONG et al., 2017).

Além dos impactos agrícolas, a etapa de processamento também demanda hidrogênio e energia térmica, podendo gerar emissões indiretas de GEE dependendo da matriz energética utilizada na refinaria. Quando produzido a partir de fontes fósseis, o hidrogênio⁵⁰ pode aumentar significativamente as emissões indiretas de GEE.

⁵⁰ A produção global de hidrogênio é majoritariamente baseada em fontes fósseis, apenas menos de 1% é hidrogênio de baixa emissão representa (IEA, 2024). No Brasil, a produção atual está concentrada principalmente em refinarias e fábricas de fertilizantes, indicando predominância de hidrogênio convencional (EPE, 2025). Assim, para rotas de SAF

Por outro lado, o uso de resíduos lipídicos através do coprocessamento, como óleo de cozinha usado e gorduras residuais, reduz a pressão sobre o uso da terra e tende a apresentar melhor desempenho ambiental, minimizando emissões associadas à produção agrícola. Contudo, os impactos para o potencial de aquecimento global no coprocessamento de óleos e gorduras podem apresentar grande variabilidade devido às diferentes matérias-primas utilizadas (DE JONG et al., 2017).

As microalgas, embora também sejam fonte de triglicerídeos, apresentam características específicas. Possuem elevada produtividade por área e menor competição com terras agrícolas, mas exigem elevado consumo de energia e água para cultivo, colheita e extração de lipídios, de modo que seus impactos estão mais associados à intensidade energética do processo do que ao uso da terra (BRANCO-VIEIRA et al., 2020). Dessa forma, a sustentabilidade da rota depende fortemente da rastreabilidade da biomassa, da proporção efetiva de conteúdo renovável incorporado ao combustível final e da adoção de critérios robustos de certificação ambiental (ICAO, 2023).

3.3.2 Etanol e Isobutanol de Biomassa

O etanol e o isobutanol ocupam uma posição particular entre as matérias-primas e rotas tecnológicas para produção de SAF. Diferentemente dos óleos, gorduras, açúcares, amidos e biomassas lignocelulósicas, que constituem matérias-primas primárias, esses compostos são intermediários químicos produzidos a partir da conversão de diferentes tipos de biomassa e posteriormente transformados em hidrocarbonetos de aviação por meio da rota ATJ (EPE, 2024; ICAO, 2025a).

Esses álcoois podem ser obtidos a partir de matérias-primas açucaradas e amiláceas, como cana-de-açúcar, milho, trigo e beterraba açucareira, bem como de biomassas lignocelulósicas provenientes de resíduos agrícolas, resíduos florestais e culturas energéticas dedicadas⁵¹. Dessa forma, o desempenho ambiental do SAF produzido pela rota ATJ depende tanto dos impactos associados à produção da biomassa quanto da

que demandam hidrogênio, o uso de H₂ de baixa emissão deve ser tratado como oportunidade de melhoria ambiental e redução da intensidade de carbono, e não como condição já disponível em escala.

⁵¹As matérias-primas açucaradas e amiláceas constituem importantes fontes de carboidratos fermentáveis para a produção de biocombustíveis intermediários que podem ser posteriormente convertidos em SAF por meio da rota ATJ e SIP.

eficiência dos processos industriais empregados na produção e conversão dos álcoois intermediários (IEA, 2021; ICAO, 2025a)⁵².

Do ponto de vista ambiental, os impactos associados ao etanol e ao isobutanol dependem principalmente da biomassa utilizada em sua produção, das práticas agrícolas adotadas e das fontes de energia empregadas nos processos industriais. Dessa forma, os impactos não decorrem apenas da etapa de conversão do álcool em SAF, mas de toda a cadeia produtiva necessária para obtenção desses intermediários. Em sistemas baseados em culturas agrícolas, como cana-de-açúcar e milho, destacam-se os impactos relacionados ao uso da terra, ao consumo de água, à aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas e às emissões associadas às operações agrícolas e industriais (FILOSO et al., 2015).

Além das emissões de GEE, a produção de etanol e isobutanol de biomassa pode impactar o consumo de recursos hídricos, a eutrofização de corpos d'água decorrente do aporte de nitrogênio e fósforo provenientes da fertilização agrícola, a acidificação associada às emissões atmosféricas de compostos nitrogenados e sulfurados, a degradação da qualidade do solo e os impactos sobre a biodiversidade relacionados às mudanças no uso da terra (FILOSO et al., 2015; DUDEN et al., 2020). No caso específico do isobutanol de biomassa, estudos de avaliação do ciclo de vida indicam que os principais impactos ambientais também estão associados à produção da biomassa e ao consumo de energia durante as etapas de fermentação, separação e purificação do combustível (CAI et al., 2018).

O uso da água constitui um impacto ambiental relevante em sistemas agrícolas destinados à produção de biocombustíveis, especialmente em condições de irrigação ou em regiões sujeitas à escassez hídrica. Estudos indicam que culturas como milho e beterraba açucareira podem apresentar maior intensidade de consumo de água e maior sensibilidade à disponibilidade hídrica quando comparadas a sistemas de cana-de-açúcar predominantemente de sequeiro, embora esta última também possa apresentar impactos significativos em cenários de irrigação suplementar ou restrição hídrica regional (Mekonnen & Hoekstra, 2011; Ometto et al., 2009).

⁵² No caso da rota SIP baseada em farneseno, estudos indicam que o desempenho ambiental está diretamente relacionado à origem do carbono utilizado no processo de fermentação e à eficiência energética das etapas de conversão e hidrocessamento, incluindo o fornecimento de hidrogênio (Rautela et al., 2026).

3.1.1 Biomassa Lignocelulósica

A biomassa lignocelulósica inclui resíduos florestais, agrícolas e outras fontes vegetais estruturais utilizadas principalmente nas rotas FT-SPK, FT-SPK/A e em sistemas de coprocessamento via Fischer-Tropsch. Exemplos de biomassas que podem ser consideradas nessa rota incluem eucalipto, pinheiro, bagaço de cana, capim elefante, algas e palhada (EPE, 2024).

Essas matérias-primas utilizam carbono biogênico resultante do processo de fotossíntese associado ao crescimento das matérias-primas, o que pode resultar em redução das emissões líquidas de GEE em comparação às fontes fósseis. Entretanto, os processos de gaseificação e síntese permanecem altamente intensivos em energia e água.

Os impactos ambientais dependem da origem da biomassa. Quando baseada em resíduos, há menor pressão sobre o uso da terra. Contudo, a remoção excessiva pode afetar a ciclagem de nutrientes, a fertilidade do solo e os estoques de carbono. O desempenho ambiental dessas rotas depende da sustentabilidade da cadeia de suprimento e do uso de energia de baixa intensidade carbônica (IEA, 2021; IPCC, 2022).

3.1.2 Hidrogênio

O hidrogênio deve ser tratado como variável ambiental crítica na produção de SAF. Nas rotas HEFA, CHJ, coprocessamento e ATJ, sua origem pode reduzir ou comprometer parte dos ganhos climáticos obtidos com a substituição do QAV fóssil. Na rota e-SAF (FT-PtL), sua importância é ainda maior, pois o H₂ define a própria base material e energética do e-combustível, que ainda precisa de eletricidade renovável rastreável e CO₂ capturado. Assim, para que o SAF produzido alcance elevada redução de emissões em ciclo de vida, será necessário garantir hidrogênio de baixa emissão de carbono.

O próprio documento metodológico do CORSIA reconhece que o hidrogênio é um insumo importante em diversas rotas de SAF e inclui a fonte de H₂ como variável de sensibilidade na avaliação de emissões das rotas elegíveis (ICAO, 2025a). Como o SAF é avaliado por sua intensidade de emissões ao longo do ciclo de vida, insumos energéticos e químicos utilizados na conversão, incluindo hidrogênio, eletricidade, calor e transporte, devem ser incorporados à intensidade de carbono do SAF (ICAO, 2025a)

Em 2024, a produção de Hidrogênio de baixo carbono ainda representava menos de 1% do total, evidenciando que a disponibilidade de H₂ efetivamente compatível com uma cadeia de SAF de baixa emissão ainda é limitada (IEA, 2025). No contexto brasileiro, a

abordagem de neutralidade tecnológica foi um princípio básico para a Administração Federal propor e estabelecer as bases do novo arcabouço regulatório do hidrogênio (Lei nº 14.948/2024), que define hidrogênio de baixas emissões como qualquer produção com emissões inferiores ou iguais a 7 kgCO₂e/kgH₂, considerando análise de ciclo de vida. Nesse escopo, podem ser incluídas rotas como eletrólise da água com eletricidade renovável, reforma ou gaseificação de biomassa, uso de biogás ou biometano, processamento de etanol e outros biocombustíveis, além de rotas fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono, desde que comprovem emissões compatíveis com o limite regulatório.

No caso do hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, o desempenho climático depende diretamente da origem da eletricidade. A eletricidade precisa ter intensidade de carbono suficientemente baixa para que o combustível sintético apresente vantagem climática frente ao combustível fóssil. Para o caso de e-querosene, essa faixa de referência é de aproximadamente 95 a 140 gCO₂e/kWh (IEA, 2024). No entanto, é necessário demonstrar que a eletricidade é renovável, rastreável.

No contexto brasileiro, a produção de hidrogênio de baixa intensidade de carbono pode representar uma vantagem competitiva para a cadeia de SAF. O Brasil possui uma matriz elétrica com elevada participação renovável, 88,2% de renovabilidade em 2024 (EPE, 2025). O setor elétrico brasileiro também apresentou baixa intensidade média de emissões, de 59,9 kgCO₂e/MWh (ou 59,9 gCO₂e/kWh) em 2024 (EPE, 2026a)⁵³. Essas condições criam uma base favorável para a produção de H₂ eletrolítico de baixa emissão, especialmente quando associada a contratos de energia renovável, rastreabilidade, adicionalidade e integração com polos industriais de SAF.

Além das emissões, todas as tecnologias de produção de hidrogênio requerem água como insumo (IRENA, 2023). A água é necessária não apenas na produção, mas também para resfriamento. A IRENA (2023) destaca que a avaliação da pegada hídrica do hidrogênio é especialmente importante em regiões sujeitas a estresse hídrico, embora a rota eletrolítica com renováveis seja, entre as rotas de hidrogênio de baixa emissão, uma das opções mais eficientes do ponto de vista de uso de água. A sustentabilidade das rotas depende de critérios adicionais, como captação responsável, controle de efluentes, monitoramento da qualidade da água e integração com instrumentos de gestão de bacias hidrográficas.

⁵³ [BEN 2025](#)

3.1.3 Fonte de CO₂

Como já citado, o carbono utilizado na rota PtL pode ser proveniente de diferentes fontes, como a captura de carbono a partir de fontes industriais fósseis (*carbon capture and storage* - CCS), captura de CO₂ biogênico (fontes biológicas e BECCS⁵⁴) e captura direta do ar ambiente (*direct air capture* - DAC).

A utilização do CO₂⁵⁵ como insumo para a produção de combustíveis é um conceito relativamente novo e não há um consenso entre os *stakeholders* da fonte mais adequada para ser utilizada na produção de e-fuels (THE ROYAL SOCIETY, 2019). Cada possibilidade se diferencia em relação a critérios de custo, escalabilidade a longo prazo, disponibilidade regional, intensidade de GEE, inevitabilidade da emissão e certificação (THE ROYAL SOCIETY, 2019).

Para os e-combustíveis serem soluções de descarbonização é fundamental que a utilização de carbono na produção destes combustíveis não provoque emissões líquidas adicionais na atmosfera⁵⁶ (THE ROYAL SOCIETY, 2019). Para que o e-SAF seja considerado combustível sintético de baixa emissão, o CO₂ utilizado precisa ser rastreável, certificado e compatível com critérios de sustentabilidade.

O uso de CO₂ fóssil capturado em fontes industriais reduz emissões em relação ao cenário sem captura⁵⁷. Por outro lado, a DAC⁵⁸ ou o uso de CO₂ biogênico⁵⁹ tendem a apresentar melhor desempenho ambiental, embora ainda estejam associados a custos elevados e menor disponibilidade em escala.

54 BECCS (Biobased Energy, Carbon Capture & Storage) - CO₂ capturado é permanentemente sequestrado em possíveis locais geológicos de armazenamento de CO₂, é uma tecnologia de emissões negativas

55 A utilização de CO₂ já é utilizada em escala industrial na indústria química, como de fertilizantes, plástico, fabricação de borracha e alimentos e bebidas (bebidas gaseificadas).

56 Muitas vezes são denominados de dióxido de carbono "desfossilizado" por ser proveniente de processos que não adicionam carbono fóssil novo à atmosfera.

57 Na produção de e-combustíveis a partir do carbono capturado de fontes industriais (indústrias de cimento, papel, ferro, refinamento de gás natural, usinas de energia e processos industriais pesados), o processo de captura permite o "reaproveitamento/reciclagem" do CO. As reduções de emissões são contabilizadas quando esses combustíveis substituem fontes fósseis de energia, isto é não produzem e-fuels com balanço de emissões neutro por si só. O processo não seria neutro em carbono, apenas reduziria as emissões comparado à liberação direta. O CO₂ é "reciclado" e são alcançadas reduções de emissões que quando os e-combustíveis substituem os combustíveis de origem fóssil.

58 Captura direta do ar da atmosfera: não está restrita geograficamente à proximidade de fontes de CO₂ e permite a obtenção de carbono diretamente da atmosfera independentemente da localização de fontes industriais ou biogênicas específica. Permitindo uma produção em larga escala de CO₂, sem depender de emissões em locais específicos, tornando-a uma solução de longo prazo escalável (THE ROYAL SOCIETY, 2019). No entanto, essa tecnologia ainda está em estágio inicial de comercialização e apresenta um custo elevado.

59 Possibilita a criação de e-fuels com emissões neutras por si só. O CO₂ emitido durante a combustão dos e-combustíveis é teoricamente igual ao CO₂ absorvido devido à sua produção (NEMMOUR et al., 2023; UECKERDT et al., 2021). Adicionalmente, quando o e-fuel proveniente do CO₂ biogênico substitui um derivado fóssil, pode ser contabilizado como negativo.

3.1.4 Outras Fontes

Este grupo inclui resíduos sólidos urbanos (RSU), gases industriais como CO, misturas CO/H₂ (*syngas*) e gases de combustão ricos em CO₂, utilizados em rotas de conversão termoquímica ou de síntese de combustíveis (EPE, 2024).

Os impactos ambientais variam amplamente conforme a origem do fluxo de carbono. No caso dos RSU, os impactos podem incluir emissões associadas à coleta, triagem e tratamento de resíduos, além da geração de poluentes atmosféricos durante processos de conversão termoquímica. Contudo, há potencial de mitigação de impactos quando esses resíduos são desviados de aterros sanitários, reduzindo emissões de metano (CH₄).

Para gases industriais e correntes de CO e CO/H₂, os impactos estão associados ao processo industrial de origem, sendo geralmente considerados subprodutos de processos energéticos ou metalúrgicos. Nesses casos, o principal benefício ambiental decorre do aproveitamento de fluxos residuais de carbono que seriam emitidos para a atmosfera.

Já os gases de combustão ricos em CO₂ podem ser utilizados como fonte de carbono em processos de síntese, especialmente quando associados a tecnologias de captura e utilização de carbono (CCU). O desempenho ambiental depende diretamente da origem do CO₂ e da intensidade energética do processo de conversão.

3.2 Comparação de Impactos Ambientais

A comparação considera não apenas o desempenho climático, medido principalmente pela redução de emissões de GEE ao longo do ciclo de vida, mas também outras dimensões ambientais relevantes, como uso da terra, biodiversidade, consumo hídrico, eutrofização, acidificação, material particulado e consumo de energia. O benefício ambiental do SAF depende fortemente da origem da matéria-prima, da intensidade energética do processo, da matriz utilizada para geração de hidrogênio e calor, e das práticas de manejo e rastreabilidade adotadas ao longo da cadeia produtiva.

Os principais impactos ambientais potenciais associados às diferentes categorias de matérias-primas e rotas tecnológicas de produção de SAF são sintetizados na Tabela 2. Esta compilação apresenta um esforço para a discussão dos impactos ambientais além dos impactos climáticos. Contudo, para uma discussão mais detalhada das rotas HEFA e ATJ globalmente, consideram-se apenas dados do sistema CORSIA e, por esse motivo, foca-se apenas no potencial de aquecimento global e mudança do solo.



Tabela 2 - Impactos ambientais e vantagens dos SAFs por categoria e rota de produção.

Matéria-prima	Rotas associadas	Clima	Uso da terra	Biodiversidade	Água	Eutrofização	Acidificação	Formação de ozônio fotoquímico	Material particulado	Consumo de energia
Óleos vegetais, gorduras animais e óleo de cozinha usado	HEFA-SPK, CHJ, coprocessamento de óleos e gorduras	Melhor desempenho quando a matéria-prima é residual; piora com óleo virgem e matriz fóssil.	Pode haver expansão agrícola e risco de mudança indireta no uso da terra.	A expansão agrícola pode pressionar ecossistemas e habitats.	Demanda hídrica moderada, concentrada na etapa agrícola.	Pode ocorrer devido ao uso de fertilizantes e geração de efluentes.	Associada às emissões de NOx e SOx na cadeia produtiva.	Relacionada às emissões atmosféricas da cadeia industrial.	Associada à combustão, hidrogenação e emissões do processo.	Moderado a elevado, sobretudo na hidrogenação.
Etanol e isobutanol de biomassa	ATJ-SPK, ATJ-SKA	Depende da eficiência agrícola e da conversão catalítica.	Pode haver pressão sobre cadeias agrícolas dedicadas.	A expansão agrícola pode pressionar ecossistemas e habitats.	Consumo moderado a elevado, especialmente na produção do álcool.	Pode ocorrer por fertilizantes e efluentes da produção agrícola.	Ligada às emissões da cadeia e ao uso de insumos.	Relacionada às emissões do processo de conversão.	Associada à conversão catalítica e ao processamento.	Elevado na conversão química.
Biomassa lignocelulósica e resíduos	FT-SPK, FT-SPK/A, hidrocarbonetos via FT	Potencial favorável com uso de resíduos; piora com biomassa dedicada e energia fóssil.	Impacto relacionado ao cultivo dedicado.	Pode reduzir pressão sobre áreas agrícolas, mas depende da origem da biomassa.	Consumo moderado no processamento industrial.	Pode ocorrer por insumos agrícolas e gestão de resíduos.	Emissões de NOx e SOx associadas à gaseificação e síntese.	Emissões de CO, NOx e compostos orgânicos na cadeia.	Pode haver particulados na gaseificação e limpeza do gás.	Elevado, devido à gaseificação e síntese.
Microalgas	HC-HEFA-SPK	Alto consumo energético pode reduzir o benefício climático.	Baixa competição com terras agrícolas; uso de áreas não agrícolas.	Menor pressão direta sobre ecossistemas terrestres.	Alto consumo de água.	Pode ocorrer descarga de nutrientes e efluentes.	Relacionada às emissões do cultivo e do processo.	Emissões da etapa de cultivo e extração.	Baixo a moderado, dependendo do sistema.	Muito elevado no cultivo, colheita e extração.
Hidrogênio e energia de processo	HEFA, CHJ, ATJ e PtL	Hidrogênio fóssil eleva as emissões do	Impacto indireto associado	Efeito indireto, conforme a origem	Demanda variável conforme a	Pode ocorrer na cadeia	Emissões relevantes quando o	Relacionada às emissões da produção	Pode ser significativa	Categoria crítica e determinante



Matéria-prima	Rotas associadas	Clima	Uso da terra	Biodiversidade	Água	Eutrofização	Acidificação	Formação de ozônio fotoquímico	Material particulado	Consumo de energia
		ciclo de vida; hidrogênio de baixo carbono melhora o desempenho.	à matriz energética e à cadeia produtiva.	da energia e da matéria-prima.	tecnologia, que pode ser crítica em regiões de elevado estresse hídrico.	energética e industrial.	hidrogênio é fóssil.	de hidrogênio e do refino.	dependendo do processo.	para o resultado final.
Açúcares fermentáveis	SIP	Emissões ligadas ao cultivo, fermentação e processamento.	Pode haver competição com alimentos e pressão sobre áreas agrícolas.	A expansão agrícola pode pressionar ecossistemas e habitats	Alto consumo de água na agricultura e na fermentação.	Categoria sensível, ligada a fertilizantes e geração de efluentes.	Associada ao uso de insumos agrícolas e emissões da cadeia.	Relacionada aos gases emitidos no processamento.	Baixo a moderado, conforme controle industrial.	Menor demanda térmica, mas ainda relevante.

Fonte: elaboração própria.

A avaliação ambiental de SAF disponibilizada no sistema CORSIA da ICAO consiste em avaliar o indicador LCEF (*Life Cycle Emissions Factor*, ou fator de emissão de ciclo de vida), que incorpora o potencial de aquecimento global (isto é, as emissões totais de GEE no ciclo de vida, chamado de *core LCA value*) somado ao ILUC (emissões pelas mudanças indiretas do uso da terra). O impacto total é dado pela expressão $LCEF = \text{core LCA value} + \text{ILUC} - \text{créditos de emissão}$. Conforme amplamente discutido anteriormente, não são consideradas outras categorias de impacto nesse sistema.

O potencial de aquecimento global é expresso através do *coreLCA* em $\text{gCO}_2\text{e/MJ}$ (ICAO, 2025b). O ILUC também na mesma unidade ($\text{gCO}_2\text{e/MJ}$) do potencial de aquecimento global para garantir a normalização de todas as componentes do ciclo de vida numa base comum. Os créditos de emissão seguem essas unidades e representam a quantidade de emissões evitadas ou removidas por unidade de energia produzida. A Tabela 3 consolida os impactos ambientais disponibilizados pelo CORSIA para as rotas HEFA e ATJ com base em diferentes matérias-primas globalmente.

A rota HEFA tem elevada maturidade tecnológica e implementação comercial em escala industrial. No entanto, sua expansão é condicionada pela disponibilidade limitada de matérias-primas lipídicas, o que impõe restrições estruturais importantes no contexto brasileiro, especialmente quando considerada a competição com outros usos desses insumos (EPE, 2024).

Contudo, essa rota apresenta elevada variabilidade de desempenho climático, dependendo fortemente do tipo de matéria-prima utilizada. Combustíveis produzidos a partir de óleos residuais, como óleo de cozinha usado, apresentam intensidades de emissão da ordem de $13,9 \text{ gCO}_2\text{e/MJ}$, enquanto rotas baseadas em óleo de palma podem atingir valores superiores a $96,1 \text{ gCO}_2\text{e/MJ}$, devido principalmente a impactos associados ao uso da terra e emissões indiretas do ciclo agrícola (ICAO, 2025b; ISCC, 2023). No Brasil, a produção a partir da soja pode atingir aproximadamente $61,1 \text{ gCO}_2\text{e/MJ}$, devido à elevada contribuição aos impactos associados ao uso da terra.

Tabela 3 - Comparação da performance ambiental das rotas HEFA e ATJ⁶⁰

Rota	Combustível/ Matéria-prima	Região	coreLCA ¹	ILUC ²	Créditos ³	LCEF
			gCO ₂ e/MJ			
HEFA	Óleo de cozinha usado (UCO)	Global	13,9	0,0	0,0	13,9
	Gordura animal (sebo)	Global	22,5	0,0	0,0	22,5
	Destilado de ácidos graxos de palma	Global	20,7	0,0	0,0	20,7
	Óleo de milho	Global	17,2	0,0	0,0	17,2
	Óleo de soja	EUA	40,4	22,5	0,0	62,9
	Óleo de soja	Brasil	40,4	20,7	0,0	61,1
	Óleo de palma (sistema fechado de lagoas)	Malásia/Indonésia	37,4	36,6	0,0	74
	Óleo de palma (sistema aberto de lagoas)	Malásia/Indonésia	60,0	36,1	0,0	96,1
	Carinata (Brassica carinata)	EUA	34,4	-16,1	0,0	18,3
	Carinata (Brassica carinata)	Brasil	34,4	-14,6	0,0	19,8
ATJ	Etanol de cana-de-açúcar	Brasil	24,1-41	8,7-11	0,0	15,4-30
	Etanol de milho (grão)	EUA	54,1	18,3	0,0	72,4
	Etanol de milho (grão)	Brasil	54,1 ⁴	9,3	0,0	63,44
	Resíduos agrícolas	Global	24,6-39,7	0,0	0,0	24,6-39,7
	Resíduos florestais	Global	24,9-31,8	0,0	0,0	24,9-31,8
	Miscanthus	EUA	28,3-32,1	-40,8	0,0	-40,8
	Miscanthus	União Europeia	28,3-32,1	-11,8	0,0	-11,8
	Switchgrass	EUA	33,2	5,7	0,0	38,9

¹ Faixa de valores utilizados de plantas independentes (*Standalone*) ou integradas

² valor mais recente, sem restrições temporais quanto ao seu uso. O outro valor só pode ser utilizado até 2029.

³ O valor dos créditos é opcional, não sendo fornecidos como default. Portanto, foram considerados zero para todos os casos

⁴ Valor disponível referente apenas ao EUA. O uso de cavaco de madeira, resíduos florestais ou outras biomassas renováveis como fonte térmica poderia reduzir o valor de *core LCA* do etanol de milho brasileiro e, consequentemente, a intensidade de carbono do SAF produzido pela rota ATJ.

Fonte: elaboração própria a partir de fatores consolidados pela ICAO (2025b)

A rota ATJ possui forte integração à cadeia sucroenergética baseada na cana-de-açúcar. Como já comentado, essa característica confere ao Brasil uma vantagem

⁶⁰ O valor padrão de referência (baseline default) estabelecido pelo CORSIA para o QAV fóssil convencional é de 89 gCO₂e/MJ

comparativa relevante, dado o elevado grau de consolidação da produção de etanol e sua integração com sistemas energéticos eficientes. A rota ATJ apresenta potencial de expansão via etanol de milho e etanol de segunda geração, ampliando a disponibilidade de matéria-prima sem necessidade de expansão de área agrícola (EPE, 2024; ANAC, 2025).

A rota ATJ baseada em etanol de cana-de-açúcar de segunda geração (2G)⁶¹ ainda é menos explorada na literatura científica quando comparada às rotas convencionais de primeira geração. Contudo, o 2G, na produção de etanol, pode reduzir a necessidade de expansão adicional de uso da terra para a produção incremental de combustível em 80 a 100% e diminuir a intensidade de carbono em até 30% em relação ao 1G (Maga et al., 2019). O sistema integrado 1G+2G pode reduzir o uso de terra em até 40% e a intensidade de carbono em até 30% (Maga et al., 2019). Nesse sentido, é possível inferir que melhorias de desempenho ambiental semelhantes poderiam ser para a produção de SAF pela rota ATJ a partir de etanol de cana-de-açúcar de segunda geração.

A rota ATJ baseada em etanol de milho apresenta potencial adicional de redução das emissões de GEE quando associada a sistemas produtivos de baixa intensidade de carbono. No caso brasileiro, destaca-se o milho de segunda safra (safrinha), cultivado após a soja na mesma área agrícola, caracterizando um sistema de cultivo sequencial (*sequential cropping*) que aumenta a produção sem expansão proporcional da área cultivada.

A relevância desse sistema passou a ser reconhecida pela metodologia do CORSIA, que incorporou a intensidade de múltiplos cultivos (*multi-cropping*) na modelagem dos impactos de mudança indireta do uso da terra (ICAO, 2025a). Como resultado, os valores padrão de emissões do CORSIA passaram a incluir uma categoria específica para milho produzido sob cultivo sequencial no Brasil, à qual foi atribuído um valor de ILUC de 9,3 gCO₂e/MJ (ICAO, 2025b).

Embora a metodologia não atribua explicitamente essa redução à intensificação produtiva, o resultado indica que sistemas agrícolas capazes de aumentar a produção sem expansão proporcional da área cultivada estão alinhados aos princípios das *Low LUC Risk Practices* (LLRP - práticas de baixo risco de mudança no uso da terra)⁶², que

⁶¹ O etanol de primeira geração (1G) é produzido a partir do caldo da cana-de-açúcar, enquanto o etanol de segunda geração (2G) utiliza bagaço e palha. O sistema integrado 1G+2G combina ambas as rotas.

⁶² Práticas de Baixo Risco de Mudança no Uso da Terra (*Low LUC Risk Practices* – LLRP) são práticas reconhecidas pelo CORSIA que permitem aumentar a oferta de matérias-primas para combustíveis sustentáveis sem expansão da área agrícola, reduzindo ou eliminando os impactos da mudança indireta do uso da terra. Essas práticas incluem ganhos de produtividade, cultivo sequencial, redução de perdas pós-colheita e utilização de terras degradadas ou subutilizadas.

buscam reduzir os impactos da mudança indireta do uso da terra por meio do aumento da produtividade em áreas já cultivadas ou da utilização de terras subutilizadas. Assim, quando comparado ao valor de ILUC da produção de ATJ a partir de milho nos Estados Unidos (22,1 gCO₂e/MJ), o milho produzido sob cultivo sequencial no Brasil apresenta uma redução de aproximadamente 59%, evidenciando o potencial desse sistema.

Adicionalmente, existem oportunidades de redução das emissões associadas ao ciclo de vida do SAF por meio da descarbonização do processo industrial de produção de etanol. Diversos estudos indicam que a substituição de combustíveis fósseis por biomassa para geração de calor e eletricidade pode reduzir significativamente as emissões associadas à produção de etanol, especialmente quando há aproveitamento energético integrado e cogeração (Kaliyan; Morey; Tiffany, 2011; Yin et al., 2024). Nesse contexto, o uso de cavaco de madeira, resíduos florestais ou outras biomassas renováveis como fonte térmica poderia reduzir o valor de *core LCA* do etanol de milho brasileiro e, conseqüentemente, a intensidade de carbono do SAF produzido pela rota ATJ.

No Centro-Oeste brasileiro, a utilização desse sistema para a produção de etanol pode evitar a expansão de aproximadamente 160 mil hectares por cada bilhão de litros de etanol produzido, o que corresponde a uma redução de até 100% na necessidade de expansão adicional de uso da terra para a produção incremental de combustível (GURGEL et al., 2024). Em termos de emissões, resultados de modelagem integrada para o contexto brasileiro sugerem que esse sistema pode reduzir emissões de gases de efeito estufa em até 60% (GURGEL et al., 2024). Dessa maneira, esses resultados indicam que a produção de SAF a partir de milho de segunda safra pode gerar benefícios ambientais relevantes.

Como já citado, a comparação da performance ambiental das rotas de produção de SAF evidencia que o desempenho depende da natureza da matéria-prima, da intensidade energética dos processos e da disponibilidade de insumos de baixo carbono. Rotas como HEFA apresentam bons resultados quando baseadas em resíduos lipídicos, mas desempenho significativamente inferior quando associadas a óleos vegetais com elevados impactos de uso da terra. A rota ATJ também apresenta grande variabilidade,

Quando devidamente verificadas por esquemas de certificação aprovados pela ICAO, podem receber valor de ILUC igual a zero, desde que comprovem aumento líquido da produção por unidade de área sem induzir a conversão de novas terras. Atualizações recentes da metodologia do CORSIA também passaram a reconhecer explicitamente os efeitos da intensificação agrícola e dos sistemas de cultivo sequencial na modelagem dos impactos de ILUC (ICAO, 2025a).

com melhores resultados quando vinculada a sistemas produtivos mais eficientes e com menor pressão sobre a expansão agrícola.

Contudo, ainda existem poucos estudos para o contexto brasileiro, especialmente para rotas emergentes e novas configurações produtivas, indicando a necessidade de aprofundamento das análises em condições reais de operação. Além disso, no contexto da transição energética, a produção de SAF tende a se integrar progressivamente a outros sistemas energéticos, incluindo a bioenergia, o hidrogênio de baixo carbono e a captura e utilização de carbono. Essa integração pode ampliar as oportunidades de sinergia entre setores, aumentando a eficiência no uso de recursos e contribuir para a redução das emissões ao longo do ciclo de vida dos SAF, potencializando seus benefícios ambientais associados à descarbonização da aviação.

Nesse cenário, rotas menos desenvolvidas, como a FT a partir de biomassa (FT-BtL), podem adquirir maior relevância estratégica no médio e longo prazo devido à sua flexibilidade no uso de resíduos e biomassa lignocelulósica. Além disso, rotas baseadas em resíduos, especialmente aquelas associadas à síntese FT, apresentam alguns dos menores valores de intensidade de emissões entre os combustíveis elegíveis ao CORSIA, variando entre 5,2 e 7,7 gCO₂e/MJ (ICAO, 2025c).

Paralelamente, a rota FT-PtL, que utiliza hidrogênio de baixo carbono e CO₂ capturado para a produção de combustíveis sintéticos (e-SAF), destaca-se pelo elevado potencial de descarbonização de longo prazo do setor aéreo. Contudo, seu desempenho ambiental e econômico depende fortemente da disponibilidade de eletricidade de baixa intensidade de carbono e de fontes sustentáveis de CO₂ (Captura direta de ar, pós combustão ou CO₂ biogênico). Referências indicam faixas entre 1 gCO₂e/MJ a 28 gCO₂e/MJ⁶³ (Micheli et al, 2022) com captura direta de ar e eletricidade proveniente de solar ou eólica, outras referências indicam faixas de 10,8-31,5 gCO₂e/MJ para cenários de captura pós-combustão biogênica, mas mínimo de 78 gCO₂e/MJ para captura de carbono fóssil (Bell et al, 2025). Bell et al (2025) afirmam que para que a intensidade de carbono dos SAFs via PtL atinja a redução mínima de 70%, os fatores de emissão da eletricidade utilizada devem situar-se entre 112 e 168 gCO₂e/kWh, sabe-se que o setor elétrico brasileiro emitiu, em média, apenas 64,8g CO₂ eq/kWh em 2025 (EPE, 2026).

⁶³ GWP-100 do querosene PtL produzido via HTFT ou LTFT, combinado com DAC e utilizando eletricidade de origem fotovoltaica ou eólica.

4. Estudo Comparativo entre as Rotas HEFA e ATJ Para Produção de SAF

Em termos de eficiência produtiva, a rota HEFA-SPK tende a apresentar um desempenho superior na comparação com a ATJ-SPK. A conversão típica da HEFA, usando como referência a literatura disponível, requer cerca de 1,2 tonelada de óleo vegetal para a produção de 1 tonelada de combustível, com valores de 1.025 L/t para óleo de cozinha usado, 1.060 L/t para óleo de soja e 1.111 L/t para óleo de palma. Para a rota ATJ baseada em etanol, os rendimentos reportados variam conforme a matéria-prima, com valores de 321 L/t para resíduos agrícolas, 432 L/t para grãos de milho e 580 L/t para cana-de-açúcar⁶⁴. Em termos comparativos, a HEFA apresenta maior eficiência global de conversão, enquanto a ATJ mostra maior sensibilidade à matéria-prima e ao arranjo produtivo (NG; FAROOQ; YANG, 2021).

No entanto, é preciso destacar que esse diferencial se refere a uma maior eficiência de conversão em combustível, e não a maior produção de SAF em si. O processo da rota HEFA gera múltiplas correntes, incluindo propano, gases leves, gasolina, querosene e diesel. A distribuição entre essas frações depende do refino subsequente e das condições operacionais adotadas. Assim, a vantagem produtiva da HEFA não significa conversão prioritária em combustível de aviação, mas maior rendimento global da carga processada (NG; FAROOQ; YANG, 2021).

No que diz respeito à viabilidade econômica, a literatura indica que a HEFA-SPK tende a apresentar menor custo de referência entre as rotas mais maduras, com faixa aproximada de US\$ 0,5/L a US\$ 2,0/L. Essa posição está associada à maturidade tecnológica, ao maior rendimento de conversão de matérias-primas lipídicas e à possibilidade de aproveitamento de infraestrutura de hidrocessamento. Ainda assim, a competitividade da rota depende fortemente do custo, da disponibilidade e da certificação de óleos, gorduras e resíduos oleosos, que também são demandados por outros mercados (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025).

A ATJ-SPK apresenta faixa de custo mais ampla, aproximadamente entre US\$ 0,75/L e US\$ 4,1/L, refletindo maior sensibilidade à matéria-prima, ao tipo de álcool intermediário, à configuração tecnológica e ao grau de integração industrial (WATSON et al., 2024; FAROOQ et al., 2025). Em relação à HEFA-SPK, tende a ser menos competitiva no curto prazo. Por outro lado, sua implantação não depende, necessariamente, de uma integração física entre a produção do álcool e a etapa de

⁶⁴ A comparação com a rota ATJ considera prioritariamente a vertente *ethanol-to-jet*. Valores referentes à rota *methanol-to-jet*, embora reportados na literatura, não foram incorporados à comparação principal por envolverem outro arranjo tecnológico.

conversão em SAF, permitindo uma maior liberdade na localização das plantas e do ponto de vista logístico. No caso de Goiás, a maior disponibilidade de etanol e a infraestrutura agroindustrial já instalada podem favorecer a atratividade relativa da rota ATJ-SPK.

Do ponto de vista regulatório, tanto a HEFA-SPK quanto a ATJ-SPK possuem arcabouço estruturado, com previsão de mistura de até 50% em volume nas resoluções ASTM D7566 (Anexos A2 e A5) e a ANP nº 997/2026. Ambas as rotas também estão diretamente relacionadas ao contexto de expansão dos SAFs e alinhadas com o CORSIA e com o ProBioQAV.

A via ATJ-SKA traz, no entanto, um elemento adicional. A presença de aromáticos na formulação faz com que o combustível se aproxime mais do comportamento do querosene convencional, em especial com os componentes de vedação da aeronave. Assim, essa rota apresenta um grande potencial para ampliar os teores de uso de SAF nas misturas finais ou até mesmo substituir como 100% *plug-in*. Por conta disso, tende a ocupar posição relevante nas discussões futuras sobre eventual ampliação dos limites de mistura hoje permitidos. A etapa adicional de formação/incorporação de aromáticos, porém, tende a aumentar seus custos associados. Isso não altera o enquadramento regulatório atual, mas reduz uma restrição técnica que ainda pesa sobre rotas estritamente parafínicas (ANP, 2024; EPE, 2024).

Na rota HEFA, os riscos estão menos no processo industrial e mais na garantia de matéria-prima e na destinação comercial do produto. Uma vez que a produção depende de óleos residuais, como óleo de cozinha usado, o abastecimento passa por uma cadeia dispersa de coleta e transporte, o que dificulta o ganho de escala. Além disso, observa-se uma concorrência com o biodiesel e o diesel verde (HVO, *Hydrotreated Vegetable Oil*). Como esse mercado costuma oferecer uma saída já estabelecida e condições comerciais mais favoráveis, a tendência é que a refinaria priorize o modal rodoviário, e não a separação da fração voltada à aviação.

A rota ATJ ainda carrega mais incerteza industrial do que a HEFA. O desafio não está somente em uma etapa isolada, mas no funcionamento das etapas que convertem o álcool em querosene de aviação, ainda menos difundidas em escala comercial⁶⁵.

Do ponto de vista ambiental, o desempenho depende da natureza da matéria-prima, da intensidade energética dos processos e da disponibilidade de insumos de baixo

⁶⁵ As etapas de desidratação, oligomerização e hidrogenação ainda têm difusão industrial mais limitada, o que aumenta o risco de implantação em escala comercial (BAUEN et al., 2020).

carbono. Rotas HEFA apresentam bons resultados quando baseadas em resíduos lipídicos, mas desempenho significativamente inferior quando associadas a óleos vegetais com elevados impactos de uso da terra. A rota ATJ apresenta grande variabilidade, com melhores resultados quando vinculada a sistemas produtivos mais eficientes e com menor pressão sobre a expansão agrícola.

Além disso, a construção de um *cluster* de SAF em Goiás tem elevado potencial de geração de emprego⁶⁶ ao articular, em um mesmo território, atividades industriais, logísticas, agrícolas, laboratoriais e de serviços especializados.

No caso da rota HEFA, esse efeito tende a ser relevante porque sua cadeia produtiva mobiliza desde o fornecimento de matérias-primas lipídicas, como óleos vegetais e resíduos graxos, até etapas de pré-tratamento, refino, armazenamento e distribuição. Isso favorece a criação de empregos diretos na implantação e operação das plantas industriais, mas também de empregos indiretos e induzidos em transporte, manutenção, engenharia, controle de qualidade, certificação, obras civis e suporte técnico. Em Goiás, onde já há base agroindustrial consolidada e infraestrutura logística em expansão, a implantação de unidades HEFA pode dinamizar economias locais, ampliar a demanda por serviços empresariais e estimular a qualificação de mão de obra.

Já a rota ATJ apresenta um perfil de geração de empregos igualmente estratégico, com forte aderência às competências produtivas do estado, especialmente em função da relevância do setor sucroenergético goiano. Como essa rota converte álcoois em SAF, sua expansão pode agregar valor as cadeias já estabelecidas, estimulando investimentos em inovação, integração industrial e capacitação tecnológica. Além dos empregos associados à construção e operação das plantas ATJ, há potencial de fortalecimento de postos de trabalho qualificados em pesquisa, desenvolvimento, automação, catálise, operação química e monitoramento ambiental.

Em uma perspectiva de *cluster*, a convivência entre rotas como HEFA e ATJ amplia a densidade econômica do arranjo produtivo e diversifica oportunidades ocupacionais, pois combina atividades intensivas em capital e tecnologia com cadeias de suprimento capazes de irradiar benefícios para diferentes segmentos do território goiano.

⁶⁶ No próximo relatório do projeto será elaborado os resultados dos impactos no mercado de trabalho, com estimativa de empregos diretos e indiretos gerados pelo cluster (por exemplo, agricultura, indústria, serviços, logística, P&D) com a utilização da metodologia de matriz insumo-produto para estimativa de empregos

As rotas HEFA e ATJ são rotas complementares. A HEFA é mais madura, competitiva e adequada à expansão inicial da oferta de SAF, desde que haja disponibilidade certificada de óleos, gorduras e resíduos. A ATJ, embora ainda tenha maior custo e menor maturidade comercial, é estratégica para o estado por aproveitar a base sucroenergética e a produção regional de etanol. Assim, a HEFA tende a liderar o curto prazo, enquanto a ATJ pode fortalecer a diversificação tecnológica e o adensamento industrial do *cluster* no médio e longo prazo. A Tabela 4 apresenta as oportunidades e desafios para cada rota.

Tabela 4 - Rotas Tecnológicas oportunidades e desafios

Rotas	Oportunidades	Desafios
HEFA e HC-HEFA	Disponibilidade de matéria-prima em larga escala; Baixo teor de enxofre e de compostos aromáticos, além de elevados valores de cetano.	Desafio logístico para utilizar óleos e gorduras residuais; Processo intensivo em hidrogênio.
ATJ	Utiliza como matéria-prima bio-álcoois cuja tecnologia de produção já está consolidada; Ampla variedade de recursos disponíveis.	Disponibilidade de matéria-prima comprometida, pois bio-álcoois possuem mercado estabelecido no segmento de transporte rodoviário

Fonte: EPE, 2024b

5. Levantamento de Patentes

A análise de pedidos de patente é uma das etapas para compreender o desenvolvimento tecnológico associado aos SAFs. Esses documentos registram soluções técnicas submetidas à proteção em determinada localização e reúnem descrição da tecnologia, reivindicações, dados dos depositantes, países de depósito e situação legal. Esse tipo de informação permite acompanhar rotas em desenvolvimento, identificar titulares recorrentes e verificar mercados nos quais se buscou proteção (WIPO, 2026).

O levantamento foi organizado em torno das rotas de produção de SAF. A série de depósitos mostra quais tecnologias aparecem com maior frequência, quais matérias-primas estão associadas às invenções e quais países e entidades concentram parte dos pedidos.

A partir dessa base, são examinados os pedidos de patente no mundo, com detalhamento para o Brasil na sequência. Depois, são relacionadas as rotas com maior presença no levantamento às condições produtivas de Goiás, especialmente aquelas associadas à disponibilidade de biomassa, à produção de etanol e às cadeias agroindustriais do estado.

5.1 Metodologia e Bases Utilizadas

A análise de patentes foi estruturada a partir da consulta a diferentes fontes, desde informações tecnológicas às bases de dados especializadas em propriedade industrial, com o objetivo de identificar pedidos de patente relacionados à produção de SAF, mapear tendências e identificar os principais atores envolvidos no desenvolvimento dessas soluções. Foram consideradas, entre outras, bases como o Espacenet (Organização Europeia de Patentes), o Derwent Innovation (Clarivate Analytics) e o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI)⁶⁷.

As buscas foram orientadas por combinações de palavras-chave, classificações tecnológicas e termos associados às principais rotas de produção de SAF. A análise considerou informações sobre famílias de patentes, país de origem, órgãos oficiais, áreas tecnológicas, matérias-primas associadas e situação dos pedidos no Brasil.

⁶⁷ No documento do INPI, as buscas foram conduzidas em março de 2025 utilizando a base de dados de patente Derwent Innovation.

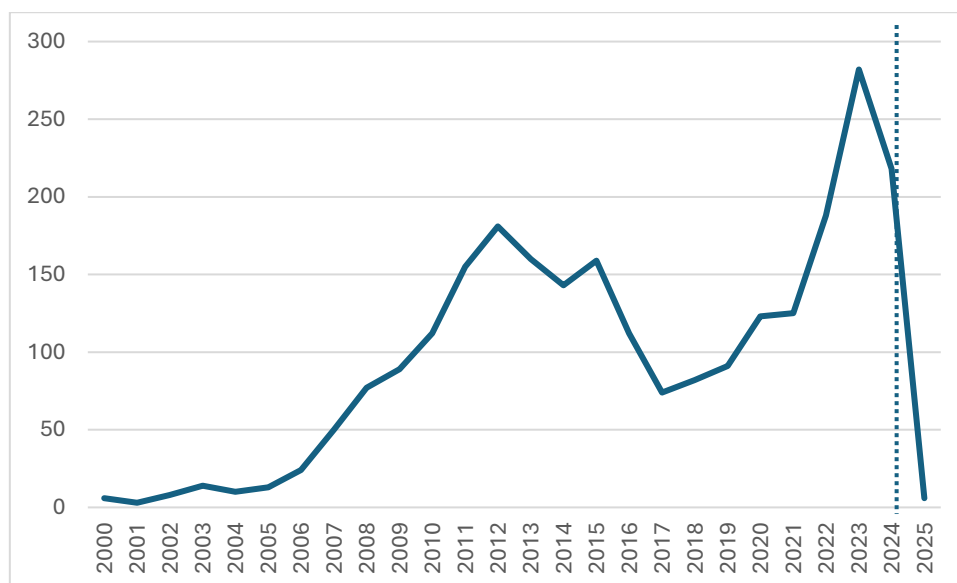
Além disso, a análise é importante para entender a origem das invenções dos mercados nos quais se buscou proteção tecnológica e sinaliza o interesse em proteger a tecnologia naquele território. Essa etapa busca identificar tendências de desenvolvimento, *players* ativos, concentração tecnológica, mercados prioritários de proteção e conexões com as cadeias produtivas relevantes para o Brasil e para o estado de Goiás.

5.2 Contexto Internacional dos Pedidos de Patente Relacionados a SAF

A transição energética do setor aéreo transformou os SAFs em um campo de competição tecnológica e industrial em escala global (EPE,2024). Embora sua expansão esteja associada à agenda de descarbonização da aviação, o desenvolvimento do SAF envolve também a disputa por rotas produtivas, domínio de processos industriais, acesso a matérias-primas, redução de custos e posicionamento em um mercado ainda em formação (EPE,2024). Nesse sentido, a evolução dos pedidos de patente permite observar a direção dos esforços de inovação e identificar quais países, empresas e áreas tecnológicas vêm concentrando maiores informações.

No levantamento, foram identificadas 2.505 famílias⁶⁸ de pedidos de patente relacionadas a SAF no mundo (INPI, 2026). A figura abaixo indica crescimento a partir do final da década de 2000 e retração após 2014, com volta do crescimento de forma mais consistente a partir de 2018. Esse movimento resultou em 282 novas invenções depositadas em 2023, maior valor anual observado na série. A retomada recente indica maior mobilização tecnológica em torno do SAF, em paralelo ao avanço de metas climáticas, instrumentos regulatórios e expectativas de formação de demanda para combustíveis de menor intensidade de carbono na aviação.

⁶⁸ O termo família refere-se ao conjunto de pedidos de patente relacionados a uma mesma invenção, depositados em diferentes países ou escritórios de propriedade industrial e vinculados por uma ou mais prioridades em comum. Assim, a contagem por famílias evita a dupla contagem de uma mesma invenção protegida em múltiplas jurisdições, sendo mais adequada para estimar o número de invenções distintas.



2024 e 2025 - os dados estão incompletos por conta dos prazos de sigilo (até 18 meses) associados aos pedidos de patente, com publicação oficial posterior ao fechamento da base.

Figura 13 - Evolução anual das invenções depositadas no mundo relacionadas a SAF

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

Há forte concentração na origem das invenções, nos Estados Unidos, que respondem por 46% das invenções identificadas, mantendo liderança histórica no desenvolvimento tecnológico associado ao SAF e na China, com 20%, mas com associados principalmente ao processamento de biomassa, incluindo resíduos e matérias-primas lipídicas (INPI, 2026). No período entre 2020 e 2025, houve ampliação da presença chinesa no setor, a sua atividade alcançou volumes comparáveis aos dos EUA, com cada um dos países respondendo por cerca de 30% das novas invenções nesse intervalo (INPI, 2026).

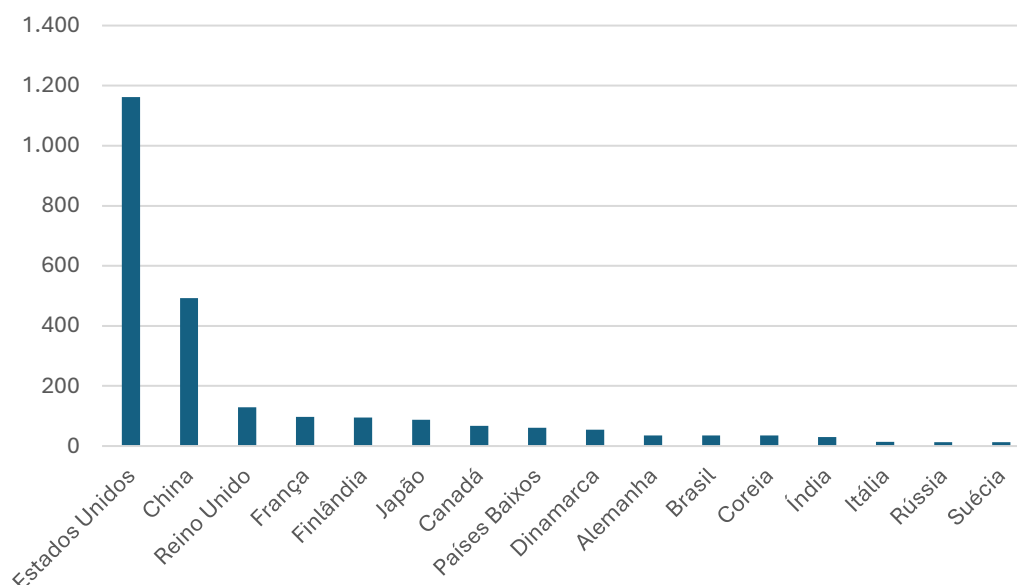


Figura 14 - Principais países de origem das invenções sobre SAF

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

Embora Estados Unidos e China concentrem a maior parte da atividade inventiva, outros países também apresentaram aceleração recente, ainda que partindo de bases menores. Reino Unido, Dinamarca, Coreia do Sul, Índia e Brasil aparecem entre os países com aumento relevante de depósitos no período mais recente. Esse movimento indica que o desenvolvimento de tecnologias de SAF não está restrito aos grandes polos de mercados tradicionais, como petróleo, gás e química, mas também em países que buscam posicionamento em rotas específicas.

A distribuição dos depósitos de patente revela os territórios considerados relevantes para proteção jurídica. Em termos globais, os Estados Unidos aparecem como o principal escritório de proteção, com 1.536 depósitos, seguidos pela via internacional do Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT), com 1.156, pela China, com 1.012, pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO), com 786, e pelo Canadá, com 508⁶⁹ (INPI, 2026).

⁶⁹ O PCT é uma via internacional de depósito, e não um escritório nacional; permite organizar a busca posterior de proteção em diferentes jurisdições. O EPO, por sua vez, é um escritório regional europeu, que centraliza o exame e pode dar origem à proteção em diferentes países da Europa. Por isso, ambos aparecem em posições elevadas no ranking sem corresponderem a mercados nacionais individuais (INPI, 2026).

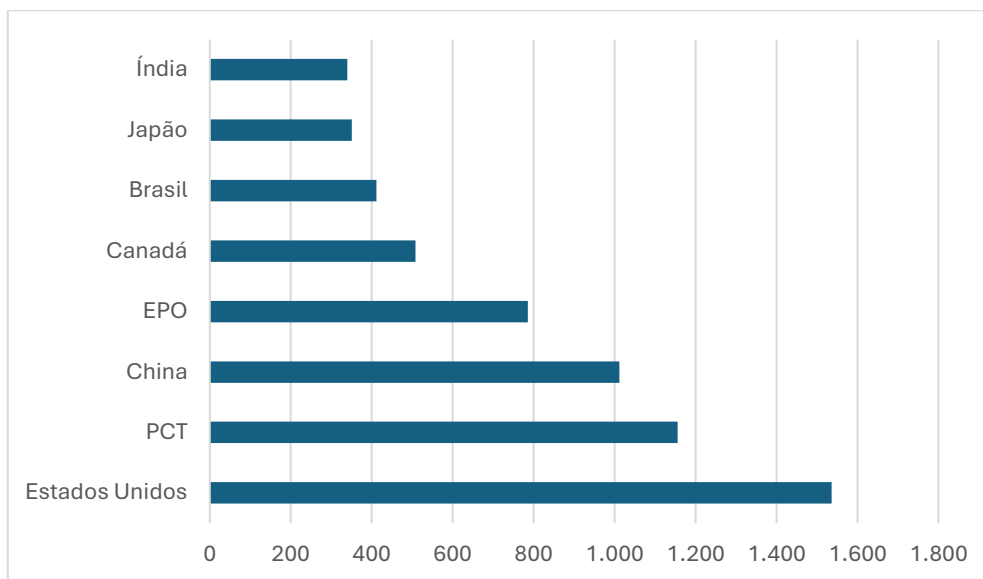


Figura 15 - Principais depósitos de patentes

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

O Brasil aparece na sequência, como sexto local mais procurado, equivalente a 16% das invenções identificadas no mundo (412 depósitos). Esse número aponta o país como um território atrativo dentro do contexto internacional, devido à escala potencial do mercado, assim como da disponibilidade de biomassa e da experiência acumulada em biocombustíveis. Com isso, o Brasil aparece mais como mercado estratégico para proteção tecnológica do que como origem das invenções.

O perfil dos maiores depositantes reforça a natureza industrial e intensiva em capital do desenvolvimento de SAF. Entre os principais titulares estão empresas dos setores de energia, óleo e gás, química, refino, tecnologia de processos e aviação, como Neste, Honeywell UOP, Rolls-Royce, Chevron/REG, ExxonMobil, Shell e Sinopec (INPI, 2026). Essa composição mostra que o SAF mobiliza competências industriais distintas, mas todas capazes de investimentos em larga escala.

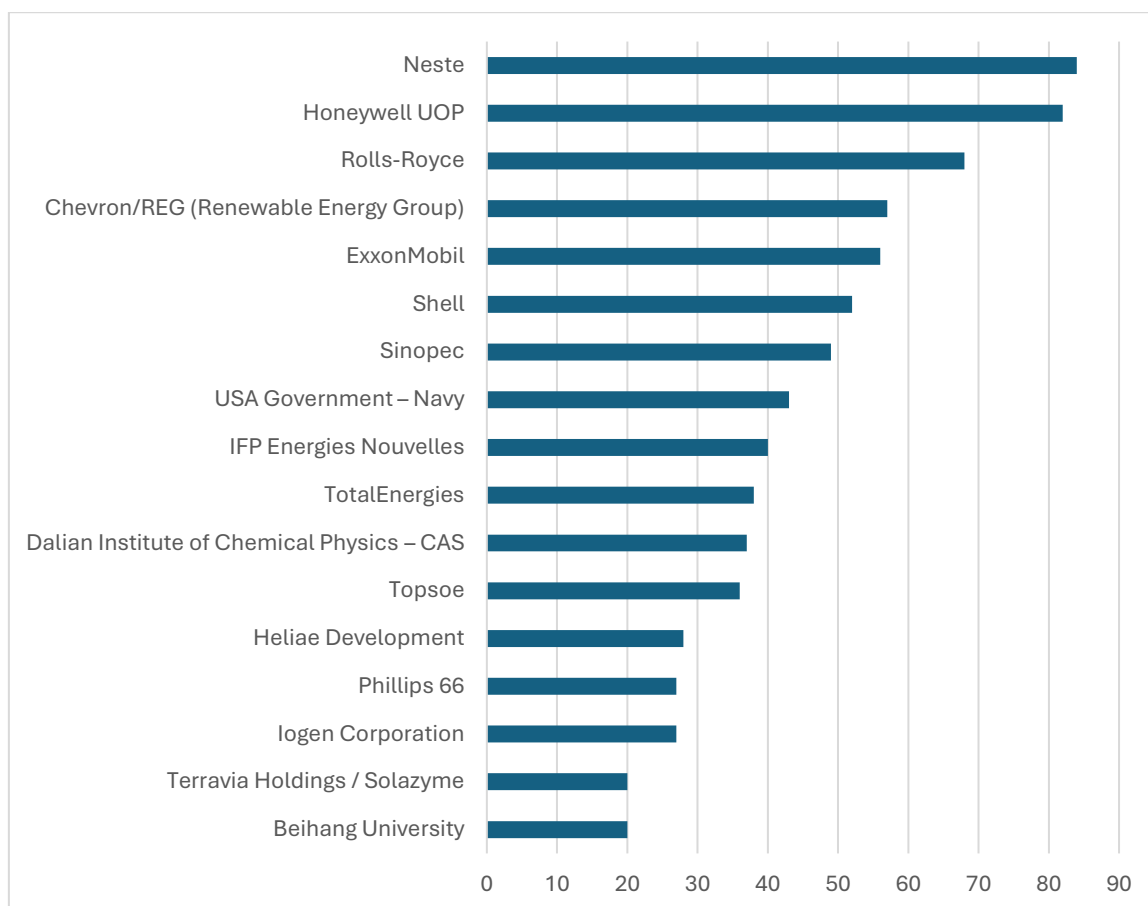


Figura 16 - Principais depositantes globais de patentes de SAF

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

A presença de instituições de pesquisa e centros tecnológicos entre os depositantes indica que parte das rotas ainda depende de desenvolvimento adicional para atingir escala comercial e competitividade econômica. Ao mesmo tempo, a atuação de grandes empresas com experiência em refino, hidroprocessamento e combustíveis líquidos sugere que a expansão do SAF não ocorrerá por tecnologias disruptivas, mas muito pela adaptação de estruturas industriais já existentes.

Quanto às áreas tecnológicas, predomina o processamento químico e bioquímico de biomassa, presente em aproximadamente 81% das 2.505 invenções analisadas (2.021 famílias de pedidos de patente). Também foram identificadas 478 invenções relacionadas a equipamentos de produção de combustíveis (19%), 303 ao reaproveitamento de resíduos de plástico ou borracha (12%), 273 a hidrogênio e e-fuels (11%) e 225 à mecânica de aviação (9%). Uma mesma invenção pode estar associada a mais de uma área tecnológica e, por isso, os percentuais não são mutuamente exclusivos.

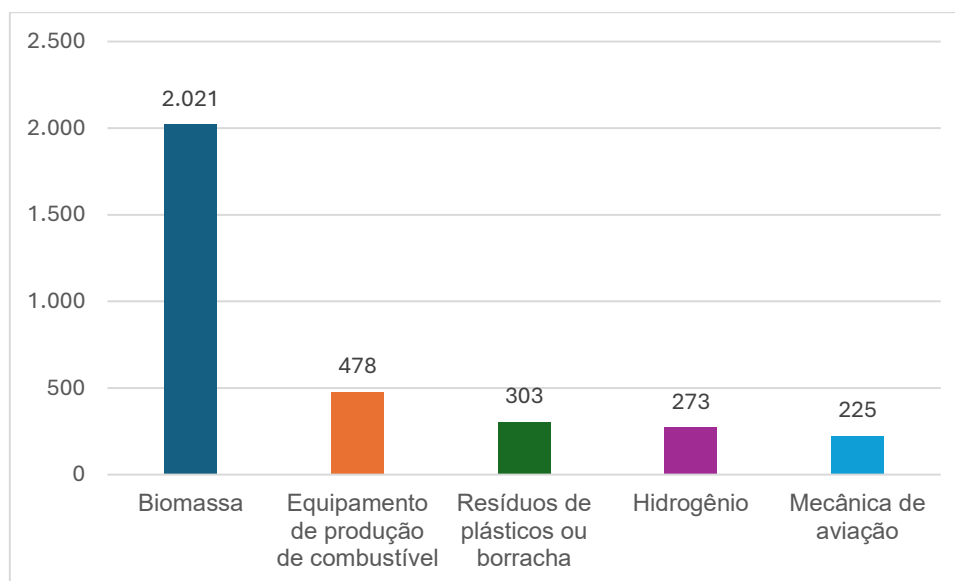


Figura 17 - Áreas tecnológicas das invenções associadas ao SAF

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

As patentes cobrem diferentes etapas da cadeia, incluindo seleção e pré-tratamento de matérias-primas, processos catalíticos, hidrotratamento, hidrocraqueamento, fermentação, gaseificação, produção de gás de síntese, equipamentos industriais, integração de unidades produtivas e soluções associadas ao uso do combustível em sistemas aeronáuticos. A diversidade tecnológica observada indica que ainda não há uma única trajetória para a produção de SAF em escala global, embora algumas rotas, em especial a HEFA, apresentem maior maturidade comercial (ICAO, 2023).

Dentro da categoria de biomassa, a vegetal é a mais recorrente (1.503 registros), seguida pelo uso de resíduos (1.072) (Figura 18). A presença crescente de resíduos aproxima a agenda de SAF de estratégias de economia circular, redução de intensidade de carbono e aproveitamento de fluxos secundários de cadeias agroindustriais, urbanas e industriais (ICAO, 2023). Os lipídios aparecem em 930 invenções e se relacionam às rotas baseadas em óleos e gorduras, como HEFA e hidroprocessamento. Os carboidratos, com 859 registros, se conectam a rotas baseadas em açúcares, amidos e biomassas lignocelulósicas, com destaque para ATJ e FT. Também se observa, em proporção menor, a presença de biomassa animal, como gorduras e sebo (357 registros) e biomassa de microrganismos (181) (INPI, 2026).

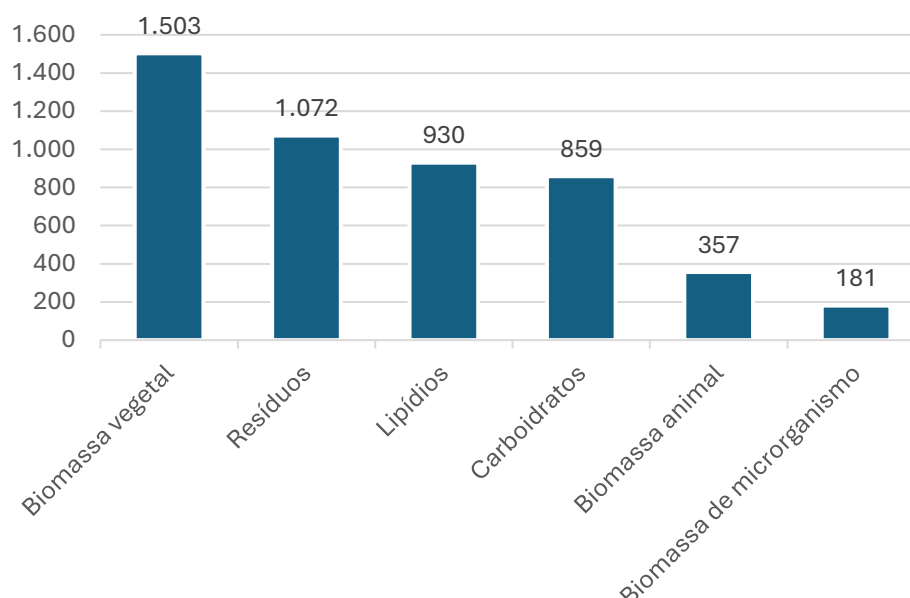


Figura 18 - Distribuição das invenções por tipos de biomassa

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

A partir das tendências observadas, a análise avança para o recorte nacional, diferenciando a geração local de tecnologia, a presença estrangeira no país e o papel de empresas nacionais no desenvolvimento de rotas específicas. Em seguida, o recorte estadual permitirá examinar de que forma os ativos produtivos de Goiás podem se conectar às rotas tecnológicas em expansão.

5.3 Contexto Nacional dos Pedidos de Patente Relacionados a SAF

O recorte nacional permite observar como o Brasil se insere dentro dessa dinâmica. A análise dos depósitos de patentes indica que o território brasileiro aparece menos como origem das tecnologias e mais como mercado estratégico para proteção, licenciamento e eventual produção.

No conjunto analisado, foram identificadas 412 famílias de pedidos de patente com ao menos um depósito no Brasil, totalizando 448 pedidos protocolados junto ao INPI. Houve crescimento a partir de 2006, com pico em 2011, seguido por período de redução. A retomada observada a partir de 2019 ocorre de forma mais moderada do que no cenário mundial, onde o crescimento recente foi mais intenso a partir de 2017 e alcançou novas máximas nos anos posteriores.

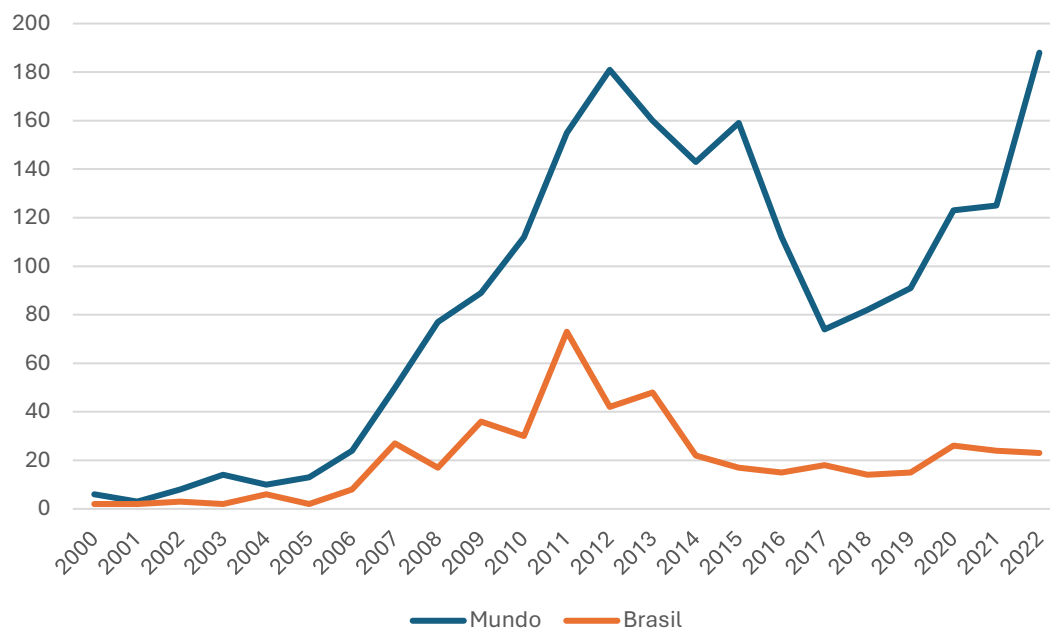


Figura 19 - Evolução dos pedidos de patente depositados no Brasil e das famílias de pedidos no mundo

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

No período analisado, cerca de 20% das invenções identificadas no mundo buscaram proteção no Brasil. Esse percentual foi maior no período inicial, chegando a 27% entre 2000 e 2013, e menor no intervalo posterior, com 14% entre 2014 e 2022. Parte dessa redução relativa está associada à mudança na composição global nos principais *players* envolvidos, que tende a concentrar seus pedidos em seus próprios territórios. Ademais, ressalta-se que há depositantes relevantes em nível global com presença reduzida ou inexistente entre os principais realizados no Brasil, como Rolls-Royce, ExxonMobil, Sinopec, Dalian Institute of Chemical Physics, logen Corporation, Phillips 66 e Beihang University (INPI, 2026).

De todo modo, cabe enfatizar que a maior parte dos pedidos depositados no Brasil é estrangeira. Os Estados Unidos respondem por 53% dos pedidos, seguidos por Finlândia (11%), Países Baixos (9%), e o próprio Brasil em quarto (7%). Essa composição mostra que o interesse de proteção no país está concentrado em empresas e instituições de países que já ocupam posição relevante no desenvolvimento global das tecnologias de SAF. Ao mesmo tempo, o percentual brasileiro indica que ainda há espaço para ampliação da geração nacional de tecnologias, sobretudo diante da base agrícola e da experiência em biocombustíveis.

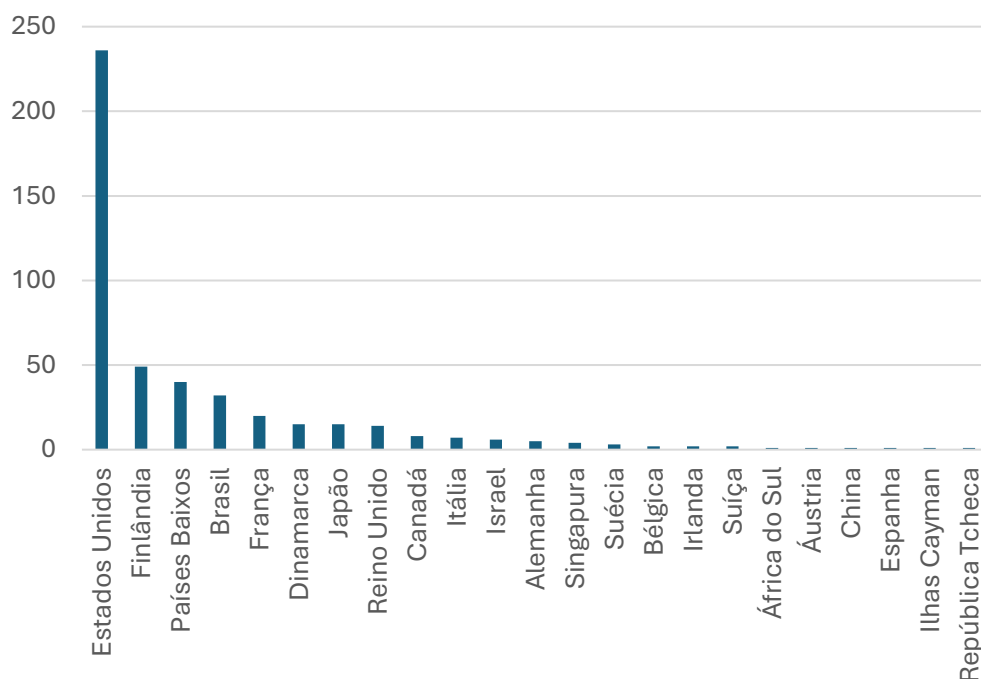


Figura 20 - País de origem dos depositantes dos pedidos de patente relacionados a SAF depositados no Brasil

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

As empresas com maior número de pedidos no Brasil são a Neste, da Finlândia, e a Shell, dos Países Baixos (Figura 21). A maior parte dos principais titulares⁷⁰ possui atuação consolidada em setores tradicionais, o que demonstra que o mercado brasileiro vem sendo monitorado por empresas com capacidade de proteção e exploração de tecnologias em escala (INPI, 2026).

⁷⁰ Também aparecem entre os principais titulares Honeywell UOP, BP, Heliae Development, IFP Energies Nouvelles, Petrobras, Chevron/REG, Terravia Holdings/Solazyme, UPM-Kymmene Corporation, JX Nippon Oil & Energy, Novozymes, TotalEnergies e Amyris.

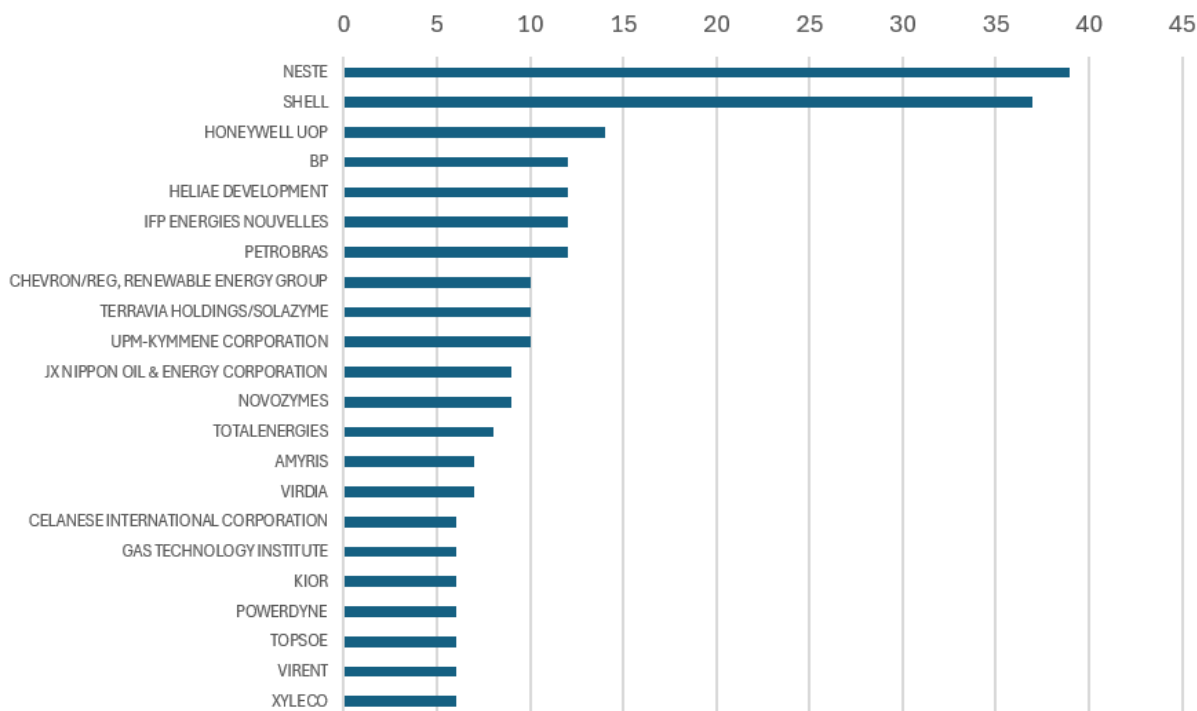


Figura 21 - Principais depositantes de pedidos de patente relacionados a SAF no Brasil

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

Dentre os principais depositantes, algumas empresas buscaram proteger no Brasil parcela relevante de seus portfólios globais. Neste, Shell, UPM-Kymmene Corporation, Terravia Holdings/Solazyme, Amyris, Novozymes e Virent Energy Systems depositaram no país mais de 40% das invenções identificadas em seus respectivos portfólios mundiais (INPI, 2026). No caso de BP, Petrobras, JX Nippon Oil & Energy e Powerdyne, esse percentual supera 80%. Esse dado sugere que, para determinados *players*, o Brasil aparece como território principal dentro da estratégia de proteção tecnológica (INPI, 2026).

A Petrobras é o único depositante brasileiro entre os principais no país. Dos 32 pedidos depositados, 12 pertencem à Petrobras. Sua atuação tecnológica está concentrada principalmente nas rotas HEFA e ATJ, o que se conecta ao papel da empresa na produção nacional de querosene de aviação e à possibilidade de incorporação gradual de combustíveis sustentáveis ao portfólio energético brasileiro.

Outro parâmetro relevante é que 14,5% dos pedidos depositados no Brasil (65) mencionam explicitamente as normas ASTM D7566 ou D1655. Essa referência aproxima as invenções dos requisitos técnicos usados na qualificação de combustíveis aeronáuticos. ASTM D7566 avalia quais tecnologias, em condições específicas, podem

produzir SAF puro dentro das especificações técnicas. Após a mistura com querosene convencional, o combustível é certificado pela ASTM D1655 (IATA, 2019). Entre os depositantes com maior número de pedidos contendo menções à certificação ASTM estão Shell, Neste, Amyris Biotechnologies e Petrobras (INPI, 2026).

Em termos tecnológicos, o processamento químico e bioquímico de biomassa também permanece como o principal eixo dos pedidos depositados no Brasil (88%) (INPI, 2026). Aparecem também tecnologias relacionadas a equipamentos de produção, resíduos de plástico ou borracha, hidrogênio e mecânica de aviação. A predominância da biomassa no recorte brasileiro está em linha com o perfil do país e da sua disponibilidade de matérias-primas agrícolas, resíduos e insumos de origem vegetal ou animal.

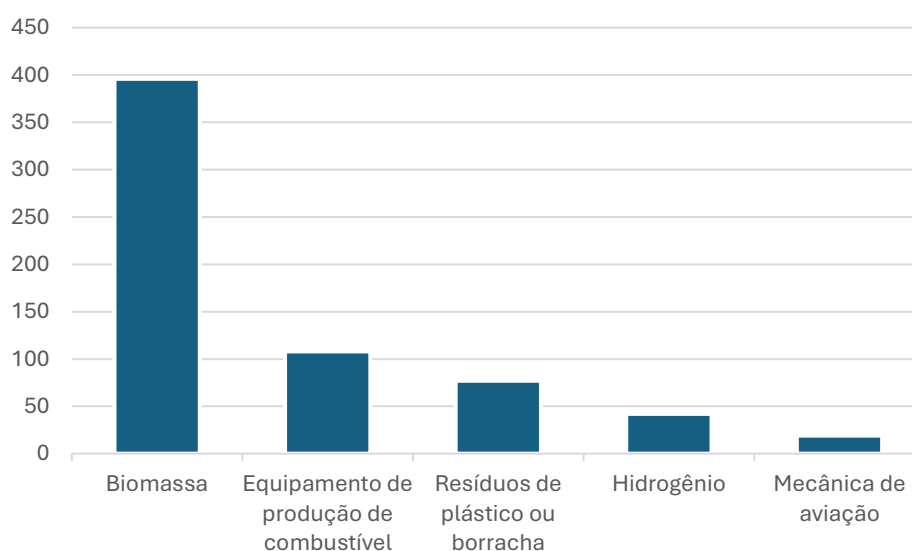


Figura 22 - Áreas tecnológicas das invenções associadas aos SAF depositadas no Brasil

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

Dentro das invenções associadas à biomassa, a vegetal aparece na maior parte dos pedidos depositados no Brasil, seguida pela biomassa animal e por matérias-primas derivadas de microrganismos. O uso de resíduos representa 20% das invenções analisadas. Shell e Neste são as principais depositantes no Brasil relacionados ao uso de resíduos, com 26 e 20 pedidos, respectivamente (INPI, 2026).

Análise de rotas tecnológicas
 Desenvolvimento do Cluster Produtivo Inovador de SAF em Goiás

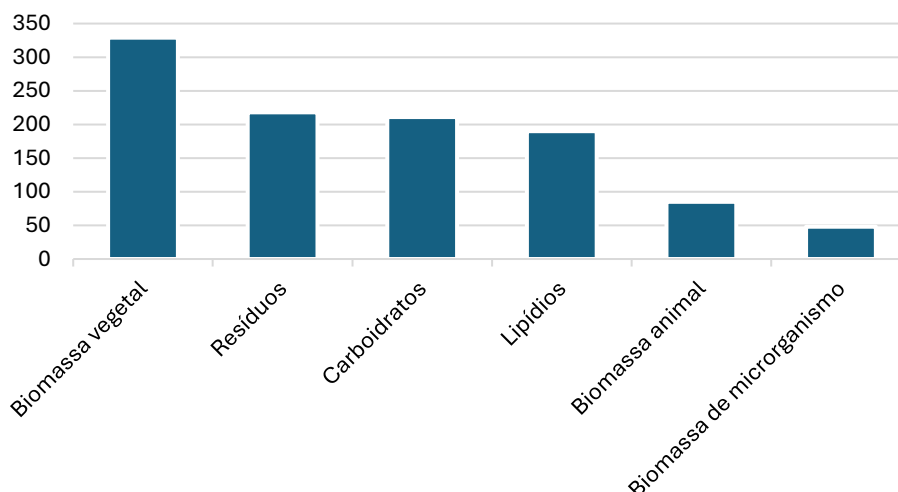


Figura 23 - Tipos de biomassa relacionados às invenções de SAF depositadas no Brasil

Fonte: elaboração própria baseada em (INPI, 2026)

A rota HEFA foi identificada em 68 documentos e a rota ATJ em 62 nos pedidos depositados no Brasil. O equilíbrio entre esses dois grupos indica que, embora HEFA seja uma rota mais madura do ponto de vista comercial, há também interesse tecnológico relevante em rotas baseadas em álcoois, especialmente em um país com experiência consolidada na produção de etanol. A rota FT aparece em 35 pedidos, enquanto SIP e CHJ surgem em volumes menores (INPI, 2026). Nesse contexto, o Brasil é visto como território de proteção para diferentes alternativas tecnológicas, com maior concentração em rotas associadas à biomassa e às matérias-primas compatíveis com a base produtiva nacional.

Entretanto, apesar do Brasil ter uma base produtiva para entrar no mercado de SAF, ainda aparece pouco como origem das tecnologias. A maior parte dos pedidos depositados no país pertence a *players* estrangeiros, o que sugere o interesse no mercado brasileiro, mas ao mesmo tempo, reforça a necessidade de acompanhar quais rotas estão protegidas, por quem e em que condições. A partir disso, a análise avança para Goiás para avaliar quais tecnologias podem dialogar com a estrutura produtiva do estado.

5.4 O contexto de Patentes no Estado de Goiás

O recorte nacional mostra que o Brasil possui base produtiva relevante para ingressar no mercado de SAF, mas ainda aparece pouco como origem das tecnologias protegidas. Em Goiás, essa relação se expressa pela presença de cadeias agroindustriais, pela existência de infraestrutura e logística já instalada e pelo fortalecimento recente do ambiente acadêmico, científico e institucional voltado à transição energética. O levantamento de patentes não indica o estado, neste momento, como origem relevante de invenções associadas a SAF, o que torna necessário analisar as condições que podem favorecer a criação de tecnologias nos próximos anos.

Assim, foi realizada, ao longo de junho de 2026, uma análise complementar na base do INPI dos pedidos depositados no Brasil, considerando a Unidade da Federação (GO) e buscas por nome e CNPJ. A partir disso, não foram identificadas patentes diretamente relacionadas ao estado de Goiás.

Como já citado, no Brasil, foram identificados 68 documentos relacionados à rota HEFA e 62 à rota ATJ, indicando interesse de proteção em tecnologias baseadas no processamento de lipídios e carboidratos (INPI, 2026). Nesse sentido, ambas as rotas apresentam grande aderência ao perfil goiano. Em Goiás, a rota HEFA se conecta a óleos vegetais, como óleo de soja, e de matérias-primas como sebo bovino e óleo residual. A rota ATJ dialoga diretamente com a produção de etanol de cana e de milho, na qual o estado já possui presença relevante (GOIÁS, 2025a; GOIÁS, 2025b; IATA, 2019).

Dessa forma, a estruturação de uma cadeia de SAF em Goiás passa pela combinação e alinhamento de diferentes fatores, como: base produtiva, acesso à tecnologia, capacidade de certificação, articulação com empresas no setor e infraestrutura compatível.

Um exemplo no estado é o terminal terrestre de Senador Canedo, operado pela Transpetro. Ele armazena e distribui diesel, gasolina, QAV e GLP para companhias distribuidoras da região, além de operar estruturas associadas a derivados, álcool e biodiesel (TRANSPETRO, 2026). Além desse, a Petrobras inaugurou, em 2024, um polo de venda de combustíveis em Rio Verde, utilizando modal dutoviário até Senador Canedo e ao transporte rodoviário até Rio Verde (AGÊNCIA PETROBRAS, 2024). Esses terminais apontam para uma infraestrutura já existente, com recursos logísticos e comerciais para uma eventual cadeia de combustíveis sustentáveis no estado.

O recente avanço da infraestrutura científica instalada no estado também fortalece essa perspectiva. A Universidade Federal de Goiás (UFG) dispõe de estruturas de pesquisa que podem apoiar a agenda de SAF, especialmente em temas ligados à caracterização de biomassa, bioenergia e aproveitamento energético de matérias-primas locais. Um exemplo é o Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia, que realiza avaliação de biomassa e biocombustíveis agroflorestais, com atuação em temas relevantes para a análise de qualidade, desempenho energético e uso de insumos renováveis (UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2022).

Ainda nesse contexto, a UFG lançou, em 2026, dentro do seu Parque Tecnológico, o Enermol HUB UFG, uma iniciativa complementar à infraestrutura já existente na universidade. O *hub* é uma estrutura voltada à conexão entre ciência, poder público e setor produtivo, com foco no desenvolvimento de soluções associadas à transição energética e funcionará como um acelerador de soluções tecnológicas escaláveis. Segundo a UFG, sua atuação envolve a oferta de métodos analíticos moleculares e de expertise para o desenvolvimento de biomassas em combustíveis avançados, incluindo análises de qualidade de combustíveis, conversão de biomassas e apoio a projetos aplicados (UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2026a).

Além disso, o Governo do Estado lançou o Programa Estadual de Combustível Sustentável de Aviação, Goiás SAF. A iniciativa sinaliza a incorporação do tema à agenda pública e indica a intenção de aproximar a academia das estratégias do Governo para combustíveis sustentáveis. Esse movimento cria um ambiente institucional favorável ao desenvolvimento de futuras soluções tecnológicas associadas às rotas de SAF.

Ainda no ambiente acadêmico da UFG, destaca-se o Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (CEHTES), que reforça a presença da universidade em temas ligados à transição energética. O centro atua em áreas como hidrogênio, combustíveis avançados, eficiência energética e mobilidade veicular, com apoio do Governo do Estado de Goiás e colaboração acadêmica (UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2026b).

A infraestrutura científica e tecnológica do estado também conta com a Unidade EMBRAP II IF-Goiás⁷¹, que acrescenta uma dimensão de pesquisa aplicada e interação

⁷¹ As Unidades EMBRAP II são instituições credenciadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial para desenvolver projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em parceria com empresas, com foco na aproximação entre conhecimento científico e aplicação industrial.

com o setor produtivo. A unidade atua em Tecnologias Energéticas Industriais, com foco em geração de energia, eficiência energética, fontes renováveis, fontes limpas e reaproveitamento de matéria-prima, além de dispor de laboratórios voltados a fontes alternativas, instrumentação química, biomassa e energias renováveis (EMBRAP II, 2026).

O levantamento de patentes indica que Goiás ainda não tem participação expressiva como origem de tecnologias protegidas em SAF. No entanto, sua base agroindustrial, infraestrutura de combustíveis e a atuação de instituições como UFG, CEHTES e EMBRAP II IF-Goiás indicam condições para estruturar projetos de pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico associados às rotas HEFA e SAF-ATJ.

Nesse sentido, a devida inserção de Goiás nessa agenda depende da capacidade de se transformar em iniciativas concretas, com articulação entre governo, academia e setor produtivo. Com um ambiente favorável à inovação, a geração de novas patentes relacionadas à SAF pode surgir de maneira orgânica.

6. Conclusão

A análise das rotas tecnológicas de produção de SAF evidencia que a consolidação desse mercado dependerá da combinação entre maturidade tecnológica, disponibilidade sustentável de matérias-primas, viabilidade econômica, desempenho ambiental e segurança regulatória.

No curto prazo, rotas como HEFA e coprocessamento tendem a liderar a oferta, devido ao maior grau de prontidão comercial e ao aproveitamento de cadeias já existentes. No médio prazo, a rota ATJ ganha relevância estratégica para o Brasil e para Goiás, especialmente pela integração com a produção de etanol. No longo prazo, alternativas como FT-BtL, FT-PtL/e-SAF e rotas com incorporação de aromáticos poderão ampliar a escala, diversificar insumos e reduzir a dependência de matérias-primas lipídicas.

Para Goiás, os resultados reforçam a importância de uma estratégia baseada em neutralidade tecnológica, com priorização inicial das rotas mais aderentes à base produtiva estadual, especialmente HEFA e ATJ, sem desconsiderar oportunidades futuras associadas a biomassa residual, hidrogênio de baixo carbono e captura de carbono.

A presença de cadeias agroindustriais consolidadas, infraestrutura logística e instituições de pesquisa cria condições favoráveis para o desenvolvimento de um cluster de SAF. Contudo, sua viabilização dependerá da estruturação de políticas de incentivo, certificação, rastreabilidade, projetos-piloto e articulação entre governo, setor produtivo e academia.

Referências

- ABABNEH, H.; HAMEED, B. H. Electrofuels as emerging new green alternative fuel: a review of recent literature. *Energy Conversion and Management*, v. 254, art. 115213, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115213>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- ABEAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. Panorama 2018. São Paulo: ABEAR, 2018. Disponível em: <https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2019/12/Panorama2018.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- ABEAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. Panorama 2022. São Paulo: ABEAR, 2022. Disponível em: <https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama2022-vf.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- ACELEN RENOVÁVEIS. Acelen Renováveis estrutura e anuncia US\$ 1,5 bilhão para construção de biorrefinaria de SAF no Brasil. São Paulo, 22 maio 2026. Disponível em: <https://www.acelenrenovaveis.com.br/>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP nº 997, de 25 de março de 2026. Estabelece as especificações dos querosenes de aviação JET A e JET A-1 e dos componentes sintéticos de mistura. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 mar. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-impacto-regulatorio-air/air/air-concluidas/2026>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- AGÊNCIA PETROBRAS. Petrobras tem novo polo de venda de combustíveis em Rio Verde. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, 15 fev. 2024. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-tem-novo-polo-de-venda-de-combustiveis-em-rio-verde>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- AGORA VERKEHRSWENDE; PTX HUB. Defossilising aviation with e-SAF – An introduction to technologies, policies, and markets for sustainable aviation fuels. Berlin: Agora Verkehrswende; PtX Hub, 2024. Disponível em: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2024/E-Fuels-im-Luftverkehr_EN/111_Defossilising_Aviation_with_e-SAF.pdf.
- AGROICONE; ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB). Feedstock availability for sustainable aviation fuel in Brazil: challenges and opportunities. Geneva: RSB, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355063/65677564/Feedstock%2Bavailability%2Bfor%2Bsustainable%2Baviation%2Bfuels%2Bin%2BBrazil->

Challenges%2Band%2B Opportunities.pdf/0ef737a3-6382-167b-b788-63189bd20c89. Acesso em: 21 ago. 2026.

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. CORSIA. Brasília, DF: ANAC, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Inventário de emissões: metodologia Tier 1. Brasília, DF: ANAC, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/inventario-de-emissoes-metodologia-tier-1>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Linha do tempo: temas ambientais na aviação. Brasília, DF: ANAC, 2024b. Disponível em: <https://hotsites.anac.gov.br/conexaosaf/assets/docs/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20CORSIA%20-%2015.08.2024.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Metodologia do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas. 2. ed. Brasília, DF: ANAC, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/arquivos/MetodologiadolnventrioNacionaldeEmissesAtmosfericas.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. OACI reconhece a sustentabilidade do etanol brasileiro para produção de SAF. Brasília: ANAC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2025/oaci-reconhece-a-sustentabilidade-do-etanol-de-milho-brasileiro-para-producao-de-saf>. Acesso em: 05 jun. 2026.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Combustíveis de aviação. Brasília, DF: ANP, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021. Brasília, DF: ANP, 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 987, de 11 de agosto de 2025. Brasília, DF: ANP, 2025.

Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-987-2025>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

SAF: regulamentação e rotas tecnológicas. Apresentação realizada em 15 ago. 2024. Brasília, DF: ANP, 2024b. Disponível em: <https://hotsites.anac.gov.br/conexaosaf/assets/docs/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20rotas%20tecnol%C3%B3gicas%20-%2015.08.2024.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis. Brasília, DF: ANP, 2026b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-biocombustiveis>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D7566-26: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2026. DOI: 10.1520/D7566-26.

ATNOORKAR, Swaroop; WIATROWSKI, Matthew; NEWES, Emily; DAVIS, Ryan; PETERSON, Steve. Algae to HEFA: economics and potential deployment in the United States. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 18, p. 1121-1136, 2024. DOI: 10.1002/bbb.2623.

AXENS. All roads leading to sustainable aviation fuel (SAF). Rueil-Malmaison: Axens, 2026. Disponível em: <https://www.axens.net/expertise/renewable-fuels-bio-based-chemicals/sustainable-aviation-fuel>. Acesso em: 1 jun. 2026.

BAUEN, A. et al. Sustainable aviation fuels: status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. *Johnson Matthey Technology Review*, v. 64, n. 3, p. 263-278, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>. Acesso em: 2 jun. 2026.

BELL, Aron; MANNION, Liam Anthony; KELLY, Mark; PARKER, Robert; GHAANI, Mohammad Reza; DOOLEY, Stephen. Life cycle CO₂e intensity of power-to-liquid sustainable aviation fuel scenarios and specific use cases. *Advances in Applied Energy*, v. 20, art. 100248, 2025. DOI: 10.1016/j.adapen.2025.100248.

BRANCO-VIEIRA, M. et al. Environmental assessment of industrial production of microalgal biodiesel in central-south Chile. *Journal of Cleaner Production*, v. 266, p. 121756, 2020. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121756.

- BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- CAI, H.; MARKHAM, J.; DUNN, J. B. et al. Techno-economic analysis and life-cycle analysis of two light-duty bioblendstocks: isobutanol and aromatic-rich hydrocarbons. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 8, p. 10791–10801, 2018. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b01152.
- CEBRI, BID, BNDES, Coppe (UFRJ), EPE, FIPE (USP) e MRTS (USP). Programa de Transição Energética (PTE). 2025. Disponível em: <https://pte2.org/index.html>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- CHIRESHE, F. et al. Cost-effective sustainable aviation fuel: insights from a techno-economic and logistics analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 210, art. 115157, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115157>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- CLIMATE WATCH. Historical GHG Emissions. 2025. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2022&start_year=1990. Acesso em: 2 set. 2025.
- CNN BRASIL. Petrobras aposta no etanol para abastecer aviões. São Paulo: CNN Brasil, 2026. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/blogs/pedro-cortes/economia/macroeconomia/petrobras-aposta-no-etanol-para-abastecer-avioes/>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- DE JONG, S. et al. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*, Londres, v. 10, n. 64, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0739-7>
- DELL'AVERSANO, Sonia; VILLANTE, Carlo; GALLUCCI, Katia; VANGA, Giuseppina; DI GIULIANO, Andrea. E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition. *Energies*, [S. l.], v. 17, n. 16, p. 1–43, 2024. DOI: 10.3390/en17163995.
- DOE. DEPARTMENT OF ENERGY. World's first ethanol-to-jet fuel plant paves the way for commercial production of SAF. Washington, DC: DOE, 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/cmei/fuels/articles/worlds-first-ethanol-jet-fuel-plant-paves-way-commercial-production-saf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

- 88

- ENILIVE. Enilive begins SAF production at its plant in Gela (Sicily), capable of meeting one third of Europe's demand. Roma: Eni, 2025. Disponível em: <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2025/01/enilive-begins-saf-production-at-its-plant-in-gela.html>. Acesso em: 1 jun. 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional: séries históricas completas. Rio de Janeiro: EPE, 2026a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Bioquerosene e RenovaBio. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE_Jos%C3%A9%20Mauro_Bioquerosene%20e%20RenovaBio_07mai.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil e sinergia com o diesel verde. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-924/CA-EPE-DPG-SDB-2025-17_Caderno%20de%20SAF%20e%20diesel%20verde_2025.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil: Sustainable Aviation Fuel, SAF, perspectivas futuras. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_Combust%C3%ADveis_Sustent%C3%A1veis_Avia%C3%A7%C3%A3o_Brasil.pdf. Acesso em: 22 maio 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2025-2034. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-729/NT-EPE-DPG-SDB-2023-07_Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2025-2034.pdf. Acesso em: 5 jun. 2026.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2055: rumo a 2055: perspectivas para o sistema energético nacional do futuro. Brasília, DF: EPE, 2026b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-729/NT-EPE-DPG-SDB-2023-07_Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2025-2034.pdf.

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-865/topico-844/PNE%202055_Caderno%20S%C3%ADntese_Fevereiro%202026_Vers%C3%A3o%20Consulta%20P%C3%ABlica.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. RenovaBio: metodologia de projeção. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/topico-749/Workshop%20CTBE%20%E2%80%93%20RenovaBio%20%E2%80%93%20Metodologia%20de%20Proje%C3%A7%C3%A3o%20%E2%80%93%2029Set2017%20-%20ARQUIVO%208.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA., 2008. Revisão das metodologias para previsão de demanda de derivados de petróleo – QAV. Estudos Associados ao Plano Decenal de Energia. Empresa de Pesquisa Energética.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA., 2009. Serviço técnico especializado para apoio em econometria, visando o Plano Decenal de Energia/PDE2020 – Produto II. Rio de Janeiro. Empresa de Pesquisa Energética.

EPE; MME. Empresa de Pesquisa Energética/ Ministério de Minas e Energia. BRASIL. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília, DF: MME; EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.

FAROOQ, Z.; WETTERLUND, E.; MESFUN, S.; FURUSJÖ, E. Uncovering the economic potential of sustainable aviation fuel production pathways: a meta-analysis of techno-economic studies. *Energy Conversion and Management*, v. 341, art. 120076, 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120076.

FILOSO, S.; CARMO, J. B. do; MARDEGAN, S. F.; LINS, S. R. M.; GOMES, T. F.; MARTINELLI, L. A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 1847–1856, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.012.

GALLET, C. A.; DOUCOULIAGOS, H. The income elasticity of air travel: a meta-analysis. *Annals of Tourism Research*, v. 49, p. 141-155, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160738314001145>. Acesso em: 8 jun. 2026.

- GEVO. Gevo and Future Energy Global sign SAF Scope 1 and Scope 3 voluntary carbon credit offtake agreement. Englewood: Gevo, 2025. Disponível em: <https://investors.gevo.com/news-releases/news-release-details/gevo-and-future-energy-global-sign-saf-scope-1-and-scope-3/>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- GOIÁS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Destaque do mês: Agro em Dados, maio 2025, cana-de-açúcar. Goiânia: SEAPA, 2025b. Disponível em: <https://goias.gov.br/agricultura/destaque-do-mes-agro-em-dados-maio-2025-cana-de-acucar/>. Acesso em: 22 maio 2026.
- GOIÁS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Produção de grãos em Goiás deve avançar 17% na safra 2024/2025. Goiânia: SEAPA, 2025a. Disponível em: <https://goias.gov.br/agricultura/producao-de-graos-em-goias-deve-avancar-17-na-safra-2024-2025/>. Acesso em: 22 maio 2026.
- GUPTA, P. K.; KUMAR, V.; MAITY, S. Renewable fuels from different carbonaceous feedstocks: a sustainable route through Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 96, p. 853-868, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.6644>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- GURGEL, A. C. et al. Contribution of double-cropped maize ethanol in Brazil to sustainable development. *Nature Sustainability*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01424-5>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- HOLLADAY, J.; ABDULLAH, Z.; HEYNE, J. Sustainable aviation fuel: review of technical pathways. Washington, DC: U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2020. DOE/EE-2041. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- HONEYWELL UOP. Ecofining™. Des Plaines: Honeywell UOP, 2026. Disponível em: <https://uop.honeywell.com/en/industry-solutions/renewable-fuels/ecofining>. Acesso em: 1 jun. 2026.
- IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. Finance Net Zero CO2 Emissions Roadmap September 2024 IATA Sustainability and Economics. Montreal: IATA, 2024. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/finance-net-zero-roadmap.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. Global feedstock assessment for SAF production: outlook to 2050. Montreal: IATA, 2025. Disponível

em: <https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/global-feedstock-assessment-for-saf-production-outlook-to-2050.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

IATA. INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. Sustainable aviation fuel: technical certification. Montreal: IATA, 2019. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>. Acesso em: 22 maio 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. 8. ed. Montreal: ICAO, 2025b. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-06-Default-Life-Cycle-Emissions-November-2025.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. CORSIA Guidance to Sustainability Certification Schemes (SCS) for application of CORSIA Sustainability Criteria, Themes 4 to 8, for CORSIA Sustainable Aviation Fuel produced on or after 1 January 2024. Montreal: ICAO, 2022. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/Guidance-on-Sustainability-Themes-4-8.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. CORSIA SUPPORTING DOCUMENT CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology. Montreal: ICAO, 2025a. Disponível em: https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/CORSIA_Supporting_Document_CORSIA-Eligible-Fuels_LCA_Methodology_V8.pdf. Acesso em: 05 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Fuel composition effects on nvPM emissions. Montreal: ICAO, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/ScientificUnderstanding/ICAO-CAEP12-Assessment-Report-on-fuel-composition-effects-on-nvPM-emissions.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO document CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels. Montreal: ICAO, 2025c. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental->

protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf. Acesso em: 2 maio. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO Global Framework for Sustainable Aviation Fuels (SAF), Lower Carbon Aviation Fuels (LCAF) and other Aviation Cleaner Energies. Montreal: ICAO, 2023. Disponível em: https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/GFAAF/Documents/ICAO-Global-Framework-on-Aviation-Cleaner-Energies_24Nov2023.pdf. Acesso em: 25 maio 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. SAF conversion processes. Montreal: ICAO, 2023. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes>. Acesso em: 22 maio 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. SAF conversion processes. Montreal: ICAO, 2026b. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes>. Acesso em: 2 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Sustainable Aviation Fuel (SAF). Montreal: ICAO, 2026a. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ICAO. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Sustainable aviation fuels guide. Montreal: ICAO, 2018. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf. Acesso em: 2 jun. 2026.

IEA BIOENERGY. Progress in commercialization of biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): technologies, potential and challenges. Task 39. [S.l.]: IEA Bioenergy, 2021. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2026.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Aviation. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>. Acesso em: 25 maio 2026.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy Review 2025. [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2026.

- IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2025 Executive summary 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025/executive-summary> Acesso em: 8 jun. 2026.
- IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 05 jun. 2026.
- INPI. INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Combustíveis sustentáveis de aviação, SAF: pedidos de patente no Brasil e no mundo. Rio de Janeiro: INPI/DIREX/CGEI/COIPI/DEPIN, 2026. Radar Tecnológico. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/radares-tecnologicos>. Acesso em: 22 maio 2026.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); BLUERISK. Water for hydrogen production. Abu Dhabi: IRENA, 2023. ISBN 978-92-9260-526-1. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/Water-for-hydrogen-production>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- IPCC. International Panel on Climate Change. PENNER, J. E.; LISTER, D. H.; GRIGGS, D. J.; DOKKEN, D. J.; MCFARLAND, M. (eds.). Aviation and the Global Atmosphere. Prepared in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. p. 373.
- ISCC. INTERNATIONAL SUSTAINABILITY AND CARBON CERTIFICATION. ISCC CORSIA 205 Life Cycle Emissions 2.0. Köln: ISCC System GmbH, 2023. Disponível em: https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2023/12/ISCC_CORSIA_205_Life_Cycle_Emissions_2.0.pdf. Acesso em: 05 jun. 2026.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, 2006a.

- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva, 2006b.
- KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance; TIFFANY, Douglas G. Reducing life cycle greenhouse gas emissions of corn ethanol by integrating biomass to produce heat and power at ethanol plants. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 3, p. 1103-1113, 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.11.035.
- KHALID, H. et al. Next generation sustainable aviation fuels powered by renewable energy. *Biomass and Bioenergy*, v. 211, art. 109164, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109164>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- LANZAJET. Freedom Pines Fuels. Soperton: LanzaJet, 2026. Disponível em: <https://www.lanzajet.com/freedom-pines>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- LANZATECH. Haffner Energy, LanzaJet, and LanzaTech join forces to unlock Alcohol-to-Jet SAF production from biomass residues. Chicago: LanzaTech, 2025. Disponível em: <https://lanzatech.com/haffner-energy-lanzajet-and-lanzatech-join-forces-to-unlock-alcohol-to-jet-saf-production-from-biomass-residues/>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- MAGA, Daniel; THONEMANN, Nils; HIEBEL, Markus; SEBASTIÃO, Diogo; LOPES, Tiago F.; FONSECA, César; GÍRIO, Francisco. Comparative life cycle assessment of first- and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 24, p. 266-280, 2019. DOI: 10.1007/s11367-018-1505-1.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 5, p. 1577-1600, 2011. DOI: 10.5194/hess-15-1577-2011.
- MF. Ministério da Fazenda.BRASIL. SPE mantém previsão de crescimento de 2,3% para 2026 mesmo diante do conflito no Oriente Médio. Brasília, DF: Ministério da Fazenda, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2026/marco/spe-mantem-previsao-de-crescimento-de-2-3-para-2026-mesmo-diante-do-conflito-no-orientes-medio>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- Micheli, M.; Moore, D.; Bach, V.; Finkbeiner, M. Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO₂ from Direct Air Capture in Germany. *Sustainability* 2022, 14, 10658. <https://doi.org/10.3390/su141710658>

- MONTANA RENEWABLES. Sustainable aviation fuel. Great Falls: Montana Renewables, 2026. Disponível em: <https://montanarenewables.com/products/sustainable-aviation-fuel/>. Acesso em: 1 jun. 2026.
- MORIARTY, Kristi; BRACCI, Justin; NASER, Nimal; GRIM, Gary. An overview of potential future aviation energy carriers. Golden, CO: National Laboratory of the Rockies, 2026. NLR/TP-5400-100028. Disponível em: <https://docs.nlr.gov/docs/fy26osti/100028.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- MPOR. Ministério de Portos e Aeroportos. BRASIL. Plano Aeroviário Nacional 2022-2052. Brasília, DF: MPOR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aereo/plano-aeroviario-nacional/pan24_plano_aeroviario_nacional_2022_2052.pdf/@@display-file/file. Acesso em: 8 jun. 2026.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Sustainable aviation fuel state-of-industry report: hydroprocessed esters and fatty acids pathway. Golden, CO: NREL, 2024. NREL/TP-5100-87803. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87803.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- NEMMOUR, Amira; INAYAT, Abrar; JANAIREH, Isam; GHENAI, Chaouki. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: a literature review. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 75, p. 29011-29033, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.240.
- NESTE. Neste started producing sustainable aviation fuel (SAF) at its renewables refinery in Rotterdam, the Netherlands. Espoo: Neste, 2025. Disponível em: <https://www.neste.com/news/neste-started-producing-sustainable-aviation-fuel-saf-at-its-renewables-refinery-in-rotterdam-the-netherlands>. Acesso em: 1 jun. 2026.
- NG, K. S.; FAROOQ, D.; YANG, A. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 150, art. 111502, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111502>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 14, n. 3, p. 236–247, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0065-9>.

OUR WORLD IN DATA. Our World in Data. 2024. What share of global CO₂ emissions come from aviation? Disponível em: <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>. Acesso em: 2 set. 2025.

PETROBRAS. Petrobras lança combustível sustentável de aviação produzido totalmente no Brasil. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, 2025b. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-lan%C3%A7a-combust%C3%ADvel-sustent%C3%A1vel-de-avia%C3%A7%C3%A3o-produzido-totalmente-no-brasil>. Acesso em: 5 jun. 2026.

PETROBRAS. Petrobras produz SAF na Revap. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, 2025a. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-produz-saf-na-revap>. Acesso em: 5 jun. 2026.

PETROBRAS. Plano Estratégico 2050 e Plano de Negócios 2026-2030. Rio de Janeiro: Petrobras, 2025c. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/estrategia>. Acesso em: 8 jun. 2026.

PETROBRAS. Plano Estratégico 2050: Plano de Negócios Petrobras 2025-2029. Rio de Janeiro: Petrobras, 2024. Disponível em: <https://vipfiles.valor.com.br/BDEmpresas/b0201927-2769-4e05-8957-83c5df1db21f.pdf?shem=rims pwoue>. Acesso em: 8 jun. 2026.

PROQR; MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI); DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação. Brasília, DF: ProQR; MCTI; GIZ, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

RAM, Vishal; SALKUTI, Surender Reddy. An Overview of Major Synthetic Fuels. *Energies*, [S. l.], v. 16, n. 6, 2023. DOI: 10.3390/en16062834

RAUTELA, Akhil; YADAV, Indrajeet; GANGWAR, Agendra; YADAV, Preeti; KUMAR, Sanjay. Techno-economic analysis and life cycle assessment of sustainable farnesene production by genetically engineered cyanobacteria utilizing carbon dioxide: a step towards commercial viability. *Environmental Science: Advances*, v. 5, n. 7, p. 1753-1762, 2026. DOI: 10.1039/D5VA00445D.

REUTERS. China's aviation fuel demand seen up 13% in 2024, CNPC research says. London: Reuters, 2024. Disponível em:

<https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/chinas-aviation-fuel-demand-seen-up-13-2024-cnpc-research-2024-02-28/>. Acesso em: 8 jun. 2026.

ROCCO, E.; HENKERS, C. Biocombustíveis sustentáveis para a aviação no Brasil. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349174140_BIOCOMBUSTIVEIS_SUSTENTAVEIS_PARA_A_AVIACAO_NO_BRASIL. Acesso em: 8 jun. 2026.

RUMIZEN, Mark A. Qualification of alternative jet fuels. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, art. 760713, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.760713>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.760713/full>. Acesso em: 1 jun. 2026.

Saide, Clara S. M; Aragão, Amanda P.; Machado, Giovani V.; Cavalcanti, Marcelo C. B.; Valle, Ricardo Nascimento e Silva do. 2012. PERSPECTIVAS DA DEMANDA DE QUEROSENE DE AVIAÇÃO (QAV) NO BRASIL. ROG: IBP1385_12.

SECCHI, Sabrina Garcia; MORETI, Thaisa; INTERLENGHI, Stefano; NOVAES, Leandro; COUTINHO, Paulo; MAIA, Jeiveison Gobério. 2025. NOTA TÉCNICA Combustíveis Sustentáveis de Aviação: Perspectivas e desafios para a produção de SAF no Brasil. https://observatorio.firjan.com.br/sites/default/files/2025-07/07.2025%20-%20Nota%20SAF_v7.pdf

Rio de Janeiro, Brasil.

SEI (STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE). It's time to move beyond carbon tunnel vision. 2022. Disponível em: <https://www.sei.org/perspectives/move-beyond-carbon-tunnel-vision/>. Acesso em: 25 maio 2026.

SUN, J. et al. Beyond cars: Fischer-Tropsch synthesis for non-automotive applications. *ChemCatChem*, v. 11, p. 1412-1424, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.201802051>. Acesso em: 2 jun. 2026.

SZKLO, A. et al. Sinergias entre as metas de descarbonização dos setores de aviação e de transporte marítimo: relatório final. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade, 2022. Disponível em: <https://climaesociedade.org/wp-content/uploads/2024/11/sinergias-entre-as-metas-de-descarbonizacao.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

THE ROYAL SOCIETY. Sustainable synthetic carbon based fuels for transport: Policy briefing 2019.. Disponível em: <https://phys.org/news/2019-09-synthetic-fuels-carbon-footprint.html>.

- THOMSEN, Marie Owens; MISTRY, Hemant; BLOCK, Alejandro. Update on Sustainable Aviation Fuels (SAF): media briefing. 79th IATA Annual General Meeting, Istanbul, June 2023. Montreal: International Air Transport Association, 2023.
- TOPSOE. HydroFlex technology. Kongens Lyngby: Topsoe, 2026. Disponível em: <https://www.topsoe.com/solutions/technologies/process-licensing/hydroflex-technology>. Acesso em: 1 jun. 2026.
- TOTALENERGIES. Total and Amyris renewable jet fuel ready for use in commercial aviation. Paris: TotalEnergies, 2014. Disponível em: <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/total-and-amyris-renewable-jet-fuel-ready-use-commercial-aviation>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- TRANSPETRO. PETROBRAS TRANSPORTE S.A. Senador Canedo - GO. Rio de Janeiro: Transpetro, 2026. Disponível em: <https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/nossas-atividades/dutos-e-terminais/terminais-terrestres/senador-canedo-go.htm>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- UECKERDT, Falko; BAUER, Christian; DIRNAICHNER, Alois; EVERALL, Jordan; SACCHI, Romain; LUDERER, Gunnar. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. Nature Climate Change, v. 11, p. 384-393, 2021. DOI: 10.1038/s41558-021-01032-7.
- UFG. UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Conheça o CEHTES. Goiânia: UFG, 2026b. Disponível em: <https://cehtes.ufg.br/p/49769-conheca-o-cehtes>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- UFG. UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia - LQMBio. Goiânia: UFG, 2022. Disponível em: <https://pitt.prpi.ufg.br/separador-laboratorios/laboratorios/details/3/139>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- UFG. UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. UFG inaugura o Enermol HUB. Goiânia: UFG, 2026a. Disponível em: <https://ufg.br/n/201411-ufg-inaugura-o-enermol-hub>. Acesso em: 3 jun. 2026.
- VALERO. Diamond Green Diesel (DGD) approves a sustainable aviation fuel project at Port Arthur, Texas. San Antonio: Valero, 2023. Disponível em: <https://investorvalero.com/news/news-details/2023/Diamond-Green-Diesel-DGD-Approves-a-Sustainable-Aviation-Fuel-Project-at-Port-Arthur-Texas/default.aspx>. Acesso em: 1 jun. 2026.

- XU, Yuchao; ZHANG, Yahua; DENG, Xin; LEE, Seung-Yong; WANG, Kun; LI, Linbo. Bibliometric analysis and literature review on sustainable aviation fuel (SAF): economic and management perspective. *Transport Policy*, v. 162, p. 296–312, 2025. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.11.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X24003512> . Acesso em: 21 ago. 2026
- WAHEED, W. et al. A review on sustainable aviation fuel production via diverse biomass and waste-derived feedstocks and cutting-edge conversion technologies. *Biomass and Bioenergy*, v. 212, art. 109281, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109281>. Acesso em: 2 jun. 2026.
- WATSON, Madelynn J.; MACHADO, Pedro Gerber; SILVA, Aline Veronese da; SALTAR-RIVERA, Yan M.; RIBEIRO, Celma; NASCIMENTO, Cláudio Augusto Oller do; DOWLING, Alexander W. Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 449, art. 141472, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141472.
- WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. Patent and technology information. Geneva: WIPO, 2026. Disponível em: <https://www.wipo.int/en/web/patents/patent-information>. Acesso em: 22 maio 2026.
- YIN, T.; HUHE, T.; LI, X.; WANG, Q.; LEI, T.; ZHOU, Z. Research on Life Cycle Assessment and Performance Comparison of Bioethanol Production from Various Biomass Feedstocks. *Sustainability*, v. 16, n. 5, 1788, 2024. DOI: 10.3390/su16051788.